

Exposé – Le petit nucléaire qu’est ce que ça change?

[Provi] Dieppe le 28 juillet 2023

Antoine Bonduelle

contact@ee-consultant.fr

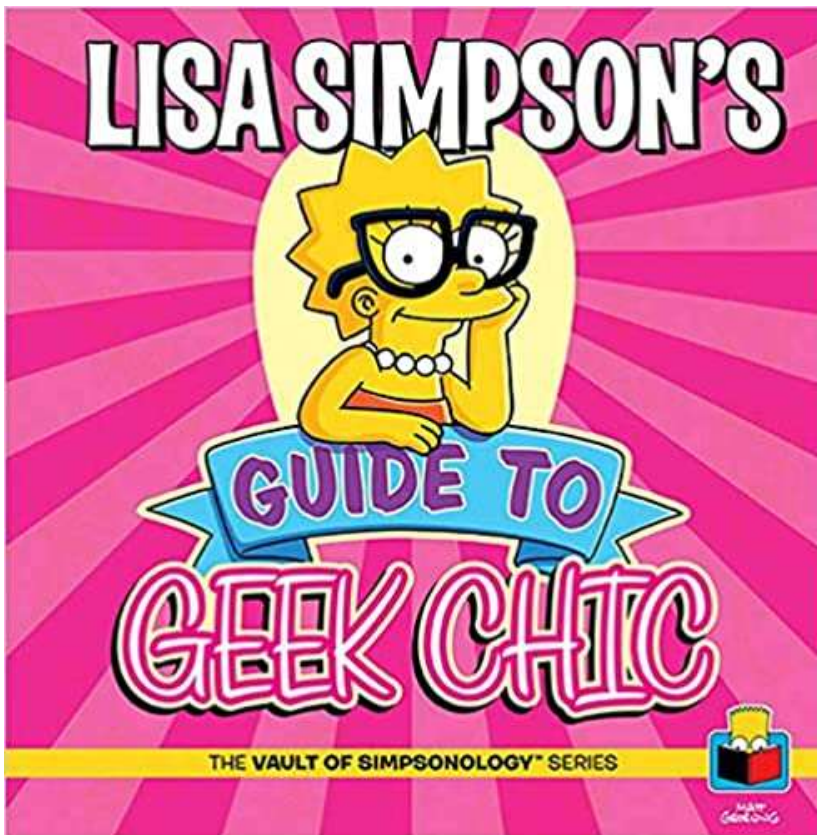
Bande son : Kraftwerk Anti-Nucléaire, Radioactivity sur <https://www.youtube.com/watch?v=X--F5b5ldqU>

Voir aussi vidéo Virage-Energie-Climat (2h) ici <https://www.youtube.com/watch?v=l6Al9ZvHxgl>



E&E Consultant

Sitographie



La reine des Geeks

- Global chance <https://www.global-chance.org/Nucleaire>
- Podcasts de Bernard Laponche <http://www.global-chance.org/Podcast-Un-dejeuner-avec-Bernard-Croissant-et-Intermittence>
- Rapport Nucléaire Mondial [Myclé Schneider et al.] <https://www.worldnuclearreport.org/>
- GIEC AR6 <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- AIEA Climats <https://www.iaea.org/publications/12338/adapting-the-energy-sector-to-climate-change>
- Réseau Sortir du Nucléaire <https://www.sortirdunucleaire.org/>
- Commission Energie EELV <https://energie.eelv.fr/presentation/>

