

Climat et nucléaire

Francis Leboutte,
ingénieur civil, membre de *Fin du nucléaire asbl*

*84 % des femmes enceintes ont une pathologie.
C'est pourquoi la naissance d'un enfant en parfaite santé est un événement rare.*

Docteur Raisa Misura, pédiatre, directrice de l'hôpital central de Stoline*
(bulletin de janvier 2008 du bureau biélorusse de l'ONU)

* La ville de Stoline se trouve au Belarus, à 240 km au nord-ouest de Tchernobyl (Ukraine).



Document disponible sur www.findunucleaire.be

Libre d'utilisation sous licence Creative Commons BY-ND (paternité, pas de modification)



Avertissement

Notre monde connaît actuellement une crise systémique
qui dépasse la question du réchauffement climatique.

Se focaliser *uniquement* sur un des symptômes de cette crise,
comme le réchauffement climatique, serait dangereux.

Même si nous parvenions à trouver une « solution » à ce
symptôme, nous serions rattrapés par la crise systémique.

À une crise systémique, il faut une réponse systémique.

Réponse qui devrait inclure
une réduction radicale des flux de matières et d'énergie
ainsi que des inégalités, notamment.

Cette réponse qui relève de
l'éthique, de la philosophie et de la politique,
et certainement pas de la technique (les « solutions »),
sera abordée dans la 2^e partie de l'exposé par Bernard Legros

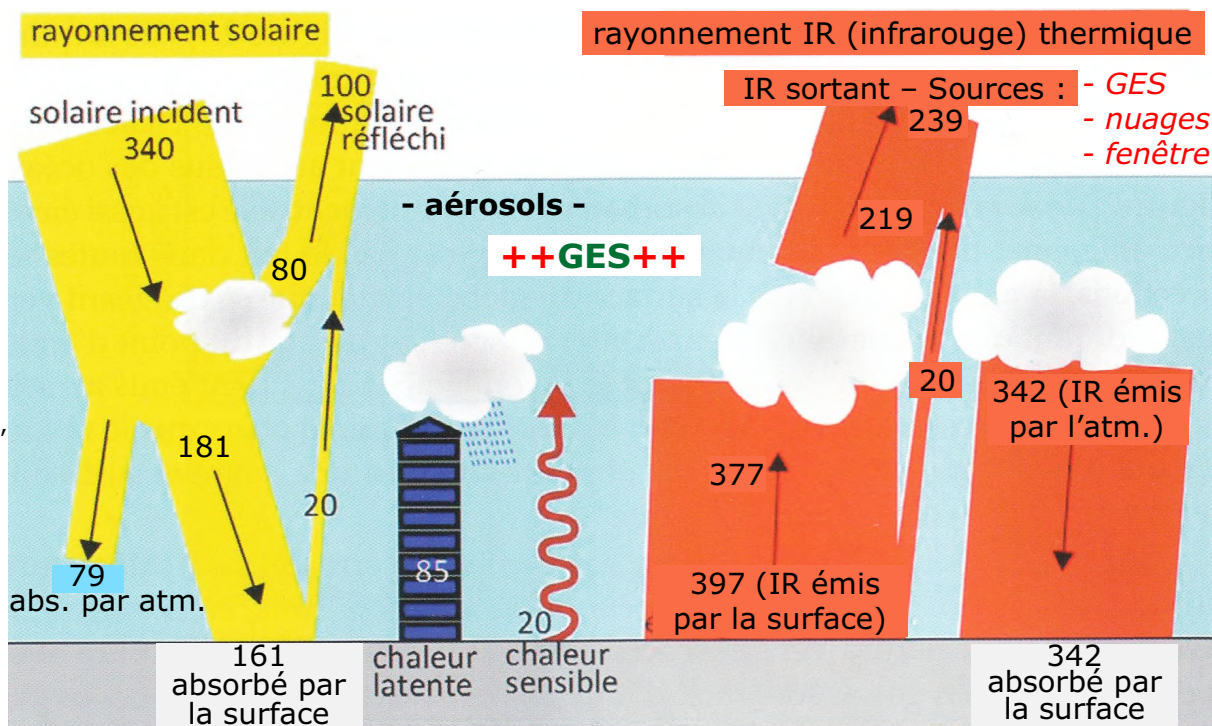
Climat



Effet de serre - Bilan énergétique de la Terre en 2012

Unités :
 W/m^2
(J/s.m^2)

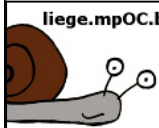
Adapté de :
V. Masson-Delmotte,
2014.
M.A. Mélières et C.
Maréchal, 2015.



- 47% du rayon. solaire est absorbé par la surface (23% par l'atmosphère)
- Restitution de cette énergie : évaporation, convection, IR (infrarouge).
- IR (longueur d'onde + grande) : **piégé par les GES** (vap. d'eau, CO_2 ,...).

