

24. Énergies non renouvelables

24.5 – Nucléaire

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Tanguy Lunel, M.Ing.

Gaspard Julier, M.Ing.

Coralie Banon, M.Ing

Bastien Thomasset, M.Sc.A

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Principe et technologies
- Le nucléaire dans le monde
- Les risques du nucléaire
- Les réserves d'Uranium
- Nucléaire et opinion publique
- Fusion nucléaire
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Par définition, le nucléaire est l'étude des noyaux présents dans les atomes qui composent la matière.
- On parle couramment d'**énergie nucléaire** pour désigner l'énergie libérée lors de réactions nucléaires comme la fission ou la fusion, dans un réacteur ou pour une bombe atomique.

Introduction et objectifs

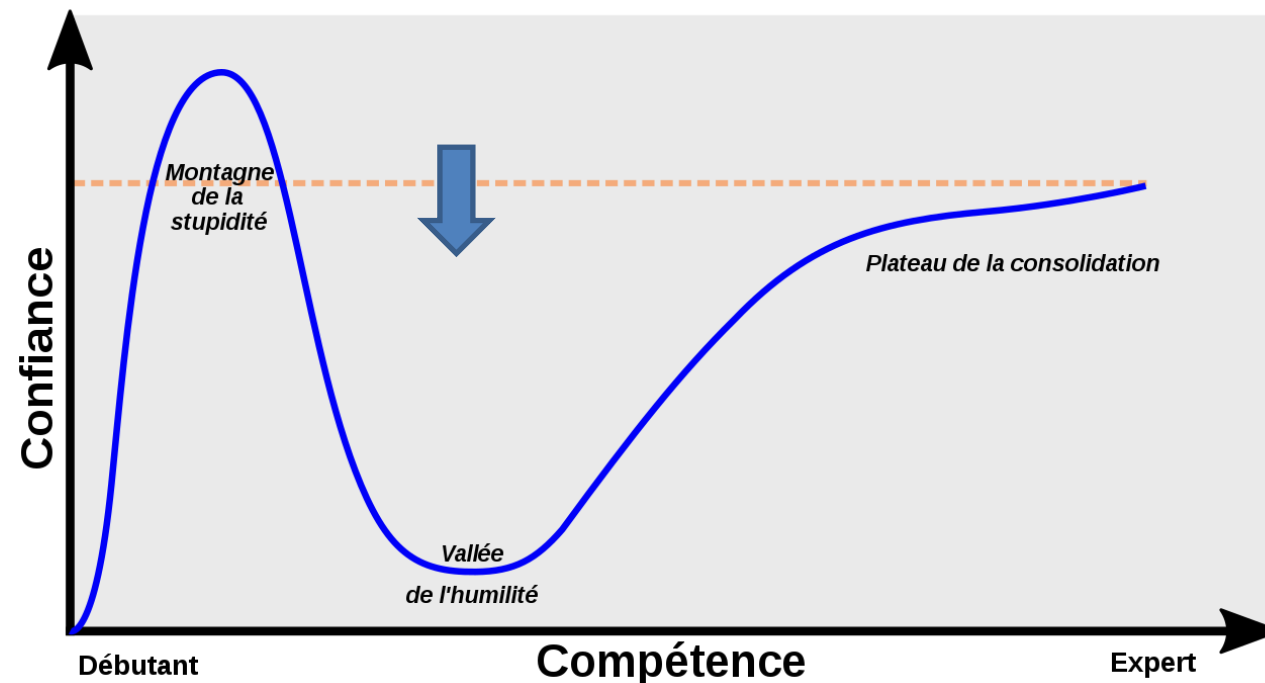
- Dans le cas d'un réacteur, cette énergie nucléaire (issue de la fission en très grande majorité) est transformée en électricité pour être utilisée.
- En 2019, l'énergie nucléaire représentait 10,4% de la production d'électricité mondiale, et environ 15% de la production d'électricité au Canada.
- Dans certains pays développés, le nucléaire représente une part très importante du mix électrique, comme en France où elle avoisine les 70%.

Introduction et objectifs

- Le nucléaire, en tant qu'énergie "verte", stable et avec une capacité de production élevée, se présente comme une solution possible pour freiner le réchauffement climatique.
- Cependant, le nucléaire présente aussi des inconvénients et, à l'heure où les pays doivent prendre de manière urgente des décisions énergétiques stratégiques pour l'avenir de la planète, le choix du nucléaire est source de débats et de controverses....

Introduction et objectifs

- Cette présentation ne fera pas de vous un expert du nucléaire, mais a pour but d'essayer de vous faire passer de l'autre côté du « mont stupide » (cf. effet Dunning-Kruger)



Introduction et objectifs

Activité débat :

Faut-il conserver, agrandir ou diminuer le parc nucléaire ?

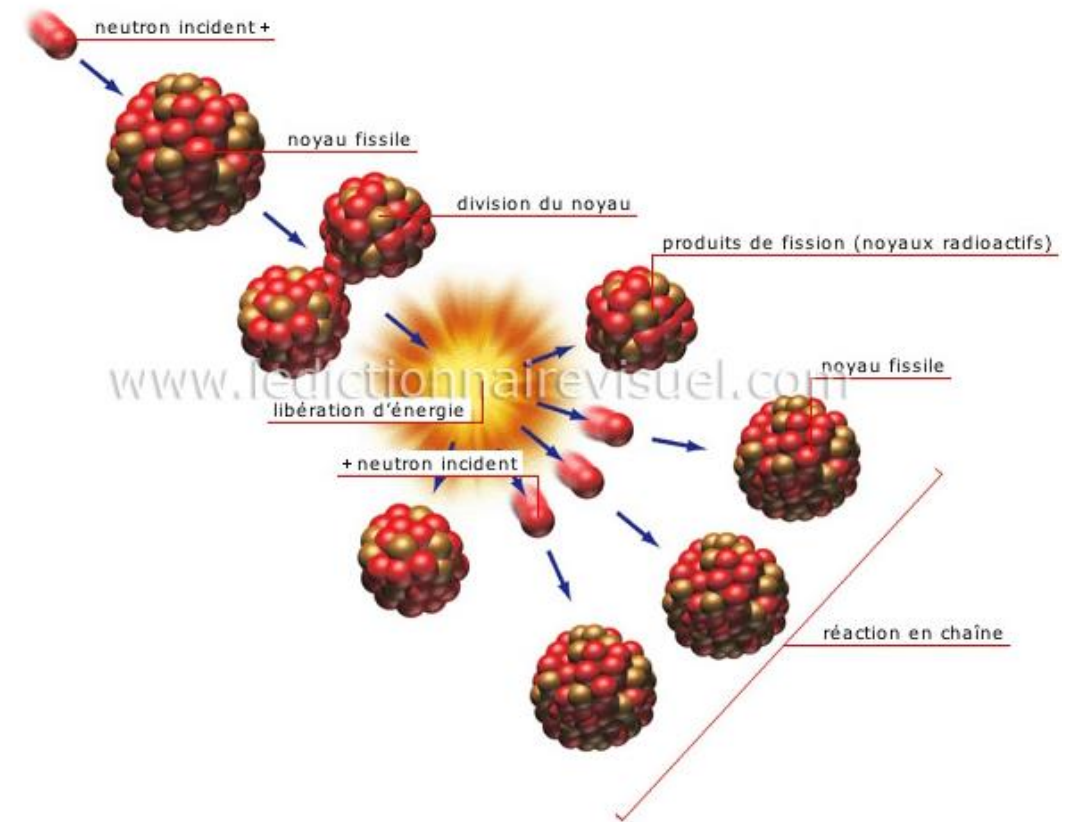
- Une liste d'avantages
- Une liste d'inconvénients
- Une liste pour les points ambigus

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- ***Principe et technologies***
- Le nucléaire dans le monde
- Les risques du nucléaire
- Les réserves d'Uranium
- Nucléaire et opinion publique
- Fusion nucléaire
- Conclusion

Principe et technologies

- Fission nucléaire :
 - Désintégration d'un atome lourd radioactif en d'autres atomes plus légers.
 - Fission déclenchée par un neutron provenant lui-même d'une autre fission
 - Réaction en chaîne.
 - Dégagement de chaleur important, et ce sans émission de CO₂.



Dans cette schématisation : $R = 3$

Principe et technologies

- Empreinte carbone sur l'ensemble du cycle de vie :

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	n. a. ⁱⁱ	–	–	–	620/740/890 ⁱⁱⁱ
Biomass—dedicated	n. a. ⁱⁱ	210	27	0	130/230/420 ^{iv}
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

Annexe III du rapport du GIEC, 2014

Nucléaire :
12g CO₂ eq./kWh

Le nucléaire n'émet pas directement de CO₂ mais les émissions relatives à la construction, démantèlement, extraction du combustible... sont tout de même à considérer.

Principe et technologies

- Densité énergétique :

Nucléaire VS Pétrole

Quel est le rapport de densité énergétique entre nucléaire et pétrole ?

- a) 100 - 160
- b) 1000 - 1600
- c) 10 000 – 16 000
- d) 100 000 – 160 000

Principe et technologies

- Densité énergétique :

Réponse d) 100 000 – 160 000

Uranium enrichi	Pétrole
660 – 1100 MWh/kg	6,6 kWh/kg
1 kg	23 tonnes

Uranium 235 pur : 22 GWh/kg

Principe et technologies

- La famille Uranium :

Qu'est-ce que l'Uranium enrichi ?

Principe et technologies

Qu'est-ce que l'Uranium enrichi ?

Uranium naturel : U238 (99,3%) + U235 (0,7%)

Uranium enrichi : U238 (96,5%) + U235 (3,5%)

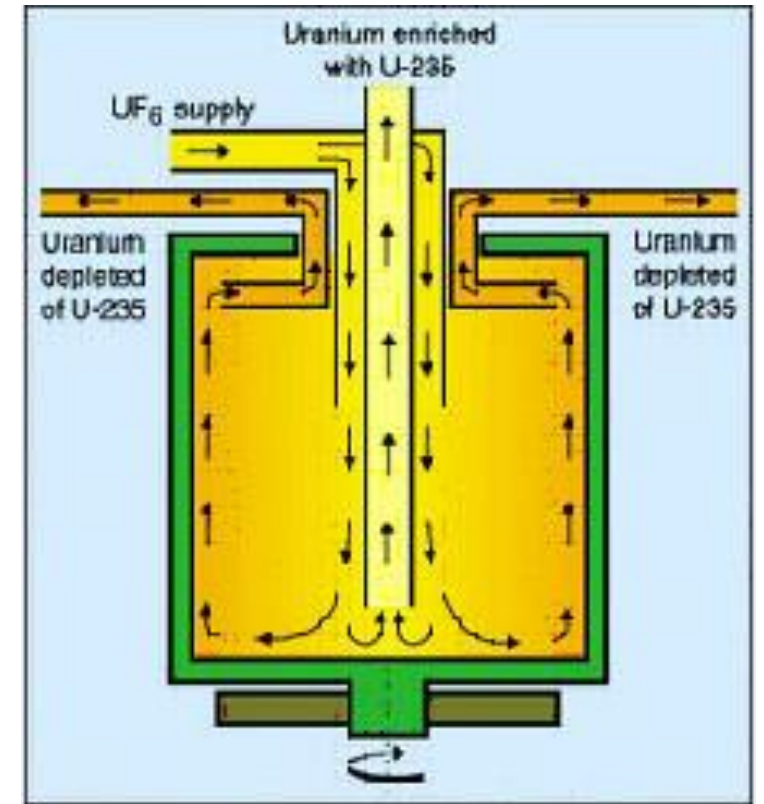
U235 et U238 sont des isotopes -> ils ont le même numéro atomique (Z=43) mais une masse atomique différente (235 et 238)

L'U238 est non-fissile, dans un réacteur ce sont les atomes d'U235 qui vont réagir !

Principe et technologies

Comment on enrichit l'Uranium ?