Plan



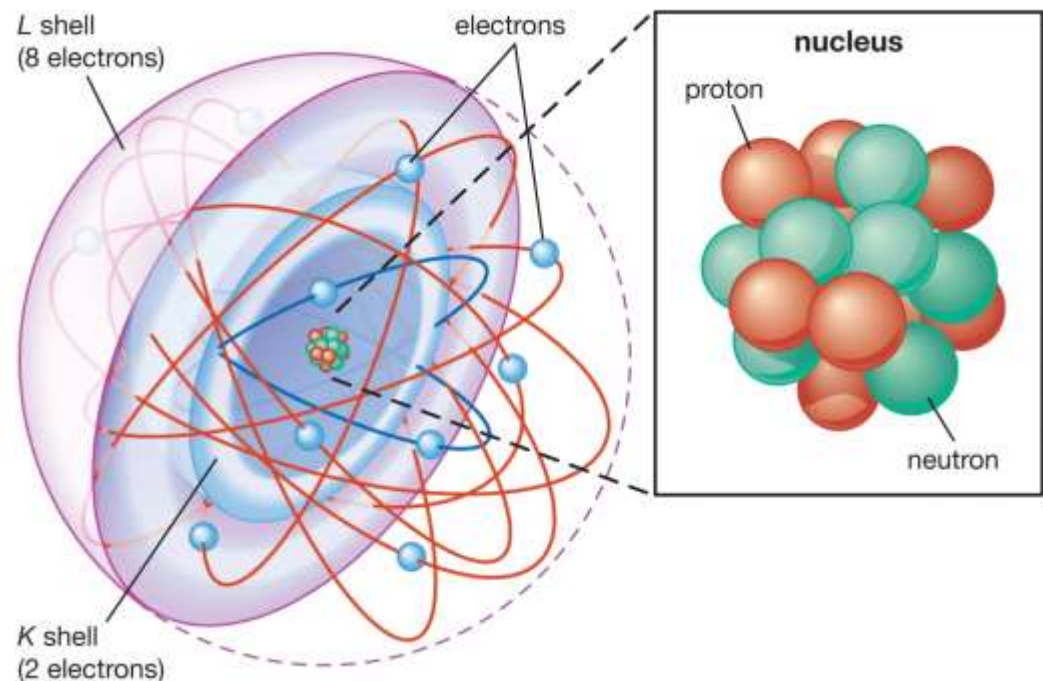
1. **C'est quoi un mini-réacteur. Expert Minute**
2. **Les cycles proposés pour les mini-réacteurs**
3. **Le cadre de la transition, et les trois risques : Prolifération; Déchets; Accidents**
4. **Démographie des réacteurs et situation mondiale rabougrie**
5. **Une France spécifique**
6. **Economie industrielle et petits réacteurs**

Mini-nucléaire



L'atome

Vu de loin on dirait une sphère, mais il y a surtout du vide. Le noyau est fait de protons (particules chargées électriquement) et de neutrons (particules sans charge).



Propagande russe (Getty Image)

Isotopes



Les ISOTOPES désignent l'équipe de baseball de Springfield dans la série des Simpsons. Ci-contre, leur logo officiel.

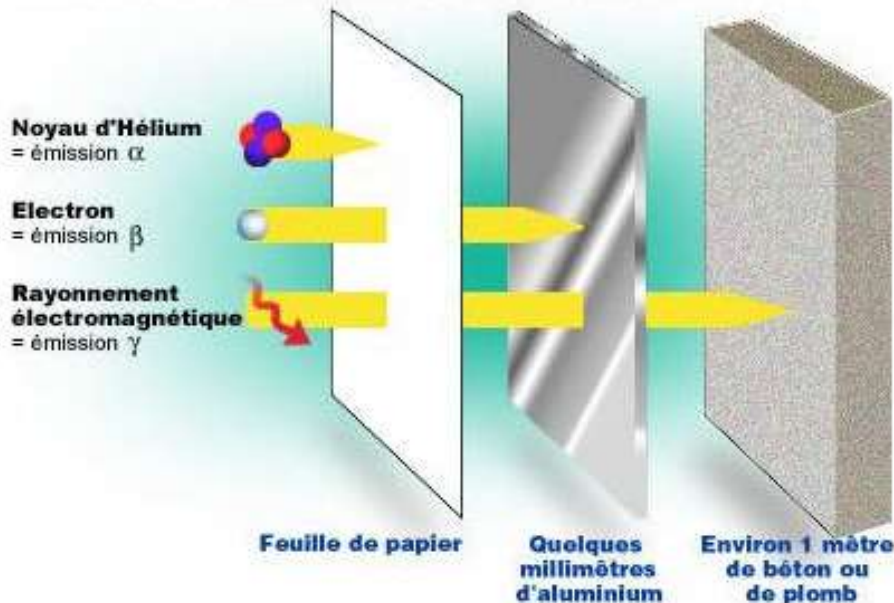


La structure des atomes est décrite par les physiciens au cours du XX^{ème} siècle.

Chaque atome peut avoir plusieurs poids molaire différents, mais des propriétés chimiques identiques. On dit qu'ils sont **isotopes**.

Par exemple, l'hydrogène, le deutérium et le tritium sont trois atomes possédant un proton et un électron, à quoi s'ajoutent un ou deux neutrons dans les éléments les plus lourds.

Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements



Le **B-A-BA** par l'IRSN : <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/sante/lexposition-rayonnements-ionisants>

Conférence claire et scientifique. Patrick Smeesters est docteur en médecine, membre du groupe d'experts de l'article 31 du Traité EURATOM, où il dirige le groupe de travail chargé d'identifier les implications de la recherche scientifique sur les normes de protection contre les radiations ionisantes.