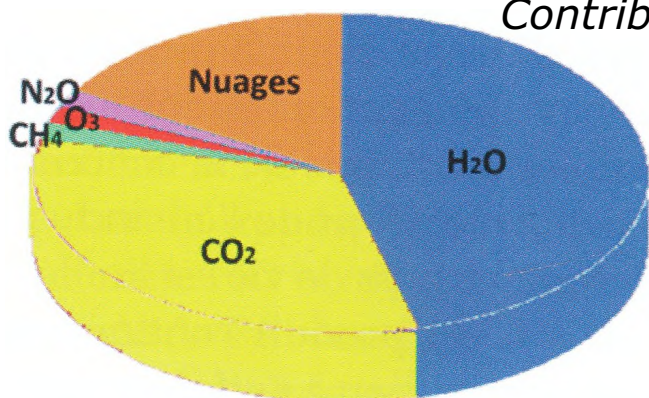
Bilan radiatif de la planète : $340 (\downarrow) \neq 100 + 239 (\uparrow)$

Déséquilibre : **+1 W/m^2 (0,6) absorbé par la surface** (5 bombes A par sec.)

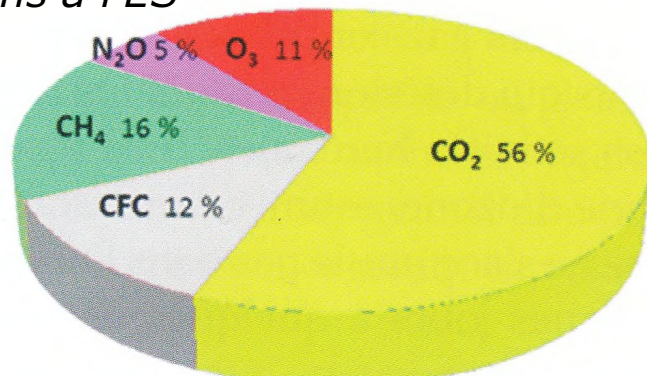


Gaz à effet de serre (GES)

Contributions à l'ES



Nuages et GES (*naturels*, 1750)

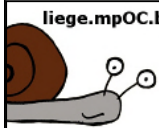


ES *additionnel* dû à l'espèce humaine

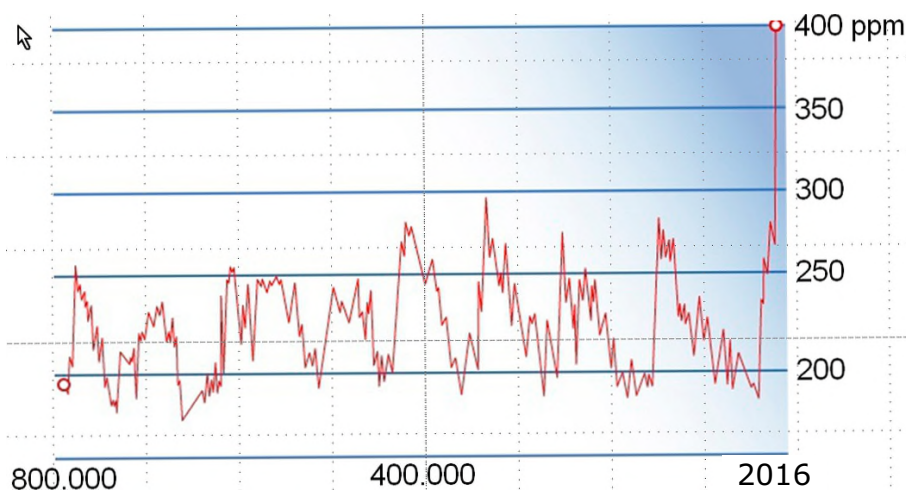
- Principaux GES : vapeur d'eau, CO₂, CH₄, CFC, O₃ et N₂O.
- À l'état de trace (ex. du CO₂ : 0,0405 % ou 405 ppm*)
- Très absorbants des rayonnements infrarouges (mais pas de la lumière solaire)