- Le mélange d'U235 et U238 est introduit sous forme gazeuse dans la centrifugeuse. La force centrifuge va les séparer, l'U238 (plus lourd) va se retrouver vers l'extérieur.
- Le mélange de plus en plus enrichi en U235 va passer dans plusieurs dizaines de centrifugeuses à la suite.
- Vidéo assez claire de l'Agence France Presse -> https://www.youtube.com/watch?v=k_72UkmTTX0



*Plan coupe d'une centrifugeuse
IEER*

Principe et technologies

- Comparaison du prix :

Uranium naturel VS Charbon

- Uranium naturel :

- 1 kg de minerai \sim 130 USD (04/2022) - vendu sous la forme de U₃O₈ plus exactement
- 1 MWh d'uranium naturel \Rightarrow 6,5g \Rightarrow 0,85 USD /MWh

- Charbon

- 1 tonne de charbon \sim 300 USD (04/2022)
- 1 MWh de charbon \Rightarrow 150kg \Rightarrow 45 USD/MWh

Principe et technologies

- Le réacteur nucléaire

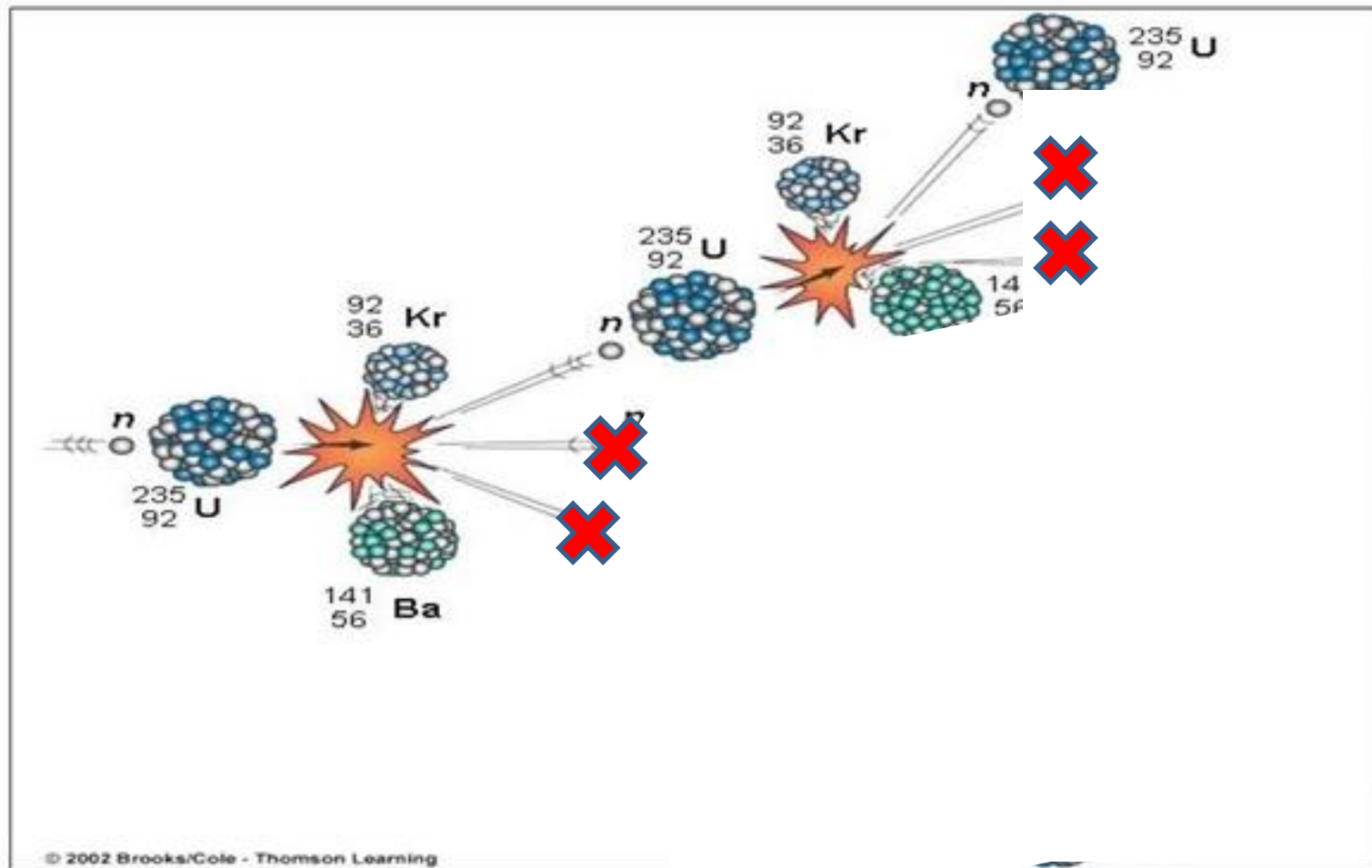
Objectifs :

- Stabiliser la réaction
- Récupérer l'énergie thermique du cœur
- Transformer cette énergie thermique en électricité par l'intermédiaire de plusieurs circuits de fluide et de générateurs

Les types de réacteurs sont classifiés en génération selon les époques.

Principe et technologies

- Stabilisation de la réaction en chaîne :



La fission d'un atome de U-235 émet en moyenne 2,43 neutrons.

Le nombre de fissions doit rester constant pour contrôler la réaction.

Une fission doit donc provoquer exactement une seule autre fission

Principe et technologies

- Techniques de stabilisation :
 - Poisons neutroniques (Bore...)
 - Barres de contrôles neutroniques
 - Cependant ces systèmes n'ont pas toujours permis d'éviter les accidents (Tchernobyl, Fukushima, Three mile island)

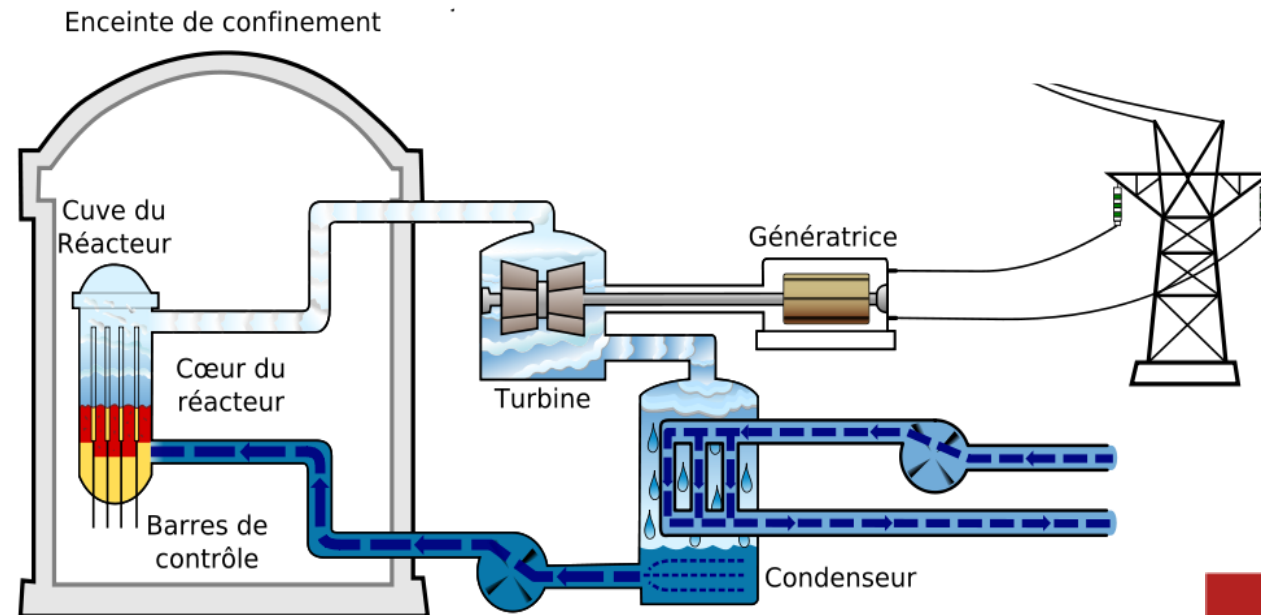


barres de contrôles neutroniques - irsn.fr

Plus de détails : <https://www.laradioactivite.com/site/pages/lesgrappesdecontrole.htm>

Principe et technologies

- Circuit de chaleur :
 - C'est là que différents nombres de technologies, les deux principales sont les REB et les REP
 - Réacteur à eau bouillante – REB (BWR en anglais). Représente environ 22% des réacteurs en fonctionnement

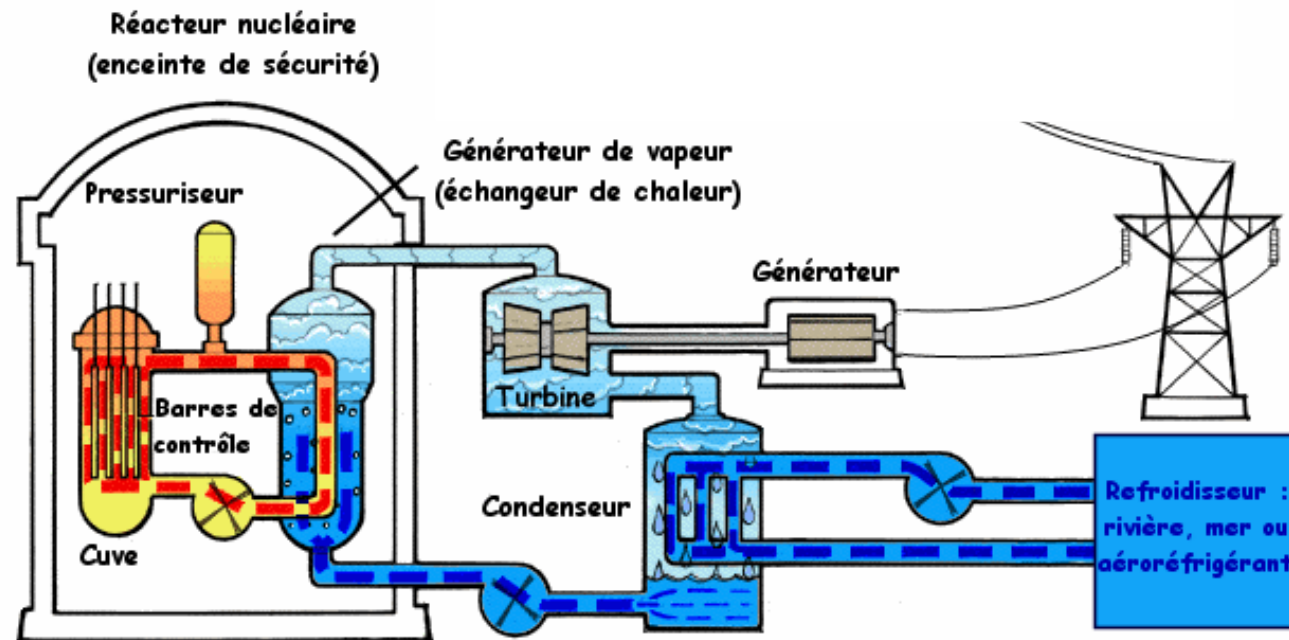


Principe et technologies

- Circuit de chaleur :
 - REB :
 - A la sortie du réacteur une partie de l'eau est sous forme de vapeur (même si elle est à haute pression ~ 70 bar)
 - L'eau qui passe dans le réacteur est la même qui alimente la turbine

Principe et technologies

- Circuit de chaleur :
 - Réacteur à eau pressurisé – REP (PWR en anglais). Représente environ 55% des réacteurs en fonctionnement en 2020



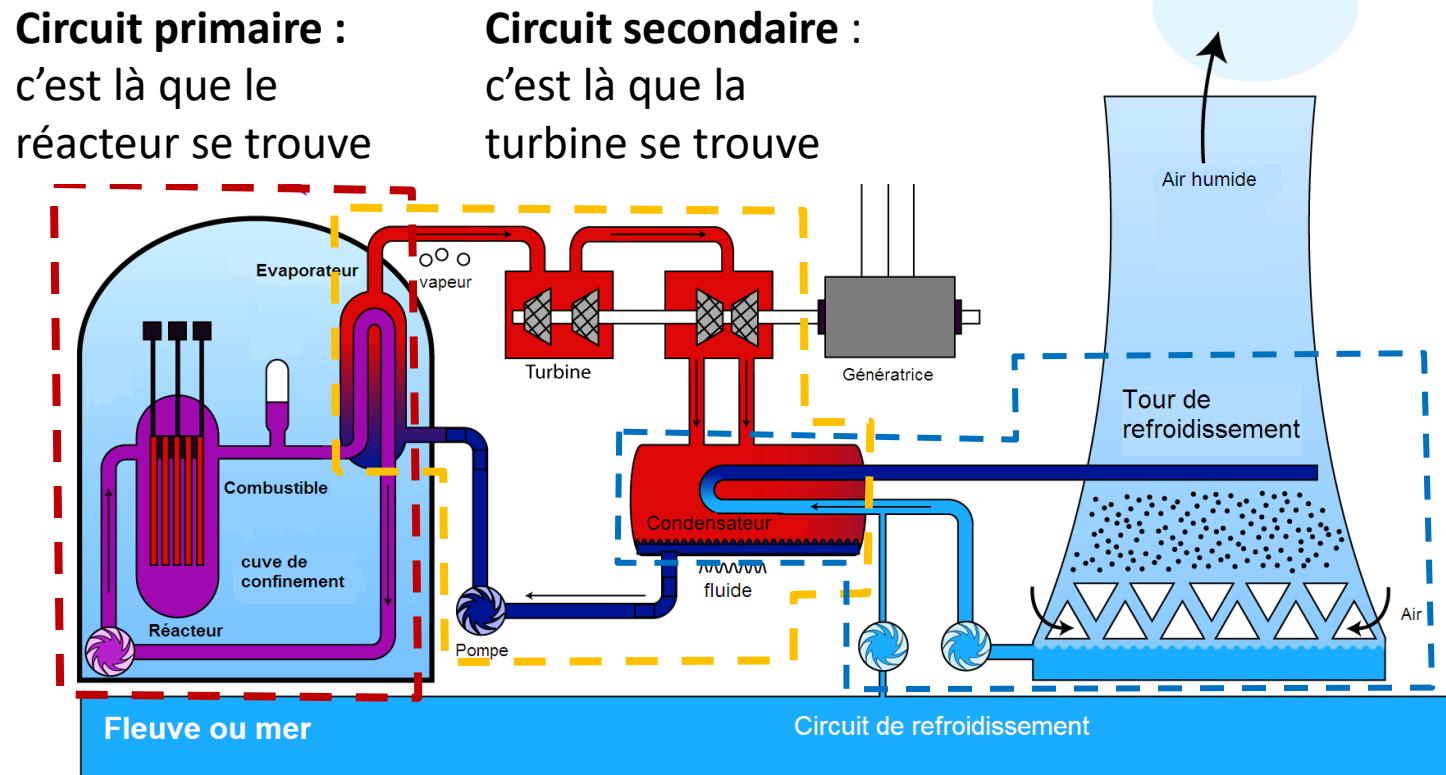
Principe et technologies

- Circuit de chaleur :
 - REP :
 - A la sortie du réacteur la température de l'eau est typiquement au-dessus de 300°C, pour éviter que l'eau ne devienne vapeur à cette température il faut donc la pressuriser, typiquement à plus de 150 bars.
 - Il faut dès lors nécessairement cantonner la haute pression à une partie de la centrale pour éviter de subir ses contraintes sur tous les éléments. Pour cela trois circuits distincts sont utilisés.
 - Ces circuits séparés permettent également de rajouter une sécurité pour éviter le relâchement de radionucléides dans l'environnement.