Les catastrophes nucléaires et leurs effets sur la santé humaine, par Patrick Smeesters (UCL)
<https://www.sciences.be/video/catastrophe-sante/>

Impact santé

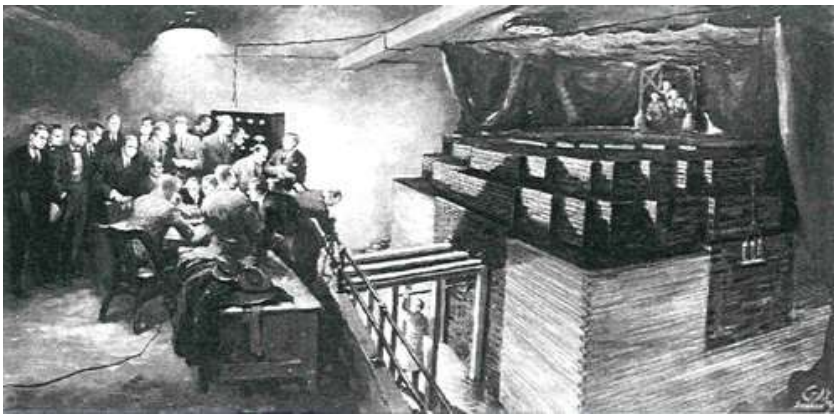
Les dangers pour la santé de la radioactivité proviennent:

- de l'**irradiation**, soit le rayonnement direct vers les cellules du corps)
- de la **contamination** : particules et poussières radioactives ingérée, respirees, ou stockées sur la peau ou dans les cheveux.

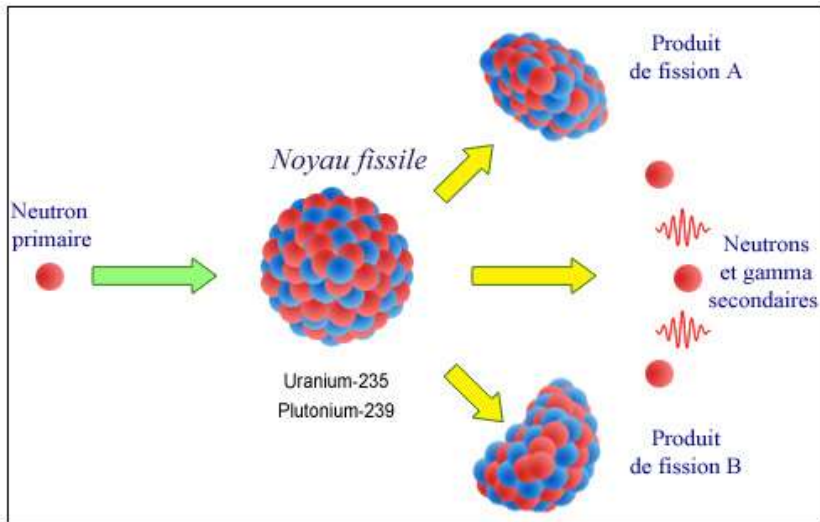
S'il y a consensus sur les doses élevées (ci-dessous), la question des faibles doses est plus épineuse.

Dose (en Gy)	1	5	10	20	50
Atteinte de la peau	ROUGEURS BRULURES NECROSE				
Atteinte des gonades	TEMPO	PROLONGEE	IRREVERSIBLE	Chez l'homme	
	TEMPORAIRE	PROLONGEE	Chez la femme		
Atteinte du cristallin	CATARACTE				

Neutrons et noyaux



<https://www.laradioactivite.com/site/pages/enricofermi.htm>



Document IN2P3/CNRS

<https://www.laradioactivite.com/site/pages/Fission.htm>

Sur Léo Szilard, voir notamment « Les rêveurs lunaires », Cedric Villani-Baudoin, Gallimard-Jeunesse 2015

Léo Szilard a l'idée en 1933 de la **réaction en chaîne** et dépose le brevet d'un **réacteur nucléaire** en 1934.

Un neutron émis par un atome fissile en désintégration, casse le noyau d'un autre atome fissile, ce qui génère d'autres neutrons et des rayonnements énergétiques massifs.

Enrico Fermi, Szilard et leur équipe réalisent en 1942 à Chicago la première **pile atomique** pour créer une réaction en chaîne entretenue.

Szilard participe à la fabrication de la bombe et en dessine le schéma, mais s'oppose avec ses collègues dont **Oppenheimer** à son utilisation contre le Japon.