* ppm : partie par million

Valérie Masson-Delmotte, *Le climat : la terre et le hommes*, 2014



Concentration en CO₂ (seul) dans l'atmosphère

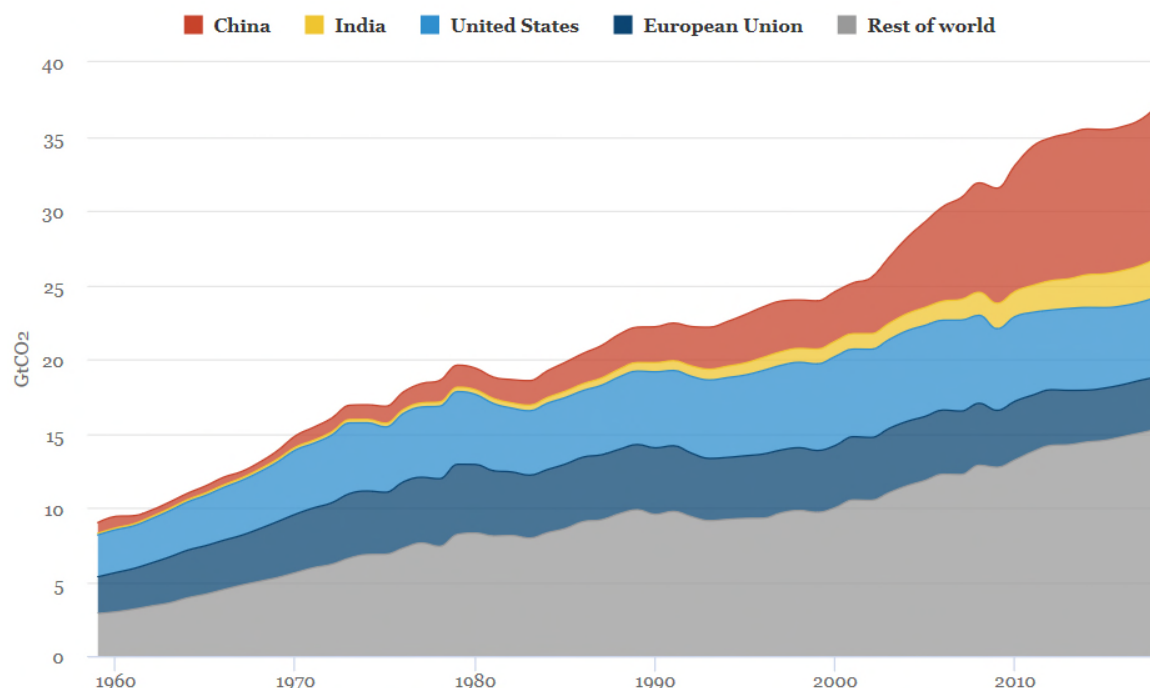


Selon l'analyse du CO₂ dans les bulles d'air d'échantillons de glace prélevés en Antarctique (forage glaciaire de 3,2 km du Dôme C)

- Température de la terre et concentration en CO₂ sont liées.
- Depuis 800.000 ans, jusqu'à notre ère, jamais la concentration en CO₂ n'avait dépassé les **300 ppm** :
 - 2016 : 1ère année à plus de 400 ppm
 - Mars 2019 : - 410 ppm (500 tous les GES)
 - + 1° C



Émissions de CO₂ dues aux énergies fossiles

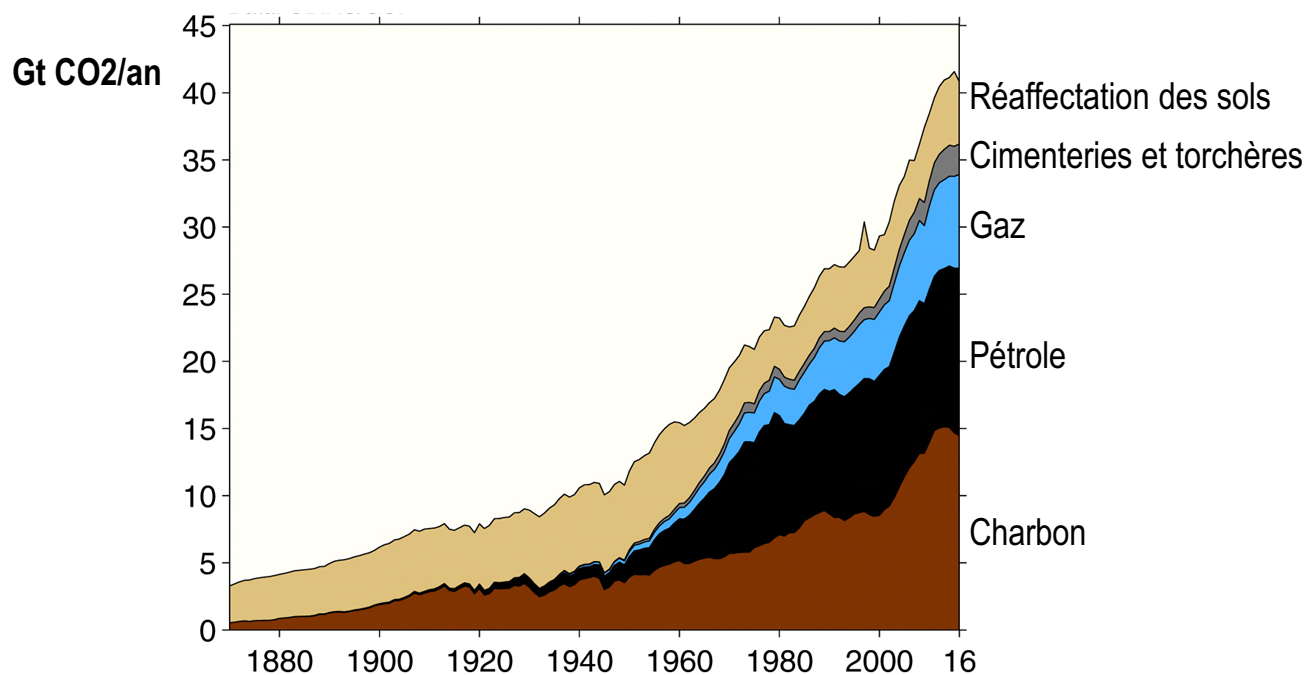


- CO₂ uniquement, énergies fossiles uniquement.
- 2018 : + 2,7 % (record des 7 dernières années).
- Autre source de CO₂ anthropogénique (> 10 %) : changement d'affectation des sols (déforestation principalement).

www.carbonbrief.org, Global Carbon Project (GCP), décembre 2018



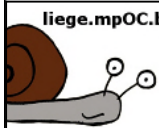
Émissions de CO₂ par source



Premières sources de CO₂ :

- 2016 : charbon (14,5 Gt), pétrole (12,5 Gt).
- Cumulées (1870-2016) : charbon (32 %), sols (31 %), pétrole (25 %).