Principe et technologies

- Circuit de chaleur :
 - L'ensemble constitue ce qu'on appelle une tranche

Cas du REP



Circuit tertiaire - peut être :

- ouvert (à tour de refroidissement), il consomme alors de l'eau,
- fermé, il ne fait que prélever de l'eau (mais réchauffe alors le cours d'eau)

Principe et technologies

- Les SMR (Small Modular Reactors) :
 - Réacteurs à petite puissance, modulables et peu coûteux
 - Très variés et adaptables en termes de :
 - Taille et capacité (10 MW à des centaines de MW)
 - Options technologiques (REP, REB, eau légère ou non légère, gaz, métal liquide, sel fondu, ...)
 - Utilisation (production d'électricité, chaleur industrielle, chauffage urbain, désalinisation d'eau de mer, production d'hydrogène, propulsion navale, ...)
 - En plein essor depuis quelques années, beaucoup d'investissements privés en R&D

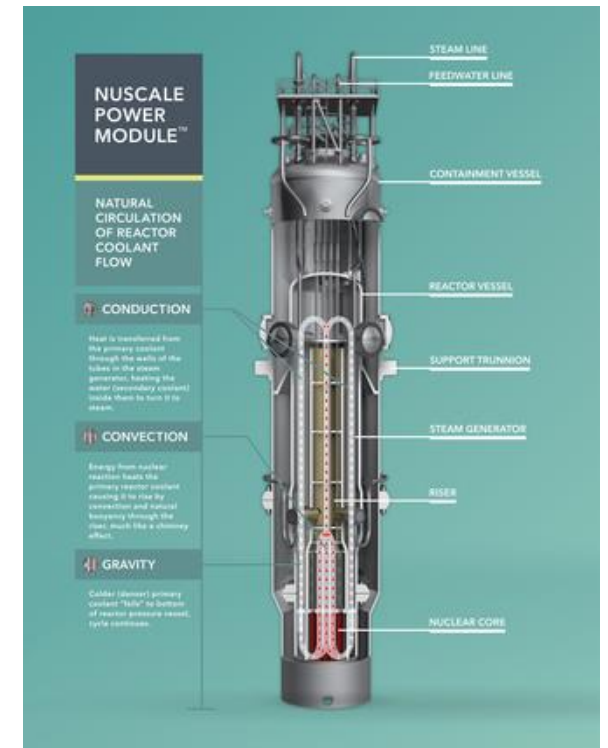


Diagramme du réacteur de la société NuScale
Source : NuScale

Principe et technologies

- Les SMR (Small Modular Reactors) :
 - Réacteurs embarqués dans les navires :
 - Jusqu'à 550 MW
 - Combustible enrichi jusqu'à 96% en U-235 !!!
 - La vapeur produite peut entraîner directement l'arbre relié à l'hélice



Sous-marin à propulsion nucléaire



Brise-glace à propulsion nucléaire

Principe et technologies

- Les SMR (Small Modular Reactors) :
 - En raison de leur taille, insertion simplifiée pour remplacer des centrales à charbon (souvent de taille modérée) dans des friches industrielles
 - Simplification du design et standardisation de la fabrication = conception plus simple et production moins coûteuse et plus rapide



CANDU SMR (Candu Energy Inc, Canada)
Source : IAEA, 2020

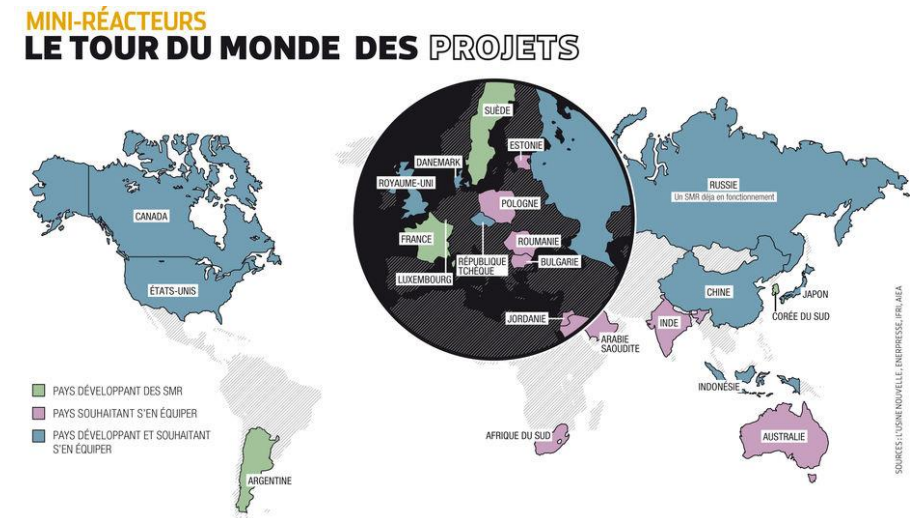
Principe et technologies

- Les SMR (Small Modular Reactors) :
 - Les SMR doivent respecter les standards de sûreté nucléaire les plus récents
 - La simplification du design permet des contrôles et maintenances simplifiés
 - La modularité permet une fabrication plus normée et donc plus sûre
 - En cas d'accident, moins de puissance résiduelle à évacuer et moins de dégâts



Principe et technologies

- Les SMR (Small Modular Reactors) :
 - Selon l'agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE, certains modèles pourraient être disponibles sur le marché mondial autour de 2030 et couvrir jusqu'à 10% de la production nucléaire dans le monde d'ici 2040
 - Ils pourront permettre de couvrir les besoins de régions isolées ou des pays n'ayant pas les ressources financières pour construire des gros réacteurs
 - Une solution possible pour atteindre le "zéro carbone" ?



La carte du monde des projets de mini-réacteurs nucléaires

Source : L'Usine Nouvelle, 2021

Principe et technologies

- Les réacteurs :
 - Un réacteur a une puissance généralement comprise entre 900 MW et 1500 MW pour un facteur de charge compris entre 75 et 90%
 - Rendement de conversion électrique typique d'environ 30%
 - L'utilisation des 70% restant peut se faire grâce à la cogénération. C'est le cas dans un peu plus que 70 réacteurs, majoritairement situés en Europe de l'Est, et où la chaleur est réutilisée dans des réseaux de chauffage urbain ou par des industries.
 - Potentiel de décarbonation du chauffage

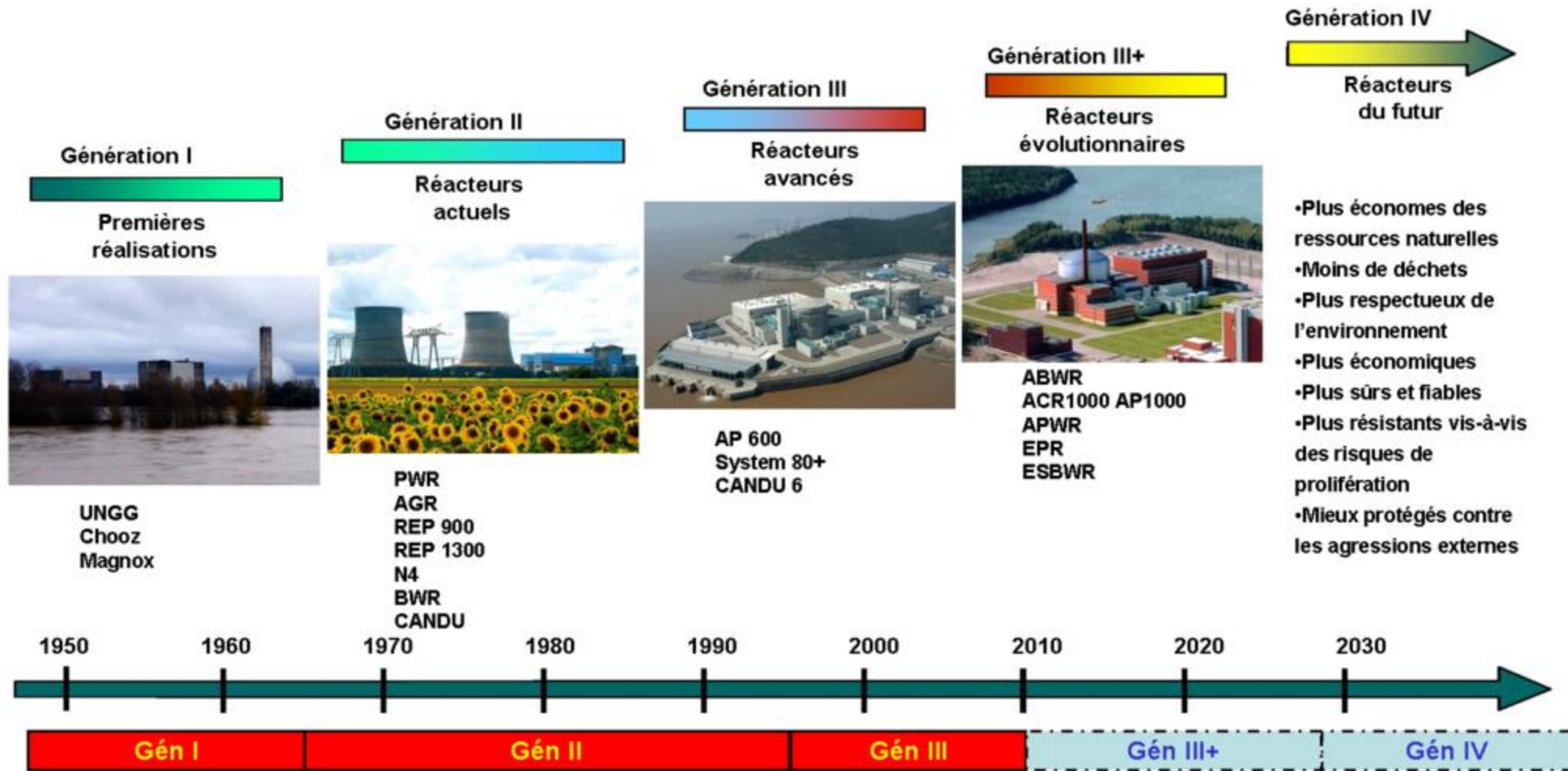
Principe et technologies

- Que pensez-vous de la cogénération de chaleur à partir des centrales nucléaires?

Principe et technologies

- Les générations de nucléaires :
 - Génération I :
 - 1950 - 1970, uranium non-enrichi et eau lourde.
Ex: Fukushima au Japon
 - Génération II :
 - 1970 - 2010, 85% de la production nucléaire électrique mondiale.
Ex: Gentilly II 1983-2013, CANDU
 - Génération III :
 - 1990 - ... : Des générations II plus sécurisés tels les EPR.
 - Génération IV :
 - Concepts, neutrons rapides, très haute température, à U-238 ou à thorium, ...
 - Promettent des perspectives intéressantes pour le problème des déchets ou de la raréfaction de la ressource
 - Incertitudes autour de leur développement

Principe et technologies

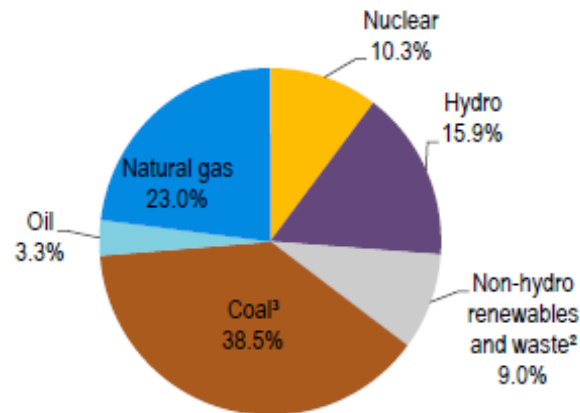


Plan de la présentation

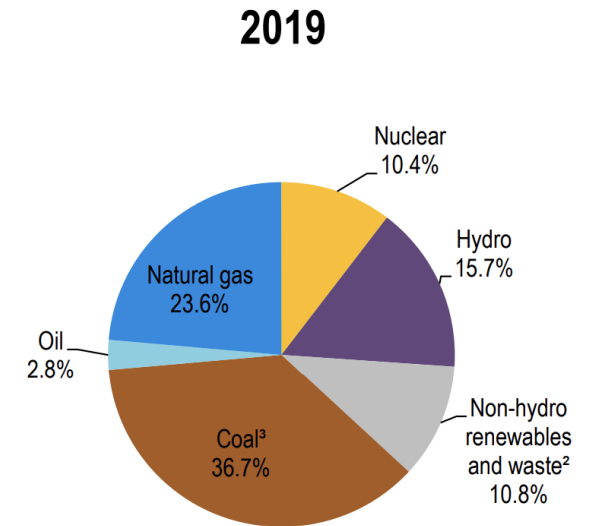
- Introduction et objectifs
- Principe et technologies
- ***Le nucléaire dans le monde***
- Les risques du nucléaire
- Les réserves d'Uranium
- Nucléaire et opinion publique
- Fusion nucléaire
- Conclusion

Le nucléaire dans le monde

- Quelques chiffres importants (2018):
 - 452 réacteurs
 - 28 pays
 - 10% de la génération électrique



25 606 TWh



26 936 TWh

Part des sources de production d'électricité dans le monde en 2017 (à gauche) et 2019 (en haut)

« IEA – Key World Energy Stats 2019/2021 »

Le nucléaire dans le monde

Les pays avec > 10 réacteurs

Rang en nb	Pays	Nb centrales ⁷⁹	Nb réacteurs
1	États-Unis	61 ⁸⁰	99
2	France	19	58
3	Chine	9	42
3	Japon	16	42
5	Russie	10	37
6	Corée du Sud	4	24
7	Inde	7	22
8	Canada	4	19
9	Royaume-Uni	6	15
9	Ukraine	4	15

Tiré de wikipédia

Producers	TWh	% of world total
United States	822	33.2
France	424	17.1
Russian Federation	173	7.0
Korea	139	5.6
People's Rep. of China	112	4.5
Canada	103	4.2
Germany	97	3.9
Ukraine	83	3.3
United Kingdom	71	2.9
Sweden	66	2.7
Rest of the world	388	15.6
World	2 478	100.0

2013 data

1. Excludes countries with no nuclear production.

Net installed capacity	GW
United States	99
France	63
Japan	42
Russian Federation	24
Korea	21
People's Rep. of China	16
Canada	14
Ukraine	13
Germany	12
Sweden	9
Rest of the world	59
World	372

2013 data

Sources: IEA, International Atomic Energy Agency.