Plan



- 1. C'est quoi un mini-réacteur. Expert Minute**
- 2. Les cycles proposés pour les mini-réacteurs**
- 3. Le cadre de la transition, et les trois risques : Prolifération; Déchets; Accidents**
- 4. Démographie des réacteurs et situation mondiale rabougrie**
- 5. Une France spécifique**
- 6. Economie industrielle et petits réacteurs**

Les mini-réacteurs



Mini-Me est un personnage joué par Verne Troyer dans les films de Austin Powers: *The Spy Who Shagged Me* et *Goldmember*. Avant que le Dr Evil soit renvoyé en 1969, il est cloné par ses acolytes à l'échelle 1/8ème.

L'AIEA décrit sur 354 pages des « **réacteurs de papier** », dont quelques prototypes en cours de construction. Dans certains cas il s'agit de réacteurs à usage militaire déjà utilisés avec succès dans la propulsion nucléaire de navires ou de sous-marins.

Ces réacteurs ont droit à l'intérêt des médias et à de fortes sommes en recherche [par exemple environ 1,5 milliards en France]

Il n'existe que trois réacteurs (Chine, Russie) qui s'approchent de la définition

Quatre sortes de mini-réacteurs



Les modèles à développement « rapide »

Réacteurs à eau issus des réacteurs classiques « REP » et « BWR », et des sous-marins

Les cycles innovants de réacteurs

- Sodium et plomb liquide (mini-Superphénix)
- Haute température (600-950°C) à boulets ou à pellets; évacuation de la chaleur par de l'hélium.
- Sels fondus circulants (500-800°C)



Avantages visés

- ✓ Part plus élevée de la valeur réalisée en usine (même débat pour l'éolien flottant à robotiser et produire sur chantier à terre)
- ✓ Séries plus longues > des baisses de coûts espérées
- ✓ Moins d'effet de taille sur la mise en route > coût un peu moindre pour les petites compagnies
- ✓ Moins d'effet de proportion du réseau > marché élargi à plus de pays



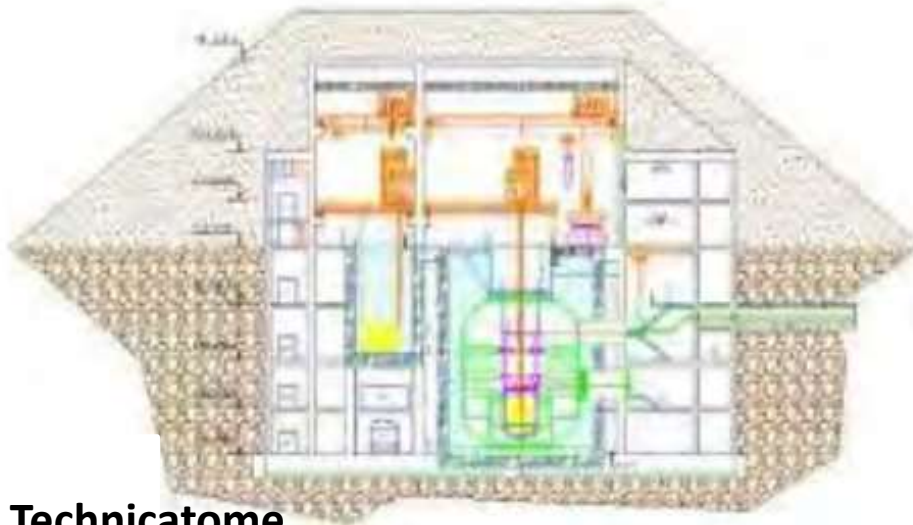
Problèmes

- ✓ Nouvelle mise en route d'un modèle neuf de réacteur, y compris tests en vraie grandeur de la résistance aux accidents
- ✓ L'usine de fabrication doit être pré-financée et construite
- ✓ Une première série doit être testée chez des clients réels qui acceptent le risque (délais, pépins...)
- ✓ La taille n'est pas si diminuée (e.g. <300 MW)
- ✓ Autres problèmes identiques aux gros réacteurs : approvisionnement et reprise des combustibles, autorisations et contraintes à l'international etc.
- ✓ Opinion publique: proximité des villes ? Multiplication des sites nucléaires?