Global Carbon Project 2017



Évolution du glacier Muir en Alaska

de 1941 à 2004

Entre les 63 ans qui séparent ces deux photos, le glacier a reculé de plus de 7 km.

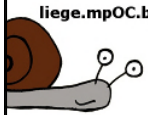


Fig. 7.1a Muir Glacier, 1941



Fig. 7.1b Muir Glacier, 2004

www.usgs.gov/climate_landuse/glaciers/



Émissions des GES et inégalités selon les régions

En **tonne de CO₂e*** par individu et par an (moyenne par région), selon la *production (Prod.)* et la *consommation (Cons.)* - 2013

Émission sur base de la consommation :

- Réalloue des émissions aux pays riches (+ 41 % en Europe)
- Ajuste l'inégalité à la hausse.

Soutenable :

- Scénario d'atténuation (RCP2.6) : budget de 1.000 GtCO₂e -> 2100
- Cumul de la population annuelle jusqu'à 2100 : 795 milliards



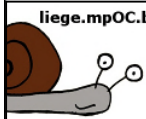
1,3 tCO₂e par individu et par an, soit :

- 10 fois moins que la moyenne européenne
- 5 fois moins que la moyenne mondiale

	Prod.	Ratio	Cons.	Ratio	% C-P
Monde	6,2	1,0	6,2	1,0	0
Amérique du N.	20,0	3,2	22,5	3,6	+13
Russie - Asie C.	10,0	1,6			
Europe de l'O.	9,0	1,5	13,1	2,1	+41
Moyen-Orient	8,0	1,3	7,4	1,2	-8
Chine	8,0	1,3	6,0	1,0	-25
Amérique du S.	5,2	0,8	4,4	0,7	-15
Asie du S.	2,4	0,4	2,2	0,4	-8
Afrique	2,4	0,4	1,9	0,3	-21
Soutenable	1,3	0,2	1,3	0,2	0

- Ratio par rapport à la moyenne mondiale
- % C-P : rapport Cons./Prod. en %

* CO₂e : équivalent-CO₂



Partage du monde en 3 groupes d'individus : les 10 % les plus émetteurs, 40 % (médian) et 50 % (les moins...)

Règle des 10-50 :

- 10 % les plus émetteurs : $\pm$ 50 % des GES

Répartition de ces GES par pays :

USA : 40 % - UE : 20 % - Chine : 10 % - ...

(pays émergents : 33 %)

Moyenne/individu : **28 tCO₂e**

- 50 % les moins émetteurs : $\pm$ 10 % des GES

Répartition... : Inde : 36 % - Chine : 16 % - ...

(non représentés : UE, USA, Japon,...)

Moyenne/individu : **1,6 tCO₂e**

Les 40 % des émetteurs du groupe médian : $\pm$ 40 % des GES

Répartition... : Chine : 35 % - UE : 18 % - USA : 5 % - ...

Moyenne/individu : **6,5 tCO₂e**

Thomas Piketty, Lucas Chancel. Carbon and inequality: from Kyoto to Paris. 2015



Une évidence et une conséquence

Plus vous êtes riche, plus

- vous contribuez à la destruction de la nature,
- vous êtes une menace pour la survie de l'espèce humaine.

Éloge d'une certaine pauvreté :

Gandi (Autobiographie, 1925) :

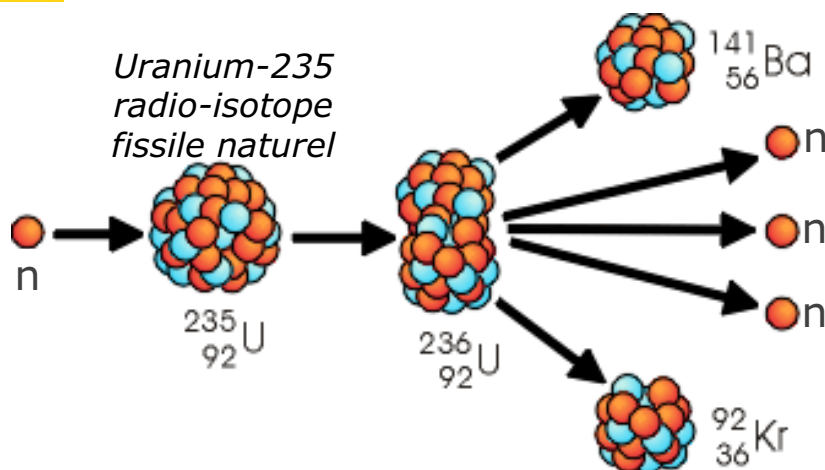
« Il n'y aura pas de réforme possible tant que les gens éduqués et riches n'accepteront pas volontairement le statut des pauvres ».