Country (top-ten producers)	% of nuclear in total domestic electricity generation
France	74.7
Sweden	43.4
Ukraine	43.0
Korea	25.8
United Kingdom	19.8
United States	19.2
Russian Federation	16.3
Canada	15.8
Germany	15.5
People's Rep. of China	2.1
Rest of the world ¹	7.9
World	10.6

2013 data

Le nucléaire dans le monde

- Évolution dans le temps et perspectives

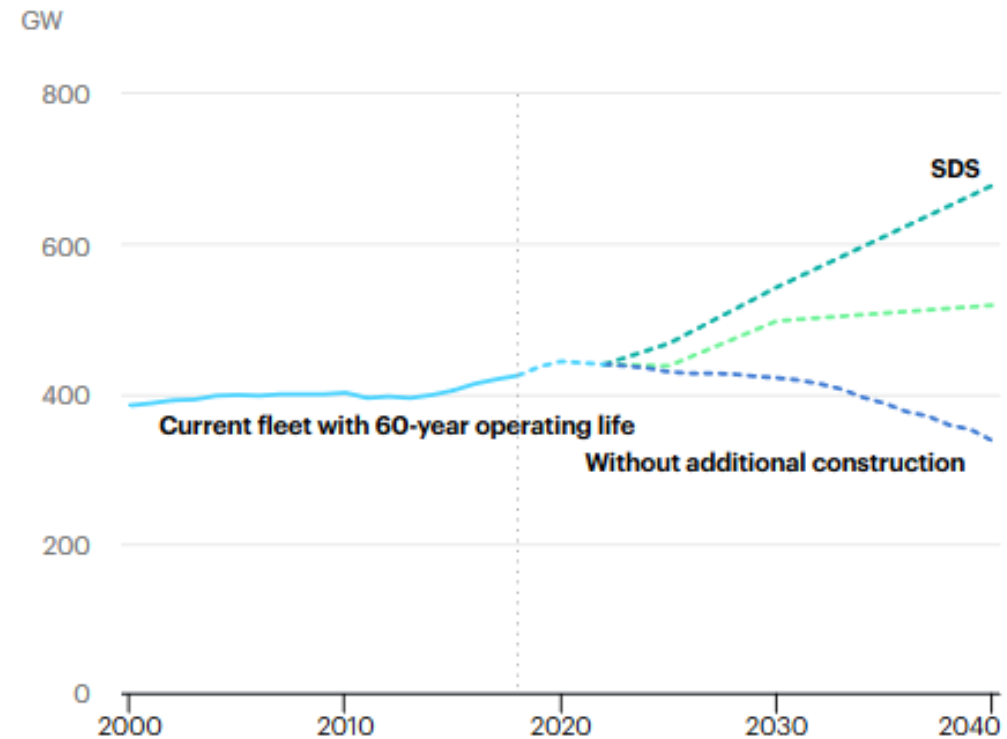
Quel futur pour le nucléaire ?

- A) Augmentation
- B) Constance
- C) Diminution
- D) Dépend des scénarios

Le nucléaire dans le monde

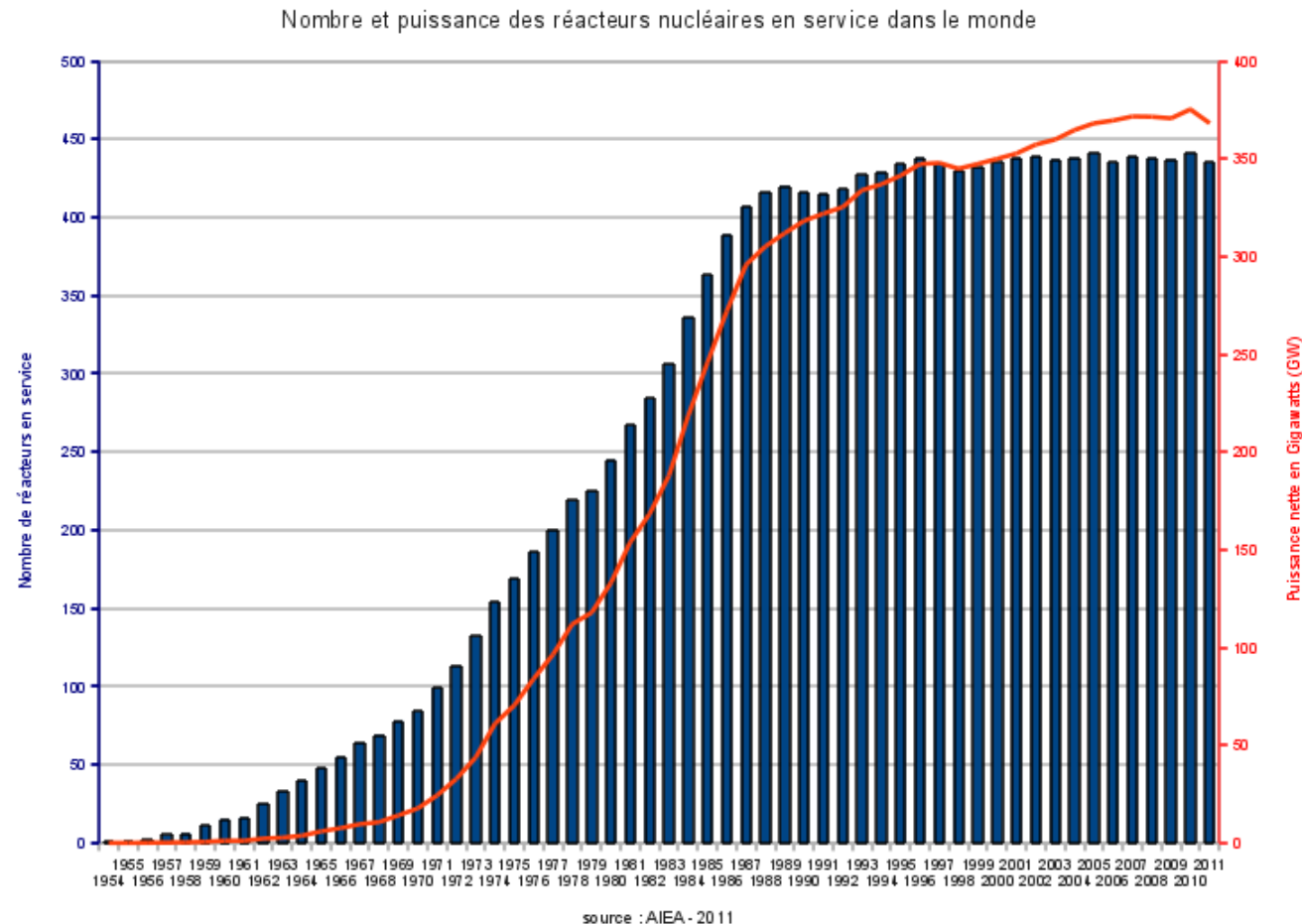
- Évolution dans le temps et perspectives
 - Avenir incertain pour la filière :

Global nuclear capacity by scenario, 2000-2040,
IEA Tracking Clean Energy Progress



Le nucléaire dans le monde

- Évolution dans le temps et perspectives



Le nucléaire dans le monde

Évolution dans le temps et perspectives

La puissance et l'âge des parcs nucléaires

	Allemagne	Suisse	Japon	Royaume-Uni	France
Capacité installée	20,34 GW 17 réacteurs	3,25 GW 5 réacteurs	44,64 GW 51 réacteurs	10,75 GW 18 réacteurs	63,13 GW 58 réacteurs
Part dans la production d'électricité (en 2010)	28,4%	38 %	29,2 %	15,7 %	74,1 %
Age moyen des centrales	28 ans	37 ans	25 ans	29 ans	25 ans
Sortie du nucléaire	2022	Sortie progressive entre 2019 et 2034	En discussion	Non envisagée à l'heure actuelle	Non envisagée à l'heure actuelle

Sources : World Nuclear Association, "Courrier international"

Source: CI, no 1082, août 2011 (World Nuclear Association)

Source d'information sur le sujet <http://www.world-nuclear.org/>

Le nucléaire dans le monde

- Au Canada :

Technologies

- Uniquement des réacteurs à eau lourde pressurisée – technologie peu répandue autre part
- 19 réacteurs en fonctionnement :
 - 18 en Ontario
 - 1 au Nouveau-Brunswick

Le nucléaire dans le monde

- Au Canada :

Extraction

- 2^{ème} producteur d'Uranium dans le monde.
- 20% de la production mondiale d'Uranium est extraite en Saskatchewan
- Principal employeur privé d'Autochtones
- 87% sont exportés à travers le monde

Le nucléaire dans le monde

- Au Canada :

Économie

- Contribue à hauteur de 6 milliards de dollars à l'économie canadienne

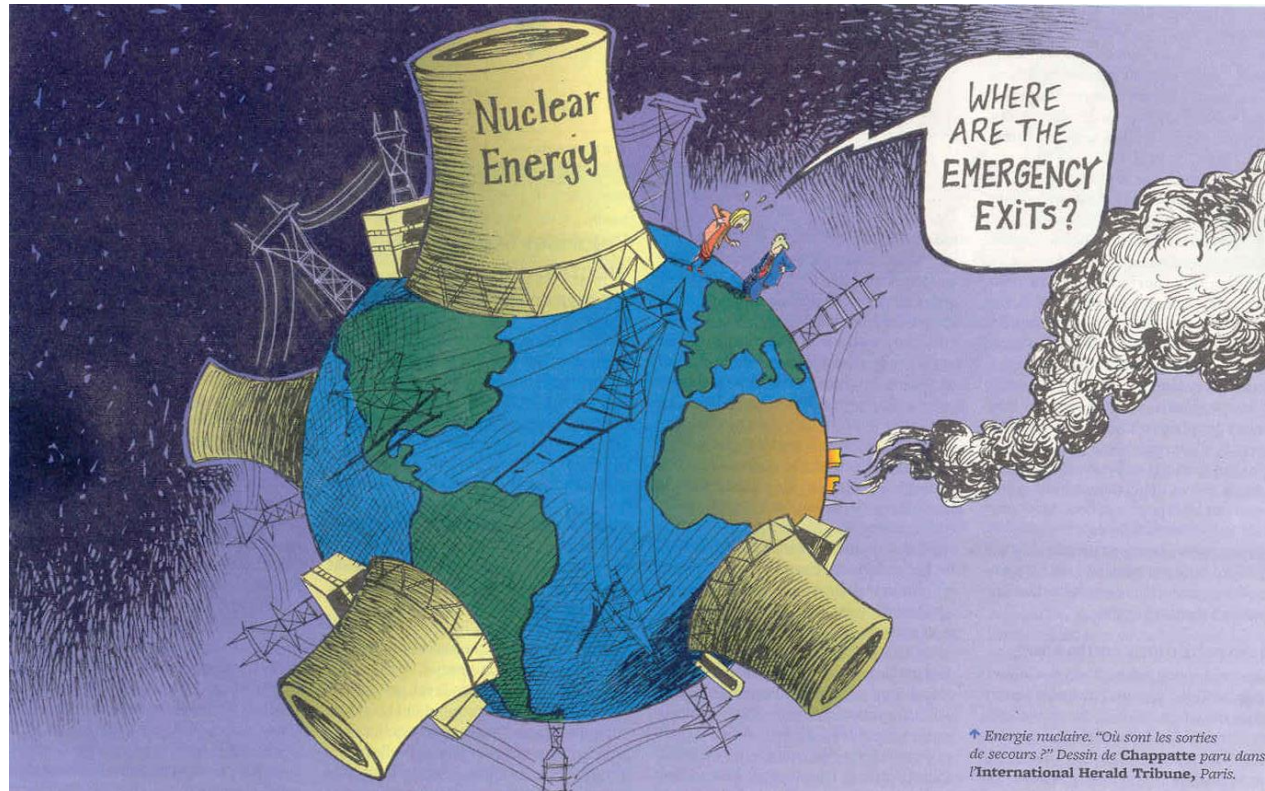
- Génère 60 000 emplois :
 - 30 000 directs
 - 30 000 indirects

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Principe et technologies
- Le nucléaire dans le monde
- ***Les risques du nucléaire***
- Les réserves d'Uranium
- Nucléaire et opinion publique
- Fusion nucléaire
- Conclusion

Les risques du nucléaire

- Quels risques fait peser l'électro-nucléaire?
 - ...