Exemple en France



NUWARD EDF/Technicatome
2 X 170 MW déploiement prévu 2030



Technicatome

Le réacteur à sûreté « passive partielle » serait **semi-enterré et placé dans une cuve d'eau** pour lui donner plusieurs jours d'autonomie en cas d'accident. Son déploiement est proposé pour **2030**. En Grande-Bretagne, Rolls-Royce propose un projet similaire de **mini REP**. Le coût prévisible est cependant largement supérieur à celui d'un grand réacteur. Il est en effet difficile d'imaginer une production « en usine » très supérieure à 50% du contenu. Reste aussi la concurrence internationale et surtout le choix qui risque de **contredire celui de l'EPR**

NUWARD EDF/Technicatome
2 X 170 MW soit 2,5 TWh/an
Corse 2019 2,3 TWh



Pas si petit

Une discussion importante pour le marché d'une centrale électrique est la **proportion d'une unité par rapport à la consommation visée**. Un fonctionnement optimal voudrait que chaque unité représente au plus une proportion « normale » soit 1/8 environ.

Au dessous, **des surcoûts apparaissent** pour assurer le fonctionnement du réseau économiquement (maintenance, rechargement du combustible, pannes, adaptation aux variations saisonnières) et pour le niveau du service.

Or le projet de réacteur (**2,5 TWh/an**) représente déjà une production supérieure... à la consommation de la Corse (**2,3 TWh**) ou proche de la plus grande collectivité Outre-Mer, La Réunion (**2,8 TWh**).



Quel marché pour l'industrie?



De tels réacteurs produisant de l'ordre de 400 MWh thermiques (soit 2800 ktep/an) Auraient-il un marché auprès de grandes unités industrielles ?

En France la consommation des industries dans les branches « lourdes » est en moyenne de 16 ktep dans la métallurgie et de 10 ktep/an dans la chimie, et de 1,7 ktep en moyenne pour l'ensemble des 20 000 établissements industriels, soit cent à mille fois moins !

Les 500 plus grosses usines françaises consomment en moyenne... 20 kTep INSEE 2023 tableau NAF T1 traitement E&E.

Le discours sur l'« adaptation aux entreprises » est un leurre. Le fondateur de Stellaria parle par exemple d'alimenter des data centers (!)

Vendre de la chaleur ou de l'hydrogène?

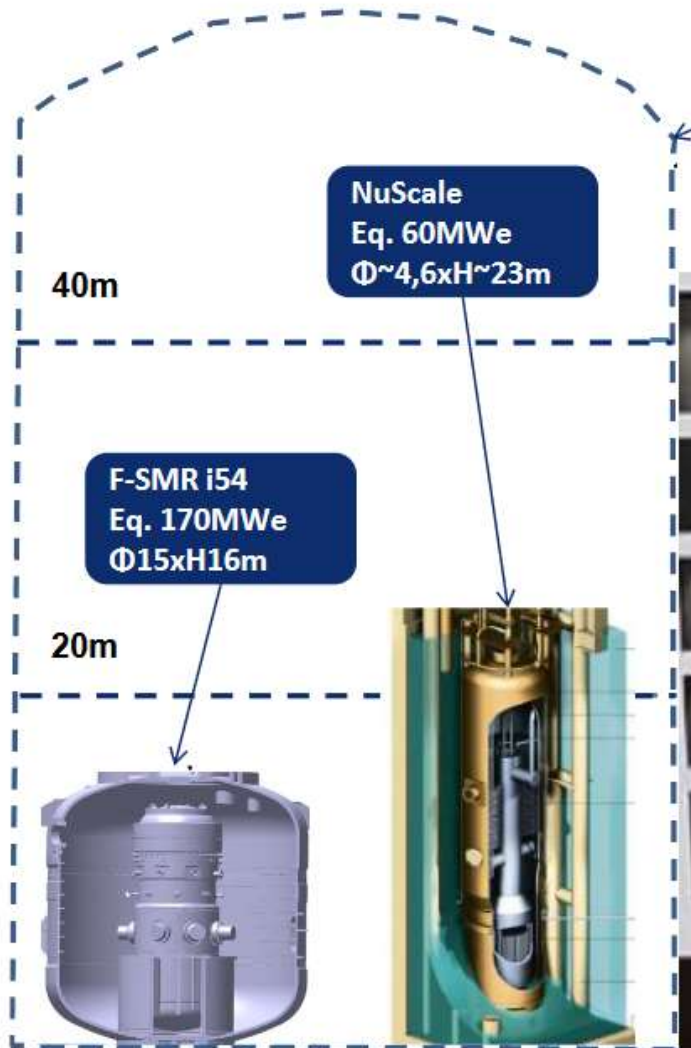


Seulement deux ou trois « clusters » industriels en France ont des puissances en rapport avec les projets de mini-réacteurs. Une poignée sont adaptées à des micro-réacteurs (-30 MWe) [INSEE]