Nucléaire et climat



La fission nucléaire



+ γ
+ E

$$E = mc^2$$
$$\Delta m : 1/1000$$

- La production de 3 neutrons (n) permet une réaction en chaîne (contrôlée ou non)
- Autres possibilités de fission de l'U-235 : I-131, Cs-137, Sr-90,...
- Filiation radioactive : ...
 - Pb, etc. (+ « rayonnements » ionisants α , β et γ)
- U-238 + neutron → Pu-239 (radio-isotope fissile artificiel)



La position de l'AIEA

(Agence internationale de l'énergie atomique)

« Les émissions de GES du nucléaire,
tout le cycle de vie considéré,
sont parmi les plus faibles et
représentent *moins de 15 g de CO₂eq par kWh* »

AIEA

- Créée en 1957.
- Dépend directement du Conseil de sécurité de l'ONU.
- « *Accélérer et accroître* la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier ».
- A la main sur l'OMS (accord de 1959).

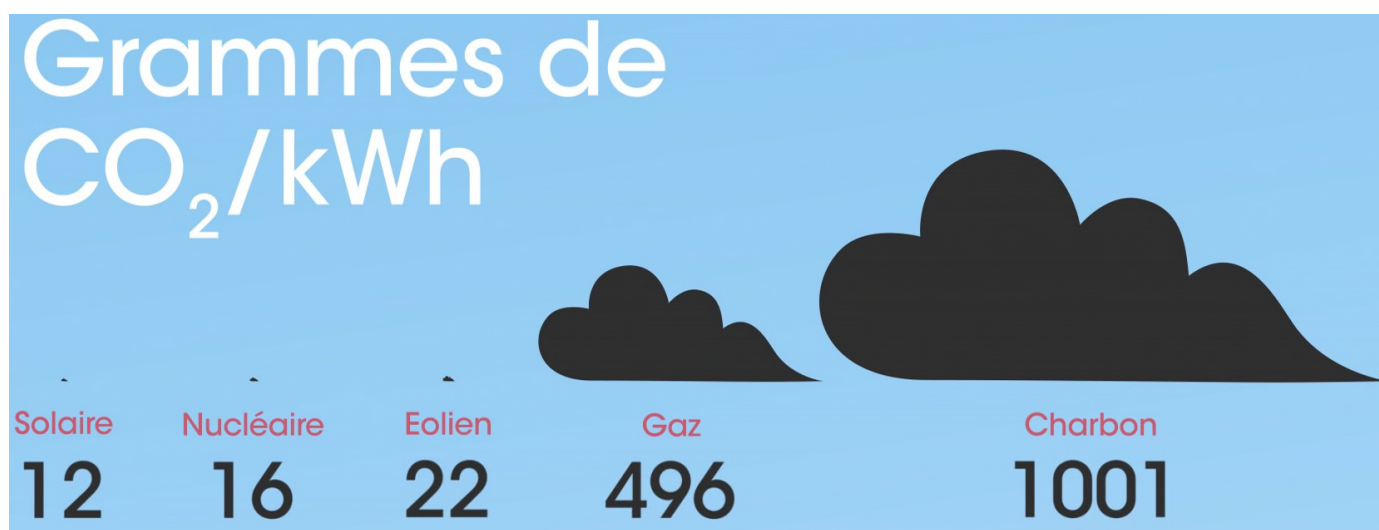
*Un organe de lobbying au sein même de l'ONU,
financé par de l'argent public.*

Climate change and nuclear power, IAEA, 2016



Position relayée par le « Forum » Nucléaire belge

« *Pour combattre le changement climatique,
le nucléaire fait partie de la solution* »



- Mission : *Informier le public sur la technologie nucléaire.*
- Membres : ENGIE-ELECTRABEL, EDF LUMINUS, ORANO (AREVA), WESTINGHOUSE, etc.
- Budget annuel de cette ASBL : plusieurs millions € (2009)



Une position qui percole partout : dans les média, les institutions..., y compris le GIEC

Extrait de la page 1335 du 5^e rapport du GIEC

Annex III

Technology-specific Cost and Performance Parameters

Table A.III.2 | Emissions of selected electricity supply technologies (gCO₂eq/kWh)

Options	Direct emissions	Infrastructure & supply chain emissions	Biogenic CO ₂ emissions and albedo effect	Methane emissions	Lifecycle emissions (incl. albedo effect)
	Min/Median/Max	Typical values			Min/Median/Max
Currently Commercially Available Technologies					
Coal—PC	670/760/870	9.6	0	47	740/820/910
Gas—Combined Cycle	350/370/490	1.6	0	91	410/490/650
Biomass—cofiring					620/740/890 ^a
Biomass—dedicated					130/230/420 ^a
Geothermal	0	45	0	0	6.0/38/79
Hydropower	0	19	0	88	1.0/24/2200
Nuclear	0	18	0	0	3.7/12/110
Concentrated Solar Power	0	29	0	0	8.8/27/63
Solar PV—rooftop	0	42	0	0	26/41/60
Solar PV—utility	0	66	0	0	18/48/180
Wind onshore	0	15	0	0	7.0/11/56
Wind offshore	0	17	0	0	8.0/12/35
Pre-commercial Technologies					
CCS—Coal—Oxyfuel	14/76/110	17	0	67	100/160/200
CCS—Coal—PC	95/120/140	28	0	68	190/220/250
CCS—Coal—IGCC	100/120/150	9.9	0	62	170/200/230
CCS—Gas—Combined Cycle	30/57/98	8.9	0	110	94/170/340
Ocean	0	17	0	0	5.6/17/28

Nuclear : 12 gCO₂eq/kWh



Éléments d'intuition (I) Le combustible

1) Nucléaire – par réacteur (1 GW) – par an

Radioactivité : – 1000 bombes A
– Déchets : x 1 milliard

– Dette énergétique
– Dette GES

25 t uranium enrichi à 4-5 % d'U235

– Dans le cœur
– 1 t fissionnée

200 t d'uranium (0,7 % d'U235)

U appauvri à 0,3 %

200 000 t minerais
800 000 t stérile

1 Mt de roche

Plus :

- Plusieurs t de zirconium* pour les assemblages d'uranium.
- 400 t de chlore et fluor (enrichissement). Etc.
- Déchets, eau contaminée et radioactivité à toutes les étapes.