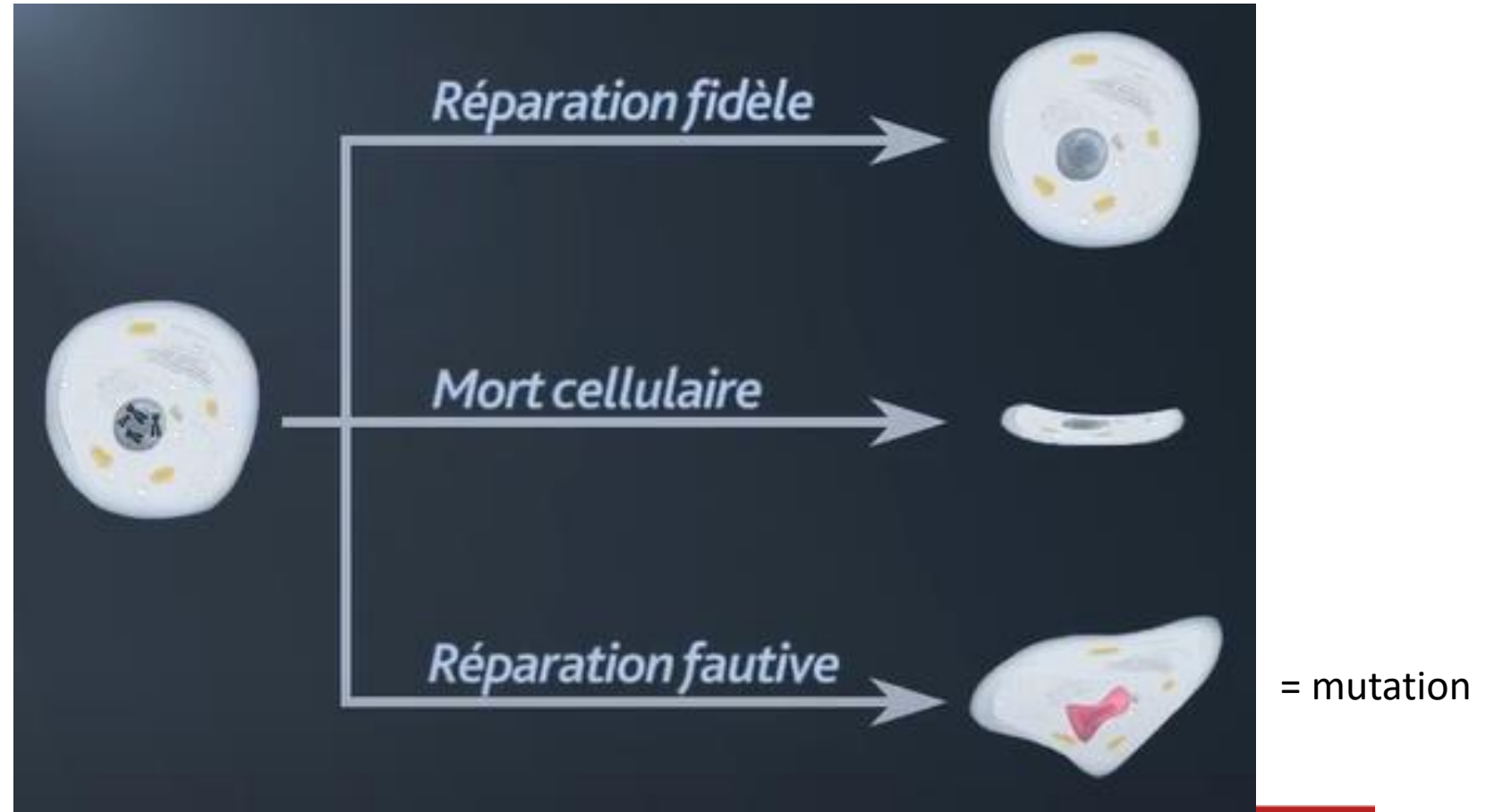


Les risques du nucléaire

- Les effets de la radioactivité

Réactions possibles d'une cellule suite à l'exposition aux radiations :

L'énergie des radiations est déposée au cœur des cellules et endommage l'ADN.



Les risques du nucléaire

- Les effets de la radioactivité

- Plusieurs unités :

- Becquerel (Bq) - mesure de la radioactivité : nombre de désintégrations par unité de temps
 - Gray (Gy) - dose absorbée (1 J/kg)
 - milliSievert (mSv) – mesure de la dose radioactive, prend en compte l'énergie absorbée par unité de masse et selon le tissu atteint.

Analogie du pommier (voir lien) :

<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactivite/essentiel-sur-grandeur-unites-radioactivite.aspx>



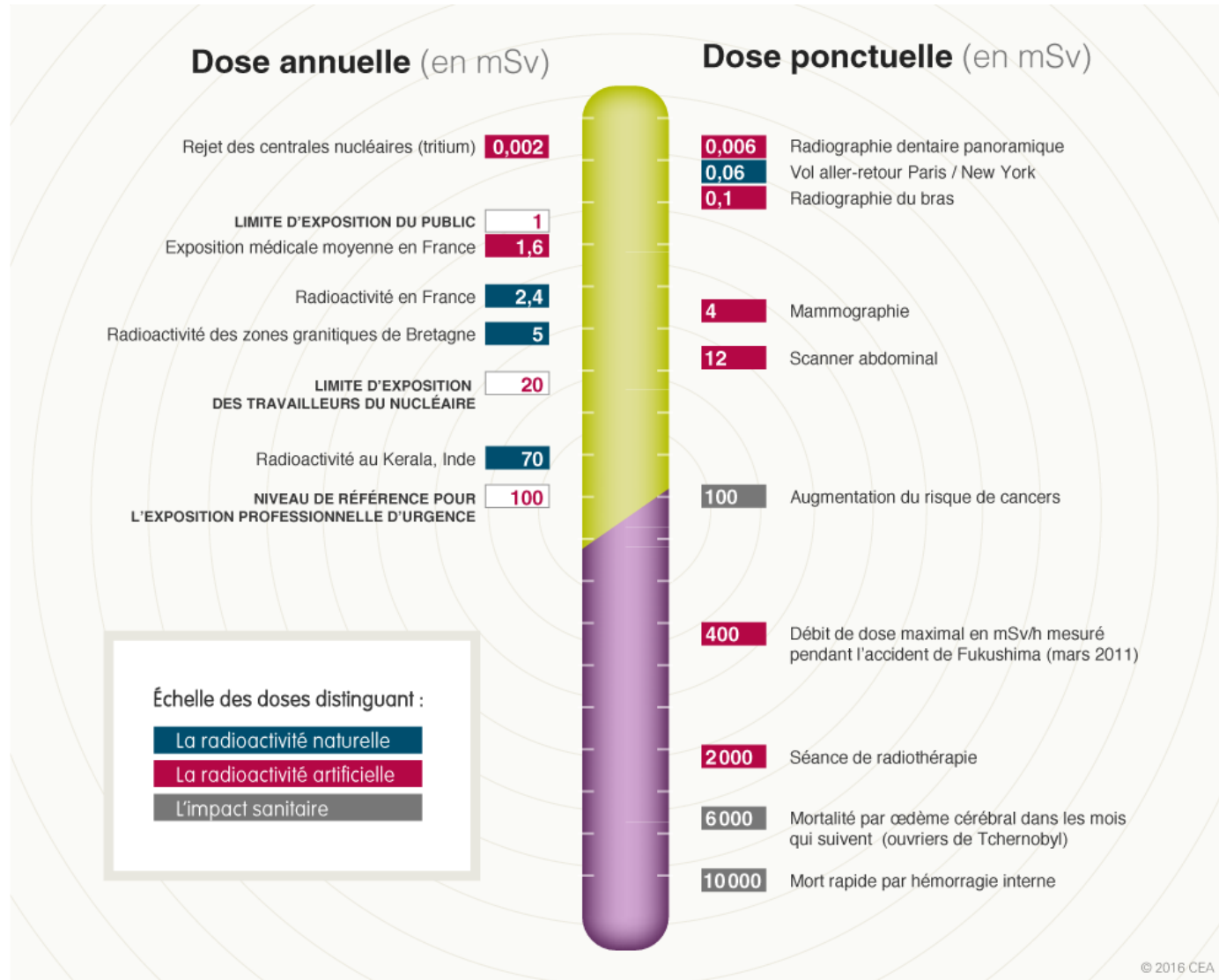
Les risques du nucléaire

- Les effets de la radioactivité
 - La radioactivité naturelle est présente en permanence dans notre environnement
 - › Lait : 50 à 80 Bq/L
 - › Viande : 90 Bq/kg
 - › Pommes de terre : 100 à 150 Bq/kg
 - › Terre de jardin : 1 000 Bq/kg
 - › Sol granitique : 8 000 Bq/kg
 - › Eau de mer : 10 Bq/L

Les risques du nucléaire

- Les effets de la radioactivité
 - 2 catégories d'effets sur la santé :
 - effets déterministes (tous les sujets sont atteints si le seuil d'exposition est atteint) : cataractes, stérilités, nécroses...
 - effets aléatoires (causés par les mutations à long-terme): augmentation du risque de maladies (cancers principalement)

Les risques du nucléaire



Accidents nucléaires

- Tchernobyl – 1986 :
 - En URSS, à la limite entre l'actuelle Ukraine et la Biélorussie.
 - Réacteur de type RBMK, sans enceinte de confinement.
 - Visiblement, il y aurait eu diverses erreurs humaines et surtout un problème de sécurité dans la gestion de la centrale.



Accidents nucléaires

- Tchernobyl – 1986 :
 - D’après un résumé de l’OMS (se basant sur les travaux de l’UNSCEAR), il y a eu 28 morts dus à une irradiation sévère et 4000 cancers (majoritairement soignés). D’après les modèles utilisés, un maximum de 5000 à 10 000 morts sont attendus en 2065. La plus haute estimation publiée dans une revue scientifique fait état d’un total de 20 000 morts pour 2065.
 - https://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/background/en/
 - Les estimations de Greenpeace font état de 270 000 cancers et 93 000 morts associés, mais ne se reposent sur quasiment aucune étude scientifique revue par les pairs.
 - « the chernobyl consequences on human health », 2006, Greenpeace

Accidents nucléaires

- Tchernobyl – 1986 :
 - Les conséquences économiques (pertes de terres agricoles), les déplacements de 250 000 personnes, la détresse et le stress des populations (augmentation de la consommation d'alcool et de tabac entre autres) sont des conséquences bien réelles à ne pas oublier.
 - Les conséquences écologiques sont sujettes à débat. Des chercheurs ont avancé que les effets néfastes de la radioactivité ont été très largement contrebalancés par le départ de l'homme de la zone d'exclusion nucléaire depuis.



5000km² aujourd'hui fermé – 10 fois l'île de Montréal



Accidents nucléaires

- Fukushima - 2011:
 - Autre catastrophe de niveau 7
 - Au Japon, après un séisme de magnitude 9 et un tsunami de 15 m.
 - 3 réacteurs REB dont le cœur fond
 - « Le déroulement de l'accident de Fukushima Daiichi », IRSN :
<https://www.youtube.com/watch?v=gF19Ukb4S-I>



Accidents nucléaires

- Fukushima - 2011 :
 - Conséquences sanitaires
 - Selon l'UNSCEAR, il est peu probable qu'il y ait des morts dus à la radioactivité dans le cas de Fukushima. Les conséquences sur l'environnement sont également jugées temporaires et peu sévères.
 - <https://www.unscear.org/unscear/fr/fukushima.html>
 - Version courte : Fact sheet on UNSCEAR 2013 Report (4p, disponible en Français)
 - Néanmoins, les autorités japonaises n'hésitent pas à dédommager les travailleurs qui ont eu des cancers depuis en les reconnaissant comme victime de l'irradiation (5 cas), et ce malgré la faible probabilité statistique que cela ait été causé par les radiations auxquelles ils ont été exposés.
 - Certains avancent que la mauvaise perception du vrai risque nucléaire et la mauvaise gestion des populations, a beaucoup plus tué (estimation à 2000 morts)
 - <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/actualites/eclairage/fukushuma-iitate-impossible-retour>

Accidents nucléaires

- Fukushima - 2011 :
 - Conséquences environnementales
 - En 2020, on se demandait comment, neuf ans plus tard, se débarrasser de plus d'un million de mètres cubes d'eau contaminée par des substances radioactives ? La réponse n'est pas simple. C'est le problème auquel fait face le Japon, qui a annoncé son intention de « relâcher » dans le Pacifique l'eau contaminée qui s'accumule à la centrale de Fukushima.
 - https://plus.lapresse.ca/screens/122479d3-44ef-4d02-859f-0b483a3cf5a3__7C__0.html?utm_content=email&utm_source=lpp&utm_medium=referral&utm_campaign=internal+share



Les risques du nucléaire

Le nucléaire, une énergie à haut risque ?

Les risques du nucléaire

- Danger vs risque :

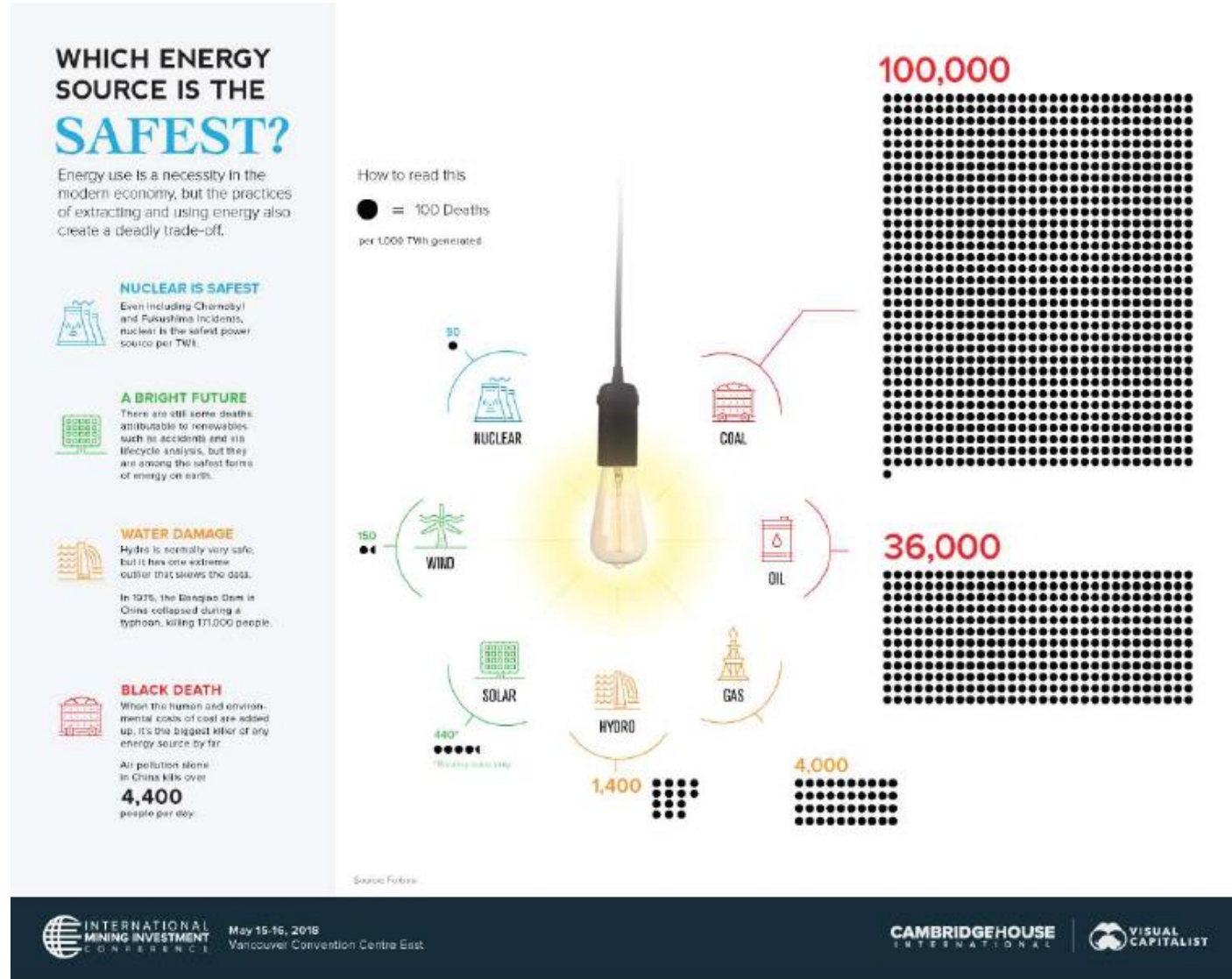
- **Risque = danger (gravité) × exposition (probabilité d'occurrence)**

- <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/sante-securite-travail/simdut-aide-memoire-risque-danger-sante-canada-2008.html>

- Probabilité élevée ? Dur à dire...