Les seules industries à l'échelle sont Il s'agit d'industries dont **le modèle économique repose sur des approvisionnements en énergie très compétitifs**. Il faudrait alors subventionner massivement le SMR durant toute leur vie. Le même problème se pose pour la **production d'hydrogène**, particulièrement sensible au coût de revient unitaire de l'électricité, hors de portée sur un marché concurrentiel –et mondial- pour une ressource deux, trois fois plus chère voire bien plus

Outre cette absence de marché, il s'agit alors de combinaisons complexes et donc de projets unitaires. La baisse des coûts est alors encore plus exclue vis-à-vis d'équipements reproductibles (cas des EPR)

Consommation de matériaux



En première approche, par rapport à un réacteur « classique »:

- Pour un mini-réacteur (huit fois moins puissant), la consommation d'acier et de ciment est au moins quatre fois supérieure par kWh produit
- Pour un micro-réacteur (huit fois moins puissant que le mini-réacteur), la consommation d'acier et de ciment est plus de seize fois supérieure

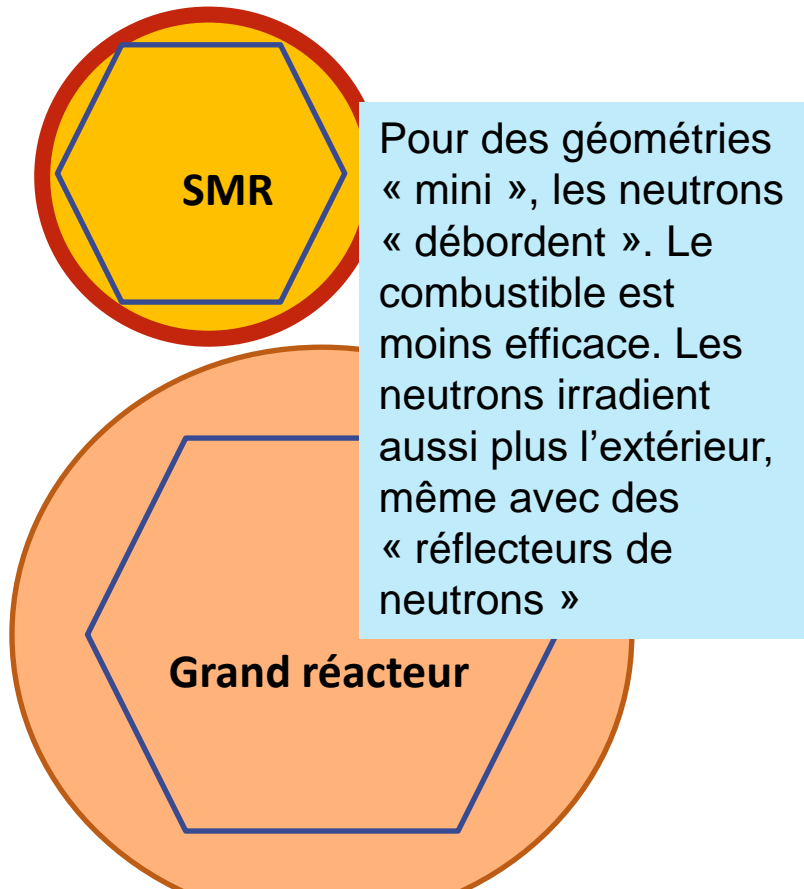
Ciment. Il s'agit en effet de construire un radier anti-sismique, posé sur la roche, environ deux fois plus fin que celui d'un grand réacteur. La proportion est la même.

Métaux. Les parois des cuves ne peuvent pas non plus être ajustées sur les sollicitations mécaniques, mais doivent aussi résister à un environnement radioactif.

SFEN

Plus de déchets

Capture de neutrons



Le mini-réacteur dans la plupart de ses avatars va générer plus de déchet au kWh produit.

En quelques sorte, les neutrons vont « déborder » du cœur du réacteur, ce qui va avoir deux conséquences:

- Moins d'atomes consommés par la réaction (« taux de burnup diminué ») et donc plus de combustibles usés au final, environ deux à trois fois.
- Plus de neutrons capturés par les composants extérieurs, notamment la cuve ou les composants en acier, ce qui multiplie les déchets « à faible activité » par vingt ou trente.

Responsable?

En mer de Kara, une quinzaine de réacteurs civils et militaires, et une grande quantité de déchets nucléaires ont été immergés, près des Îles russes de Nouvelle-Zemble.

La question des micro et des mini-réacteurs pose la question de la **responsabilité des états** (sécurité des salariés et des populations, prolifération, devenir des déchets de long terme) sur la fin du cycle, tant pour les déchets que pour les réacteurs usagés.