2) Éolien : sans objet

* 90 % de la production mondiale. Réserves : 50 ans au rythme actuel.

Bioux (zirconium). IRSN (stérile)



Éléments d'intuition (II)

Les matériaux consommés (sur le cycle de vie)

Consommation en g/kWh

- Nucléaire : **200**
- Éolien : **7(10)**
- Rapport de ± 20
- Relation entre consommation de matériaux et émission des GES

Recyclabilité

- Nucléaire : 5 % du total (95 % est contaminé)
- Éolien : $\pm$ important selon la conception

...



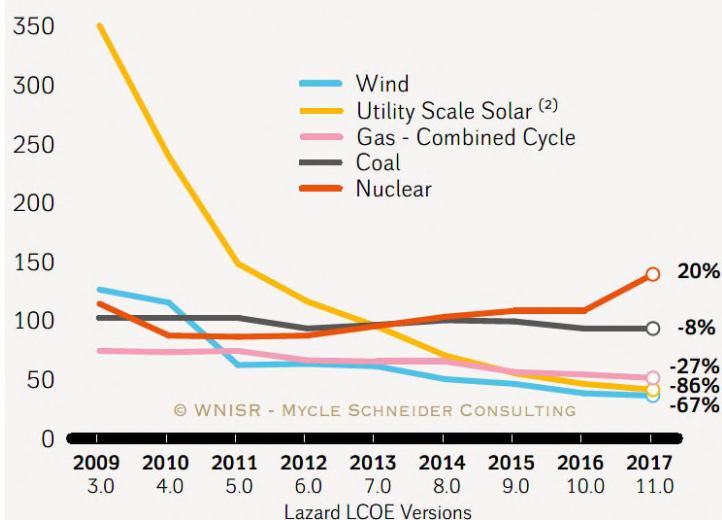
Éléments d'intuition (III)

Les coûts

- Fermeture anticipée de réacteurs aux USA et ailleurs pour cause de rentabilité.
 - Projets en cours arrêtés (2 AP1000 aux USA en 2017 – 5 G\$)
 - EPR Flamanville : 3,3 → 11 G€. Mise en service : 2012 → 2020 ?
- Sans les subsides...

Selected Historical Mean Costs by Technology

LCOE values in US\$/MWh ⁽¹⁾



LCOE : *Levelized Cost of Energy*

Prix de revient moyen sur la durée de vie de l'installation en \$/MWh (seuil de rentabilité)

LCOE analysis, Lazard, 2017 (pour USA)

En 2017

Nucléaire : > 100 €/MWh

PV et éolien : < 50 €/MWh

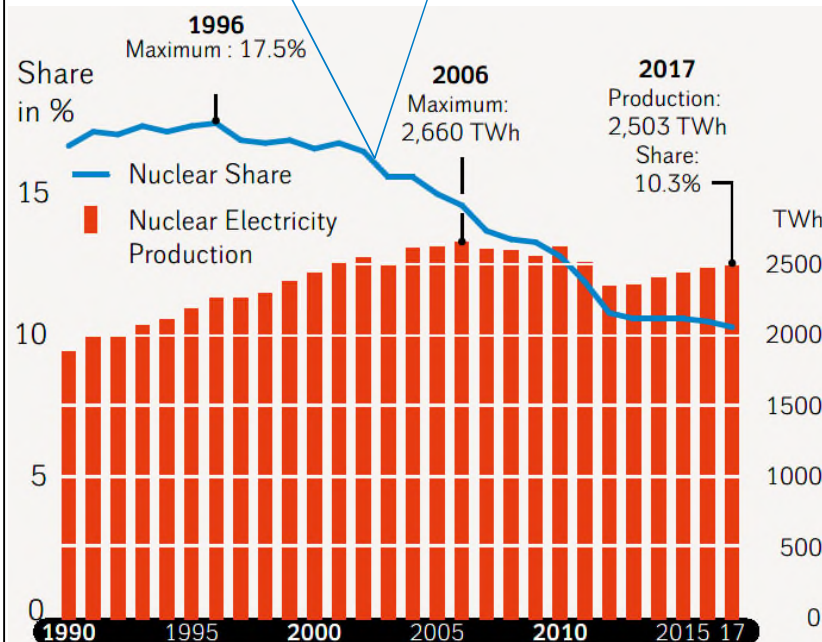


Éléments d'intuition (IV)