Les risques du nucléaire

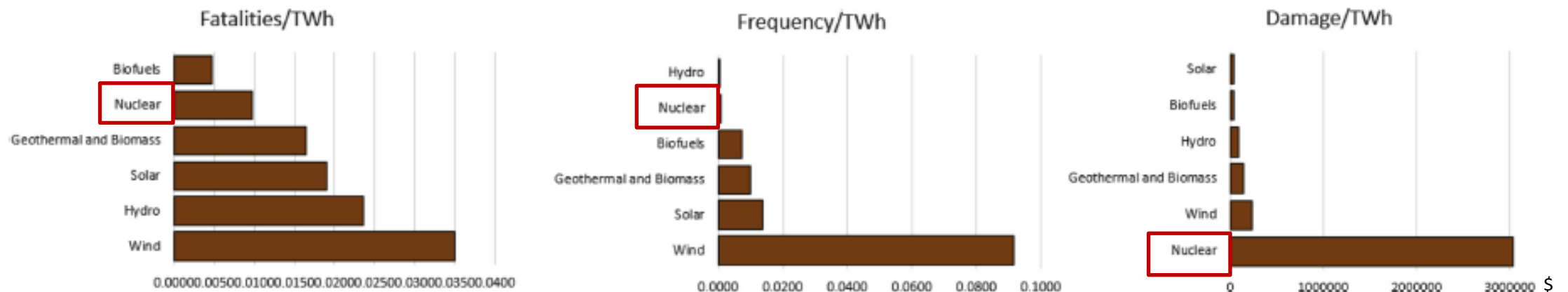
- Danger vs risque :



Les risques du nucléaire

- Danger vs risque :

- Une comparaison entre les énergies décarbonées :



Taken from : *Balancing safety with sustainability: assessing the risk of accidents for modern low-carbon energy systems*, 2016, Sovacool & al., Journal of cleaner production

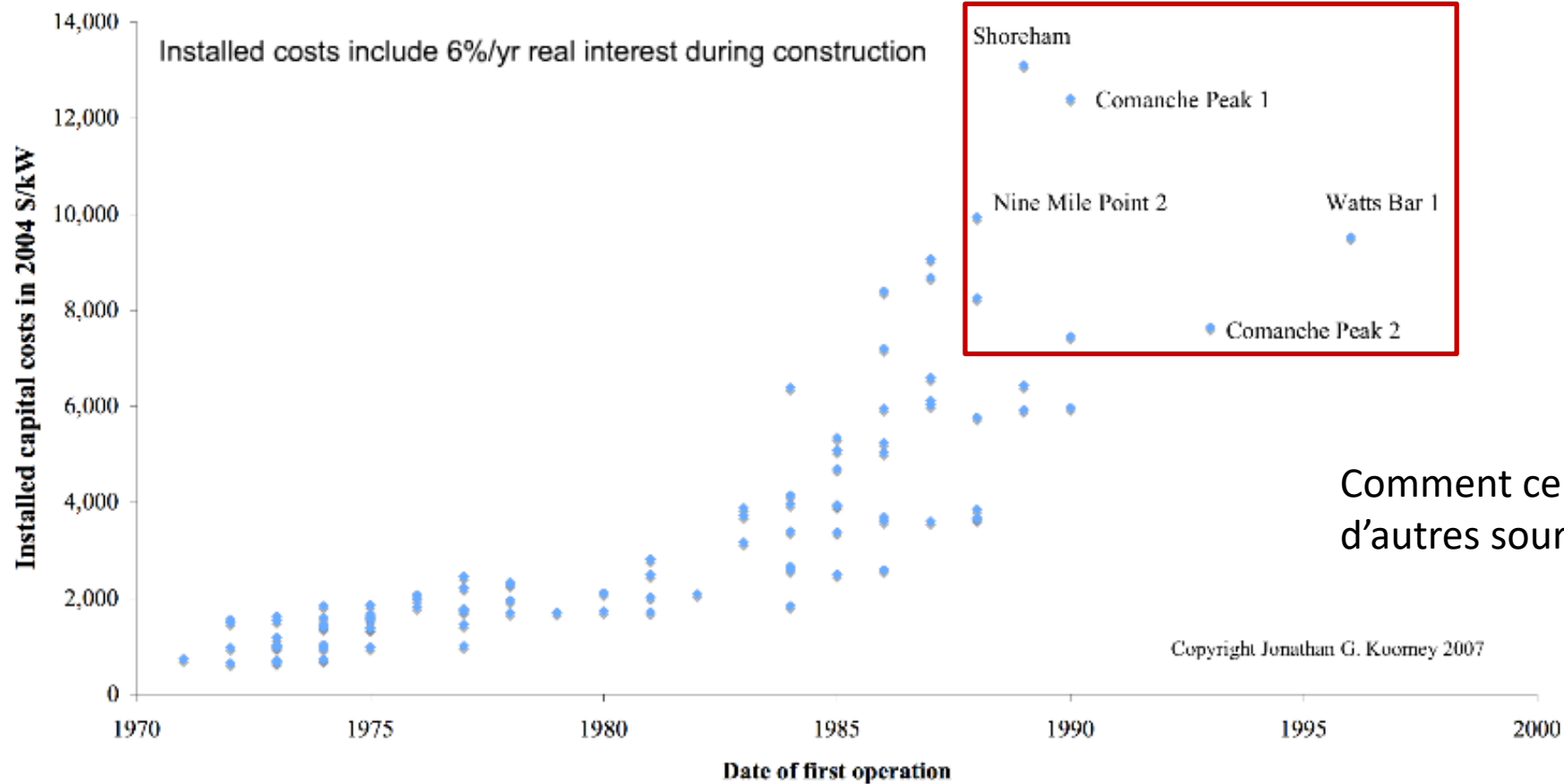
Les risques du nucléaire

- Prolifération d'armes nucléaires :
 - Même si le combustible utilisé dans l'électro-nucléaire est différent de celui des bombes nucléaires, les installations peuvent être modifiées pour correspondre à un besoin militaire, que ce soit en enrichissant l'uranium à des taux très élevés ou en utilisant le plutonium créé.
 - L'Inde et le Pakistan ont obtenus de cette façon l'arme nucléaire. Des doutes persistent sur l'Iran.
 - Les autres puissances nucléaires ont en général développé le nucléaire civil seulement après le programme militaire.

Les coûts du nucléaire

- Coût des installations

Le coût approximatif par W installé est d'environ 10 000\$/kW en moyenne pour les plus récents projets américains de centrales conventionnelles.



Comment cela se compare t'il avec d'autres sources?

<http://www.slideshare.net/jgkoomey/070417-nuclearcoststalkfordte-v3>

Les coûts du nucléaire

- Coût des installations

Technology	First available year ¹	Size (MW)	Lead time (years)	Base overnight cost ² (2019 \$/kW)	Techno-logical optimism factor ³	Total overnight cost ^{4,5} (2019 \$/kW)	Variable O&M ⁶ (2019 \$/MWh)	Fixed O&M (2019\$/kW-yr)	Heat rate ⁷ (Btu/kWh)
Ultra-supercritical coal (USC)	2023	650	4	3,661	1.00	3,661	4.48	40.41	8,638
USC with 30% carbon capture and sequestration (CCS)	2023	650	4	4,539	1.03	4,652	7.05	54.07	9,751
USC with 90% CCS	2023	650	4	5,851	1.03	5,997	10.93	59.29	12,507
Combined-cycle—single shaft	2022	418	3	1,079	1.00	1,079	2.54	14.04	6,431
Combined-cycle—multi shaft	2022	1,083	3	954	1.00	954	1.86	12.15	6,370
Combined-cycle with 90% CCS	2022	377	3	2,470	1.04	2,569	5.82	27.48	7,124
Internal combustion engine	2021	21	2	1,802	1.00	1,802	5.67	35.01	8,295
Combustion turbine— aeroderivative ⁸	2021	105	2	1,170	1.00	1,170	4.68	16.23	9,124
Combustion turbine—industrial frame	2021	237	2	710	1.00	710	4.48	6.97	9,905
Fuel cells	2022	10	3	6,671	1.10	7,339	0.59	30.65	6,469
Advanced nuclear	2025	2,156	6	6,016	1.05	6,317	2.36	121.13	10,461
Distributed generation—base	2022	2	3	1,555	1.00	1,555	8.57	19.28	8,946
Distributed generation—peak	2021	1	2	1,868	1.00	1,868	8.57	19.28	9,934
Battery storage	2020	50	1	1,383	1.00	1,383	0.00	24.70	NA
Biomass	2023	50	4	4,080	1.01	4,104	4.81	125.19	13,500
Geothermal ^{9,10}	2023	50	4	2,680	1.00	2,680	1.16	113.29	9,156
Municipal solid waste—landfill gas	2022	36	3	1,557	1.00	1,557	6.17	20.02	8,513
Conventional hydropower ¹⁰	2023	100	4	2,752	1.00	2,752	1.39	41.63	NA
Wind ⁵	2022	200	3	1,319	1.00	1,319	0.00	26.22	NA
Wind offshore ⁹	2023	400	4	4,356	1.25	5,446	0.00	109.54	NA
Solar thermal ⁹	2022	115	3	7,191	1.00	7,191	0.00	85.03	NA
Solar photovoltaic —tracking ^{5,9,11}	2021	150	2	1,331	1.00	1,331	0.00	15.19	NA

https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf

Valide pour les USA. Et pour les technologies récentes et à venir.

Ce tableau indique que la tendance ne semble pas vouloir beaucoup s'améliorer et que le fossé économique va se creuser davantage.

Examinons maintenant les coûts d'opération

De ce côté aussi, l'éolien et le solaire PV se démarquent nettement. Mais notez la portion fixe, et la portion variable.

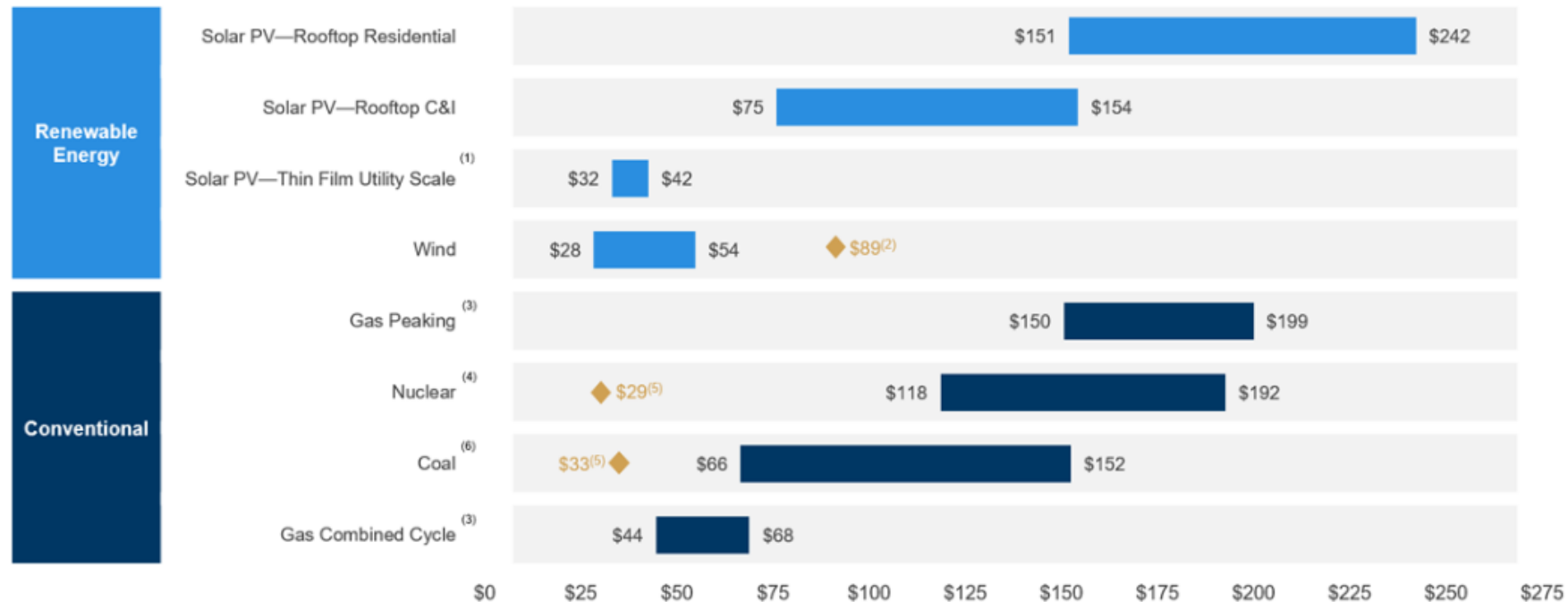
Les coûts du nucléaire

- Coût d'opération [\$/MWh]
 - Combustible, maintenance, réparation, déchets, etc

Levelized Cost of Energy Comparison—Unsubsidized Analysis

<https://www.lazard.com/perspective/lcoe2019/>

Selected renewable energy generation technologies are cost-competitive with conventional generation technologies under certain circumstances



Ce que ces coûts ne comprennent pas est la « flexibilité » (le nucléaire et le charbon ne permettent pas de courts temps de réponse pour répondre à une demande variable) et les « externalités » (le coût des impacts sur l'environnement, sur la santé, etc).