Le nucléaire reste une industrie d'états, la taille du réacteur importe peu. Seul compte le sérieux et les moyens alloués ainsi qu'une gouvernance sans faille.



La fin de vie du « mini-réacteur », ici l'arrivée d'un sous marin au cimetière de Nouvelle-Zemble. Le sous-marin a coulé dans l'opération (9 morts). La NZ a subi aussi les essais nucléaires et un baigne



<https://thebarentsobserver.com/en/nuclear-safety/2021/11/europe-offers-pay-russia-raise-sunken-nuclear-subs>



De telles conditions de **montée en puissance collective et maîtrisée** existent pour l'aviation. Une amorce aurait pu exister via Euratom par exemple, que la France s'est refusé à investir.

Avec des « si »

Pour réussir dans le domaine des mini-réacteurs :

- Il faudrait une **usine de format suffisant** pour produire des grandes séries.
- Cela passe par **une conception faisant consensus** chez les utilisateurs du monde entier
- Accepter une **concurrence mondialisée de fournisseurs sur les principaux composants**, cuve, alternateur, combustibles, ensembles
- Une « file d'attente » de production organisée avec **des trains de fabrication et d'approvisionnement sur longue durée**
- Un système de **pré-financement** voire de tiers-exploitants chez les clients

Et d'autres « si »



Par définition, il est difficile d'être « disruptif » dans un domaine aussi régulé et dépendant des états comme le nucléaire.

- **Accident 1.** Il faut aussi qu'un prototype soit éprouvé pour l'accident en vraie grandeur (et pas seulement sous forme de composants) pour prouver « in situ » que la catastrophe est évitée par des dispositifs fonctionnels, en principe passifs.
- **Accident 2.** Une condition de « normalité » n'est toujours pas remplie 70 ans après « Atoms for Peace »: la garantie de l'absence d'accident majeur (et des fonds mutualisés pour y pallier) à défaut d'assurance.



Par définition, il est difficile d'être « disruptif » dans un domaine aussi régulé et dépendant des états comme le nucléaire.

Et encore d'autres

- **Prix garantis.** Une forme de garantie de prix abordables pour le courant produit est indispensable pour un équipement non prouvé sur longue durée
- **Combustible.** Une garantie d'approvisionnement continu en combustible enrichi sera demandée par les clients, qui n'existe pas (avec dilemme sur la souveraineté du client).
- **Déchets.** Une garantie de reprise des déchets est indispensable sous une forme ou une autre par le fournisseur. En France la loi l'interdit.
- Une validation des modèle **reconnue mutuellement** dans la majorité du monde...

Pas une option pour le climat



- ✓ Les projets les plus avancés visent le milieu des années 2030 pour la construction d'un prototype, avec une production de série dix ans plus tard pour les plus optimistes.
- ✓ S'ils fonctionnent, cela correspond à une production d'énergie –faible- après 2040, et pour une faible fraction –même en cas de réussite- de l'énergie nucléaire totale. Ils auraient alors un coût de l'ordre de trois fois celui des alternatives.
- ✓ Les SMR n'ont donc aucun intérêt pour la crise climatique et pour l'objectif de décarbonation.
- ✓ Les autres mini-réacteurs (la majorité) arrivent après la bataille

Des questions ?



Le chat persan du Dr Evil ressemblait au départ à l'animal de James Bond. Mais il perd sa fourrure en s'échappant de son maître dans une capsule cryogénique temporelle.

Douglas Powers, communément appelé Dr. Evil, est le principal méchant de la série Austin Powers (et son frère jumeau démoniaque).

Plan



1. **C'est quoi un mini-réacteur. Expert Minute**
2. **Les cycles proposés pour les mini-réacteurs**
3. **Le cadre de la transition, et les trois risques : Prolifération; Déchets; Accidents**
4. **Démographie des réacteurs et situation mondiale rabougrie**
5. **Une France spécifique**
6. **Economie industrielle et petits réacteurs**