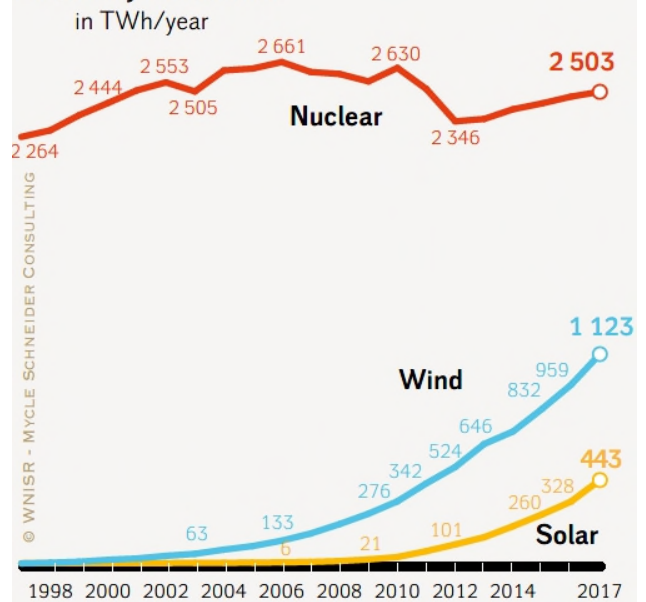
Énergie (GES) : la part du nucléaire, présente et future

- Monde (2017), nucléaire : 10 % de l'électricité, < 2 % E finale
- Durée de construction d'un réacteur : > 10 ans (WNA).
- Vu les coûts...

Industrie en déclin, faillites



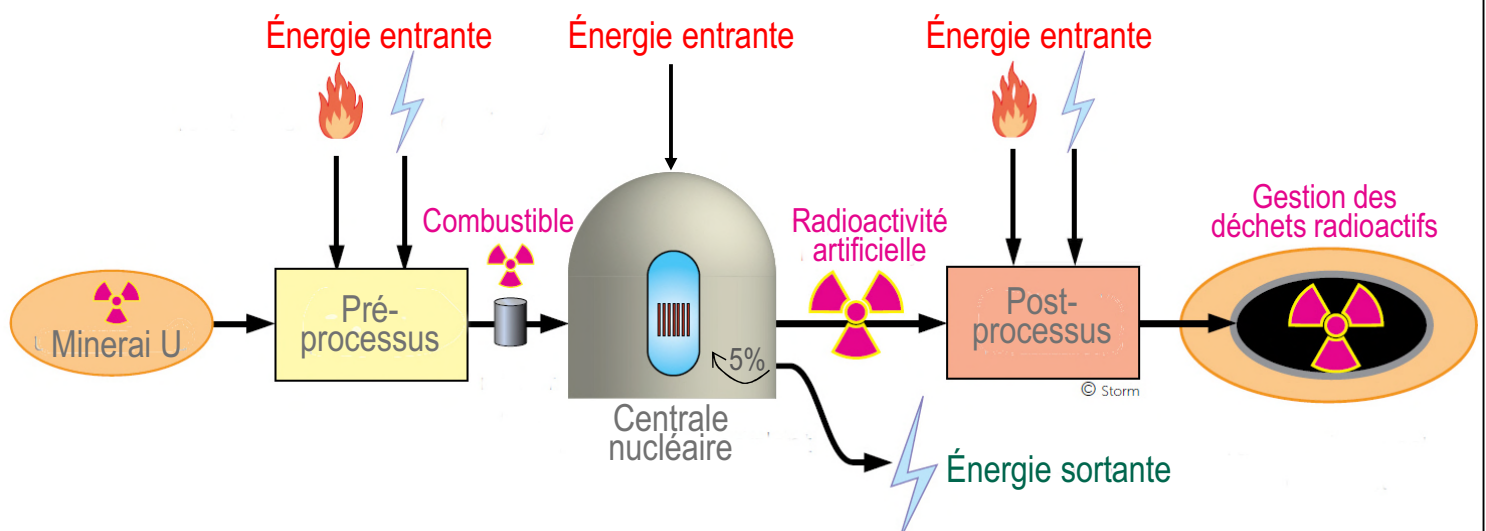
Electricity Production in TWh/year



Mycle Schneider, The World Nuclear Industry Status Report 2018



Chaîne des processus nucléaires, du minerai au déchet, durant 100 à 150 ans



1. Les pré-processus : extraction minerai U, broyage et concentration (yellow cake). Purification, enrichissement (U235 : 0,7→4-5 %) et fabrication du combustible.
2. Centrale : construction, maintenance, réparation et opération.
3. Nombreux post-processus (pas tous maîtrisés...) : démantèlement et nettoyage du site de la centrale et autres sites, refroidissement, traitement et conditionnement des déchets, construction des sites de stockage divers, stockage, réhabilitation des sites miniers...



Production de CO₂ au cours du CV (cycle de vie) du nucléaire

- Tous les processus produisent du CO₂,
seul le processus « opération » en produit relativement peu.
- Fortes incertitudes :
 - Les processus *déchets longue durée de vie* ne sont pas définis.
 - Extraction : teneur du minerai à 30-50 ans.
 - Pas de données publiées sur les autres GES que le CO₂.

Remarques

- Les filières des renouvelables :
 - Nécessitent bien moins de processus.
 - Tous les processus sont maîtrisés.
- Consommation de matériaux en g/kWh :
 - Nucléaire* : **200** – Minerai à 0,1%
 - Éolien : **6 (10)** – Terrestre (marin)

Rapport > 20 → idée du rapport des émissions de GES

* Plus de 90 % non recyclable du fait de la contamination radioactive.