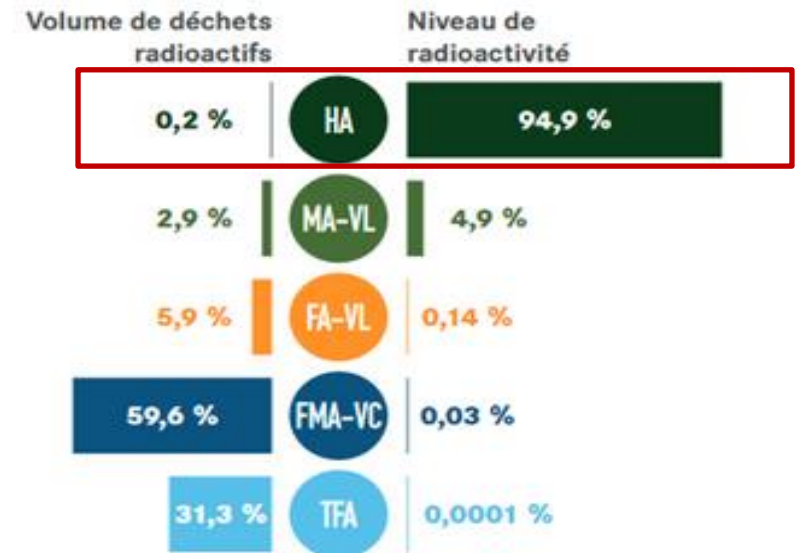
Les risques du nucléaire

- Déchets radioactifs :
 - Classification des déchets
 - Les déchets sont classés en fonction de leur période radioactive (demi-vie) et de leur radiotoxicité (radioactivité/unité de masse).

		Période radioactive		
		Vie très courte (T < 100 jours)	Vie courte (T > 100 jours T < 31 ans)	Vie longue (T > 31 ans)
Radioactivité	100 Bq/g	Déchets à vie très courte (VTC)	Déchets de très faible activité (TFA)	
	1 MBq/g		Déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC)	Déchets de faible activité à vie longue (FA-VL)
	1 GBq/g	Déchets de haute activité (HA)	Déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL)	

Vidéo : Le Réveilleur - Gestion des déchets nucléaires et démantèlement - DÉCHETS RADIOACTIFS #3

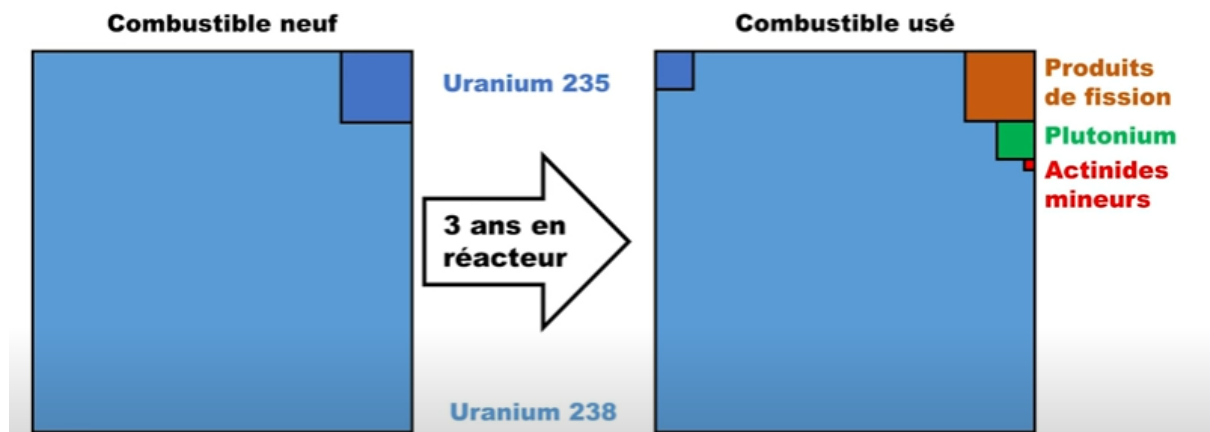
► RÉPARTITION DU VOLUME ET DES NIVEAUX DE RADIOACTIVITÉ DES STOCKS DE DÉCHETS À FIN 2016



ANDRA – inventaire national 2018

Les risques du nucléaire

- Déchets radioactifs :
 - On ne va s'intéresser ici qu'aux plus dangereux, ceux de haute activité (HA), qui sont principalement : les produits de fission (FP), le Plutonium (Pu) et les actinides mineurs (MA).



Vidéo : Le Réveilleur - De la centrale aux déchets radioactifs
- DÉCHETS RADIOACTIFS #1

Les risques du nucléaire

- Recyclage des déchets radioactifs :
 - MOX (mixed oxides): combustible constitué d'uranium appauvri et de plutonium
 - URE (uranium de retraitement) : uranium enrichi à 1% pouvant être enrichi à nouveau pour être réutilisé



Usine de retraitement de la Hague, France

Les risques du nucléaire

- Recyclage des déchets radioactifs : les réacteurs Gen IV
 - Multi-recyclage : Possibilité d'utiliser l'uranium et le plutonium qui ne sont plus utilisables par les réacteurs à eau après un second passage en réacteur
 - Réduction des déchets finaux : limités essentiellement aux produits de fission
 - Réduction de la dangerosité des déchets : diminution de la radioactivité et de la puissance résiduelle des déchets ultimes par séparation des actinides des produits de fission

Les risques du nucléaire

- Stockage des déchets radioactifs :
 - Ceux-ci peuvent être séparés pour réduire leur durée de vie.
 - Coulés dans des matrices de verre, puis enfermés dans des conteneurs.

Les risques du nucléaire

- Déchets radioactifs :
 - Canada : pas de recyclage en MOX
 - Stockage en conteneur par refroidissement passif, sans séparation du combustible.
 - Solution temporaire (~50 ans)



Conteneur de combustible utilisé au Canada

Les risques du nucléaire

- Déchets radioactifs :
 - France : projet Cigéo
 - 500m de profondeur dans une couche argileuse
 - Pour les déchets à haute activité
 - Imperméabilité du site sur les 100 000 prochaines années
 - Réversibilité du stockage pour au moins un siècle



Les risques du nucléaire

- Déchets radioactifs :
 - France : projet Astrid
 - Prototype de réacteur Gen IV
 - Technologie : réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium
 - Porté par le CEA dans les années 2010
 - Capable de fonctionner grâce à des combustibles usés :
 - Plutonium extrait des combustibles usés
 - Stocks d'U238 issus de l'exploitation du parc nucléaire français
 - Réduction des déchets à vie longue : incinération d'actinides mineurs
 - Abandonné en 2019 pour des raisons politiques, sociales (peur du nucléaire) et économiques

Les risques du nucléaire

- Démantèlement :
 - Produit une grande quantité de déchets à faible activité
 - Une stratégie consiste à attendre que la radioactivité baisse naturellement pour démanteler
 - Transmission de cette tâche aux générations futures
 - Le prix du démantèlement est inclus dans le prix de l'électricité nucléaire.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Principe et technologies
- Le nucléaire dans le monde
- Les risques du nucléaire
- ***Les réserves d'Uranium***
- Nucléaire et opinion publique
- Fusion nucléaire
- Conclusion

Réserves d'Uranium

- Généralités :
 - L'Uranium est une ressource non-fossile mais néanmoins en quantité limitée sur Terre.
 - Grandes variations dans les prévisions de disponibilité : entre 100 et 1000 années au rythme de consommation actuel
 - 100 ans : IAEA, 2018, *Uranium 2018 - Resources, Production and Demand*, doi.org/10.1787/uranium-2018-en
 - 1000 ans : Antoine Monnet, 2016, Disponibilité à long terme des ressources mondiales d'uranium

Réserves d'Uranium

- Prix :
 - Le prix est passé de 30 à 60 USD/lb entre septembre 2021 et avril 2022
 - Cependant le prix de l'uranium a peu de répercussion -> le coût de l'uranium naturel représente seulement 7% du coût de production de l'énergie (CEA)



tradingeconomics.com

Réserves d'Uranium

- Perspectives et évolution :
 - Dépend du prix.
 - Prix du minerai très faible : marge convenable.
 - Possibilité d'évolution : utiliser d'autres ressources que l'Uranium, notamment le Thorium (présent en plus grande quantité) ou le Plutonium (actuellement considéré comme un déchet).

Réserves d'Uranium

- Pays extracteurs :

Production d'uranium par pays²²

	Tonne d'uranium	2004	2014	Variation 2014/2004 (%)	% 2014
1	 Kazakhstan	3 719	23 127	+522	41,1
2	 Canada	11 597	9 134	-21	16,2
3	 Australie	8 982	5 001	-44	8,9
4	 Niger	3 282	4 057	+24	7,2
5	 Namibie	3 038	3 255	+7	5,8
6	 Russie	3 200	2 990	-7	5,3
7	 Ouzbékistan	2 016	2 400	+19	4,3
8	 États-Unis	878	1 919	+119	3,4
9	 Chine	750	1 500	+100	2,7
10	 Ukraine	800	962	+20	1,7
	Total mondial	40 178	56 252	+40	100

Réserves mondiales prouvées récupérables d'uranium par pays
(en milliers de tonnes)²¹

Rang	Pays	Réserves 2007	%	Réserves 2013	%
1	 Australie	725	22,0	1 706	29
2	 Kazakhstan	378	11,5	679	12
3	 Russie	172	5,2	506	9
4	 Canada	329	10,0	494	8
5	 Niger	243	7,4	405	7
6	 Namibie	176	5,3	383	6
7	 Afrique du Sud	284	8,6	338	6
8	 Brésil	157	4,8	276	5
9	 États-Unis	334	10,3	207,4	4
10	 Chine	nd	nd	199	4
	Total 10 premiers	2 213	67,1	5 193	88
	Total monde	3 300	100	5 903	100

3 pays extraient 65% de l'uranium mondial

Nucléaire et opinion publique

Dans les deux sens, le manque de discernement amène à de mauvais choix :

- Position trop pronucléaire de l'état Français : retard considérable pris dans le développement des énergies renouvelables
- Position trop antinucléaire : prendre le risque de fermer trop vite les centrales sans avoir de solution de repli viable et disponible pour pallier au manque d'énergie. Exemple de la Belgique qui veut finalement prolonger de 10 ans ses 2 dernières centrales suite à la pénurie énergétique causée par le conflit Russie-Ukraine, ce qui se révèle compliqué sur le plan technique comme économique.

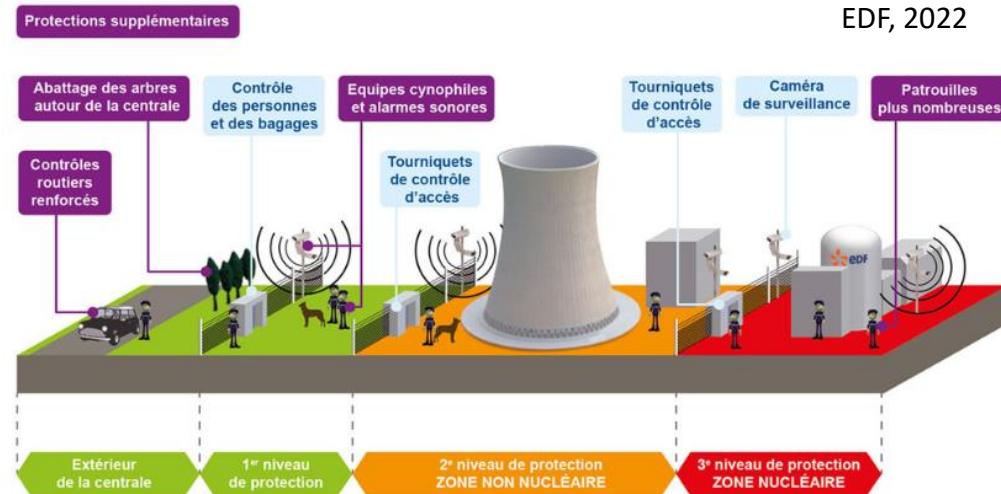
Nucléaire et opinion publique

Perception VS papiers scientifiques



Artiste : Zerba Lefanzine

VS



"Les centrales nucléaires figurent parmi les installations les plus **sûres** et les plus **sécurisées** de la planète." (IAEA, 2022)

"Pour réduire au maximum la probabilité d'un accident, l'AIEA aide les États Membres à mettre en œuvre des **normes internationales de sûreté**, lesquelles visent à renforcer la sûreté des centrales nucléaires." (IAEA, 2020)

Nucléaire et opinion publique

Perception VS papiers scientifiques



Artiste : Zerba Lefanzine

VS

"Pour s'assurer qu'EDF exerce sa responsabilité d'exploitant et respecte les exigences de la **réglementation** en matière de sûreté nucléaire, l'État a chargé une autorité administrative **indépendante**, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), de le **contrôler**. [...] Le contrôle vis[e] à s'assurer de la **conformité technique** des installations et des activités. [Il] englobe également les **facteurs organisationnels et humains** [et] les aspects **environnementaux** ainsi que la **radioprotection** des travailleurs." (asn, 2022)



De l'incident à l'accident nucléaire, IRSN, 2014

https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/surete-centrales/Pages/1-de-l-incident-a-l-accident.aspx?dId=208d37a7-e756-4bed-be5e-7938901920ef&dwId=c741501f-40ff-438c-8e35-88ebdbed6e26#.Yma4d9qZN6s

Nucléaire et opinion publique

Papiers scientifiques VS perception

**POUR OU CONTRE
LE NUCLÉAIRE?**



Artiste : Yelch

Est-ce que la radioactivité des centrales impacte réellement les riverains ?

Les riverains reçoivent une dose de l'ordre de $1 \mu\text{Sv}$ par an, soit 2 400 fois moins que la radioactivité naturelle moyenne en France (qui est de 2,4 mSv).

Donc non, les riverains des centrales sont loin d'avoir un troisième pouce...

<https://www.sfen.org/rgn/reduire-rejets-issus-centrales-nucleaires-cas-edf/>

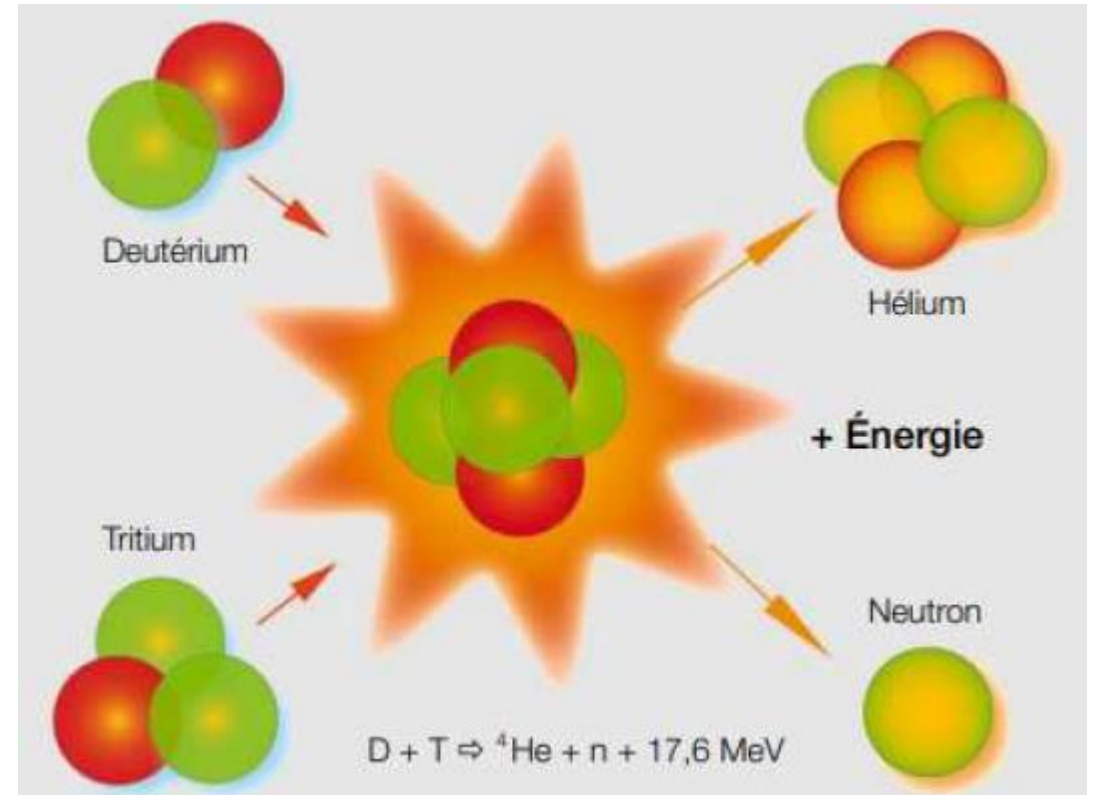
Fusion nucléaire

Principe de la fusion

La masse des produits est plus faible que la masse des réactifs. Cette différence de masse crée de l'énergie $E=\Delta mc^2$

Pour que les noyaux fusionnent il faut les rapprocher suffisamment.

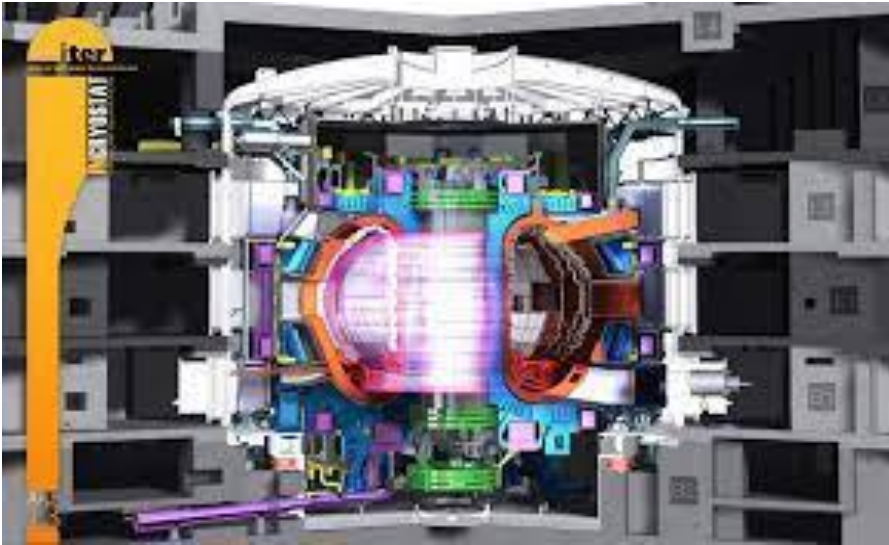
Pour cela il faut des conditions extrêmes :
- température de l'ordre de 100 millions de °C
- pression de l'ordre de 1 millionième de bar



EPFL

Fusion nucléaire

Projet ITER

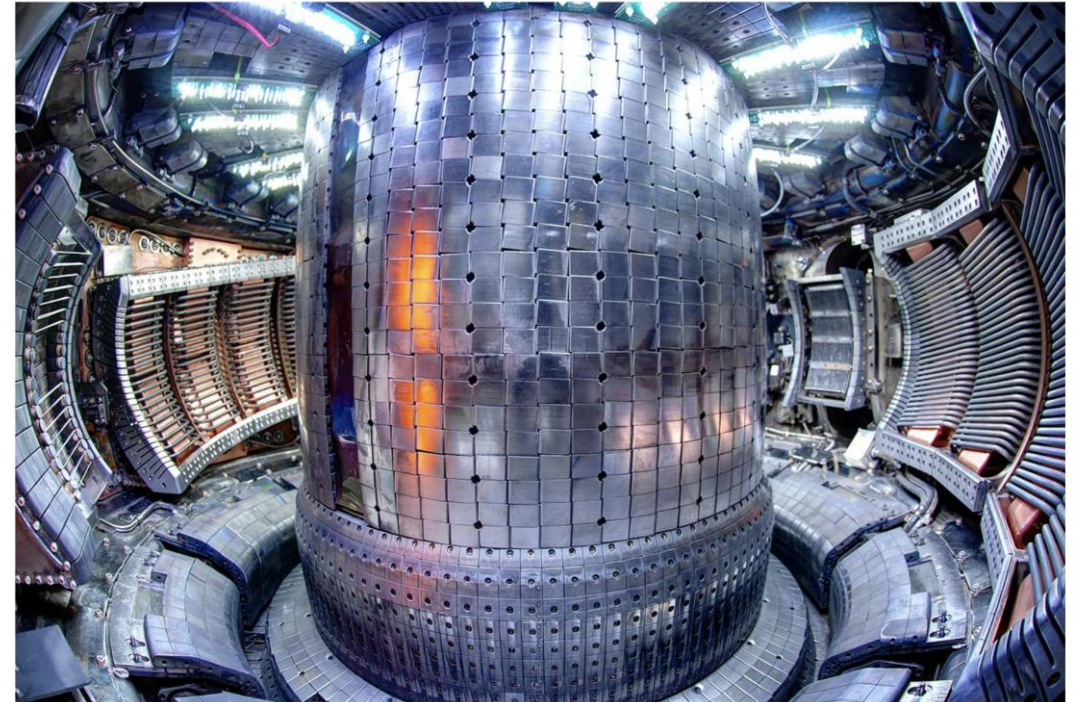


1. Réacteur laboratoire de la fusion nucléaire financé par 35 pays
2. Calendrier : pleine puissance pour 2035, projet DEMO 2050, **exploitation industrielle 2060** pour les réacteurs qui en découlent (calendrier au mieux)
3. Défi de porter un plasma à une température de 100 millions de °C
4. Avantages : combustibles en grandes quantités, peu de déchets radioactifs, peu de risque d'accidents, technologie très différente des armes nucléaires

Fusion nucléaire

Projet EAST

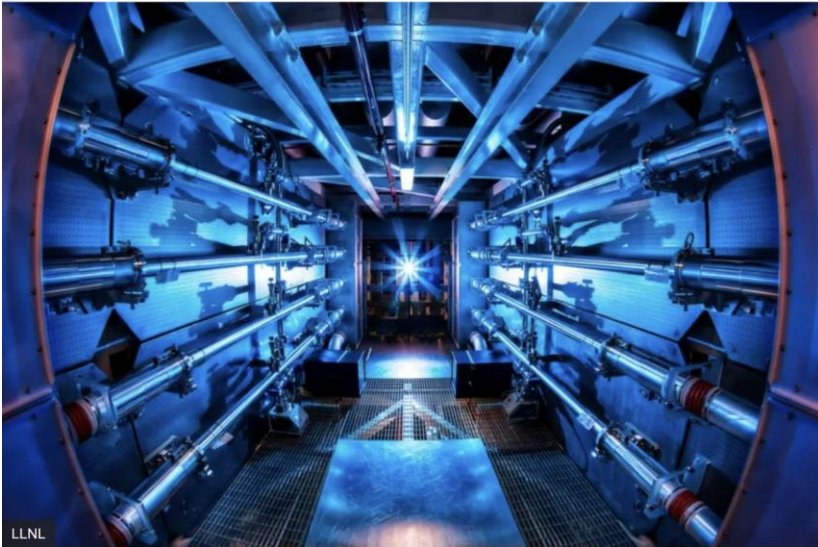
1. Tokamak Supraconducteur Avancé
Expérimental : réacteur à confinement magnétique développé en 2006 dans le cadre de la coopération ITER
2. Objectif : générer du plasma et le maintenir stable grâce à un puissant champ magnétique
3. En décembre 2021, **record mondial avec 70 millions de °C (2,- fois plus élevée que le cœur du Soleil) pendant 1056 secondes**



L'intérieur d'un réacteur Tokamak | © Creative Commons / Robert Mumgaard

Fusion nucléaire

Projet NIF



1. National Ignition Facility, laboratoire américain, utilise un laser puissant (192 faisceaux) pour chauffer et comprimer l'hydrogène (deutériem et tritium) à une densité 100 fois supérieure à celle du plomb et ainsi déclencher la fusion nucléaire.
2. Une expérience réalisée le 8 août 2021 à permis, **d'obtenir 1,35 MJ d'énergie, soit environ 70 % de l'énergie laser fournie à la capsule de combustible.**
3. Les scientifiques du NIF pensent également avoir atteint ce que l'on appelle un "plasma brûlant", c'est-à-dire que les réactions de fusion elles-mêmes fournissent la chaleur nécessaire à une nouvelle fusion. Phénomène essentiel pour que le processus s'auto-entretienne.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Principe et technologies
- Le nucléaire dans le monde
- Les risques du nucléaire
 - Effets de la radioactivité
 - Accidents nucléaires
 - Risques divers
 - Déchets nucléaires
- Les réserves d'Uranium
- **Conclusion**

Conclusions

- L'énergie nucléaire d'aujourd'hui provient de la fission de l'uranium qui libère beaucoup de chaleur (la fusion nucléaire n'est pas encore maîtrisée).
- Cheminement de l'énergie : nucléaire -> thermique -> mécanique -> électrique
- Le nucléaire permet une production d'électricité bas carbone, non-intermittente, mais non-renouvelable.
- Les réserves d'Uranium de la filière nucléaire sont suffisantes à court et moyen terme, et des alternatives existent pour adapter la filière à d'autres ressources fissiles pour le long-terme.

Conclusions

Avantages

- Production décarbonée
- Densité énergétique
- Prix de l'uranium
- Facteur de charge intéressant
- Fréquence faible des accidents
- Réserves suffisantes + alternatives
- Non-intermittent

Inconvénients

- Coûts économiques et sociaux d'un accident nucléaire
- Déchets radioactifs
- Démantèlement
- Dépendance de l'approvisionnement
- Possible prolifération des armes nucléaires

- Le nucléaire possède des avantages et des inconvénients, tout comme les ENR. Il ne faut pas les opposer mais peut-être les rendre compatibles ensemble pour profiter des avantages de chacun, et combler leurs inconvénients.

Bibliographie

N.B.: Les ressources proposées étant francophones, elles traitent souvent plus directement du cas français. Néanmoins la grande majorité de ces informations reste entièrement valable pour toute la filière nucléaire mondiale.

- Sites :
 - <https://www.irsn.fr/>
 - <https://www.laradioactivite.com>
 - <https://www.iaea.org/>
- Vidéo :
 - Bonne série de vidéos de la chaîne youtube *Le Réveilleur*
 - 8 vidéos de 40 min en moyenne (dont 4 sur les déchets)



Merci de votre attention !

Lorsque cette capsule de formation est présentée en asynchrone (PDF récupérable sur le site du cours), si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