...



Radioactivité artificielle et dette énergétique (GES) produites lors du CV

- Tous les processus libèrent de la radioactivité artificielle
dans l'environnement (sauf ceux de construction des sites).
 - Un réacteur d'1 GWe génère *chaque année* autant de
radioactivité que 1.000 bombes d'Hiroshima (6.000 b./an en Be).*
- Dit autrement : la filière nucléaire génère 1 milliard de fois la
radioactivité du combustible utilisé.*
- Émission retardée de GES liée aux déchets radioactifs
et à une *dette énergétique* (GES) difficile à quantifier,
peut-être de l'ordre de l'énergie nette produite par la filière
(pas de solution avérée pour les déchets de longue durée).



Bilan du CO₂ de la filière nucléaire

	Processus principaux	g CO ₂ /kWh	Totaux
1	Extraction, broyage*	8,4	
2	Autres pré-processus	6,2	14,6
3	Construction	23,2 ± 12	
4	Opération, etc.	24,4	47,6
5	Post-processus sauf 6 et 7	12,1	
6	Démantèlement	34,8 ± 17	
7	Réhabilitation des mines*	7,6	54,5
	Total	117 ± 29	

Hypothèses

- 25 ans à pleine puissance (plus que la moyenne actuelle)
- Teneur minéral U : 0,05 % (teneur actuelle moyenne)
- Pas d'autres GES que le CO₂

- 8 fois plus que l'éolien
- 3 fois plus que le PV

Jan Willem Storm van Leeuwen, *Climate change and nuclear power*, 2017



Facteurs aggravants

Autres GES que le CO₂, non pris en compte

- Pas de données disponibles
 - Mais les pré-processus font largement appel
 - au fluor (100 000 t/an)
 - au chlore (50 000 t/an)
- émission de GES à fort potentiel de réchauffement.

Qualité du minéral d'uranium

- Point d'équivalence au charbon (CO₂) : teneur de ± 0,02 %
- À quand ce point d'équivalence ?
 - Maintien de capacité actuelle du nucléaire (< 400 GWe) : 2070 ?
 - Doublement de la capacité actuelle : 2050 ?

Au vu des constats précédents et de ces facteurs aggravants, il est exclu que le nucléaire puisse jamais jouer un rôle dans la réduction des émissions des GES.



Valeurs moyennes en g CO₂e/kWh pour quelques filières énergétiques

Éolien	:	15	
Hydro	:	20	
PV	:	40	(± selon la technologie)
Géothermie	:	45	
Nucléaire	:	117	(et plus vu les inconnues et incertitudes)
Gaz naturel	:	650	(500)
Mazout	:	900	
Charbon	:	1000	

REMARQUES

- Domaine complexe :
 - Bilans matières.
 - Origine et mode de production de ces matières.
- Dispersion normale pour les renouvelables (soleil, vent).
- Plus simple pour les filières fossiles : énergie grise marginale.



Nucléaire et climat

I. Même avec des hypothèses basses, la filière du nucléaire produit largement plus de GES que les filières des énergies renouvelables.

II. La dette énergétique liée aux déchets radioactifs à longue durée de vie pourrait dépasser l'énergie nette jamais produite par la filière elle-même.

- De ce fait, mettrait le nucléaire au niveau du charbon en termes de GES.

III. Avec la diminution de la qualité du minerai d'uranium, l'extraction, le broyage et le raffinage produiront de plus en plus de GES :

- Dans quelques décennies, la quantité de GES émise par kWh nucléaire dépassera le niveau du kWh fossile.

**Le nucléaire n'est donc pas une « solution »
au réchauffement climatique.**



Faut-il arrêter le nucléaire ?

1. Technique contre nature

- Apparition et complexification de la vie avec la diminution de la radio-activité naturelle depuis des milliards d'années. Depuis 1945 : inversion.
- Menace contre le génome, de l'homme et des autres espèces.

2. Éthique

- Au profit de quelques uns aujourd'hui.
- Au dépens des autres et des milliers de générations à venir.

3. Industrie illégitime

Convention de Paris (1960) : opérateurs déresponsabilisés, risque « assumé » par la population.

4. Climat

Pas une « solution » mais un frein à la « transition » énergétique.

5. Tchernobyl sur Meuse demain ?

- « *Un accident nucléaire majeur ne peut être exclu nulle part* »
(PF Chevet, président de l'*Autorité de sûreté nucléaire*, Le Monde, 2016).
- Tchernobyl : 5 x Belgique : 80 % des enfants malades de la radioactivité.
 - Fukushima : 1 x Belgique fortement contaminée, 4/5 rejets en mer.
 - 1957 : Windscale et Mayak. 1979 : Three Mile Island.
 - Merci la chance : Blayais (1999), Forsmark (2006), etc.



Élections du 26 mai 2019 Fin du nucléaire ASBL

Questionnaire envoyé aux partis politiques de Belgique :

- Filière nucléaire.
- Avenir énergétique de la Belgique.
- TIAN.

Réponses des partis politiques et
l'analyse de l'ASBL *Fin du nucléaire* :
voir www.findunucleaire.be