Le Nautilus



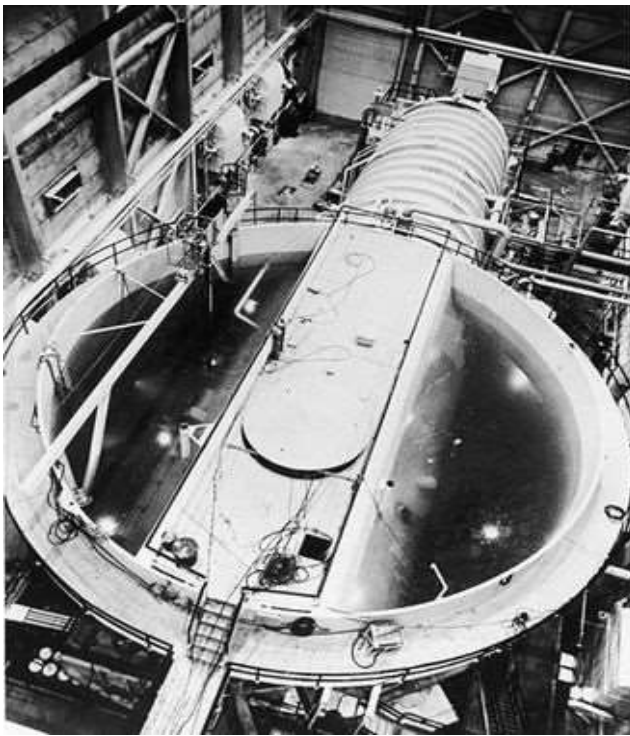
Le premier sous-marin nucléaire stratégique a notamment navigué en 1958 sous le pôle Nord. Le programme du réacteur S1W était basé pour l'époque sur une conception plutôt rigoureuse de la sécurité de l'équipage par l'US Navy.

Construit en 1951-1954, le sous-marin Nautilus utilise le réacteur conçu par **Westinghouse**, le **PWR** (Pressurized Water Reactor).

C'est le même cycle et un dessin proche qui sont utilisés dans **la majorité des réacteurs civils** du monde.

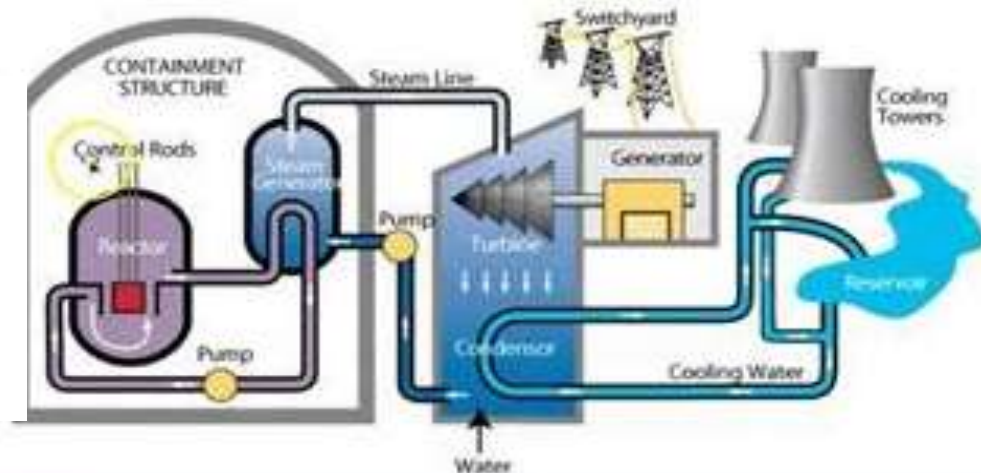
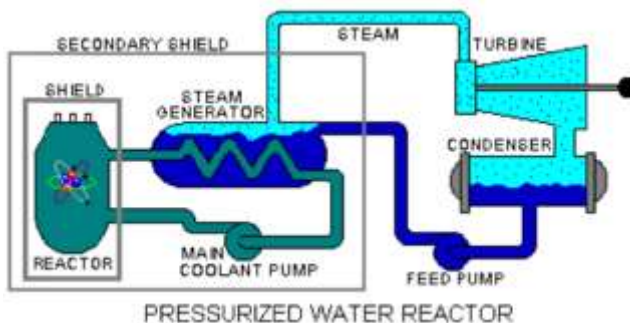
Cela illustre l'intuition initiale des ingénieurs, mais aussi l'énorme difficulté à modifier radicalement un tel système

70 ans de REP



Réacteur prototype S1W à terre démarré en 1953 en Idaho. Son combustible est de l'uranium enrichi en isotope 235 fissile
<https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/eng/reactor.html>

Le réacteur de 1953 (ci-contre) et plus récemment l'EPR utilisent le **même cycle thermodynamique** à eau pressurisée (REP (ou « PWR »)). L'eau sert de vecteur pour **transporter la chaleur** de la réaction nucléaire sous forme de vapeur pressurisée, ainsi que de **modérateur de la réaction atomique**. L'ensemble est compact, assez fiable et étanche. Le rechargement doit par contre se faire en arrêtant le réacteur.

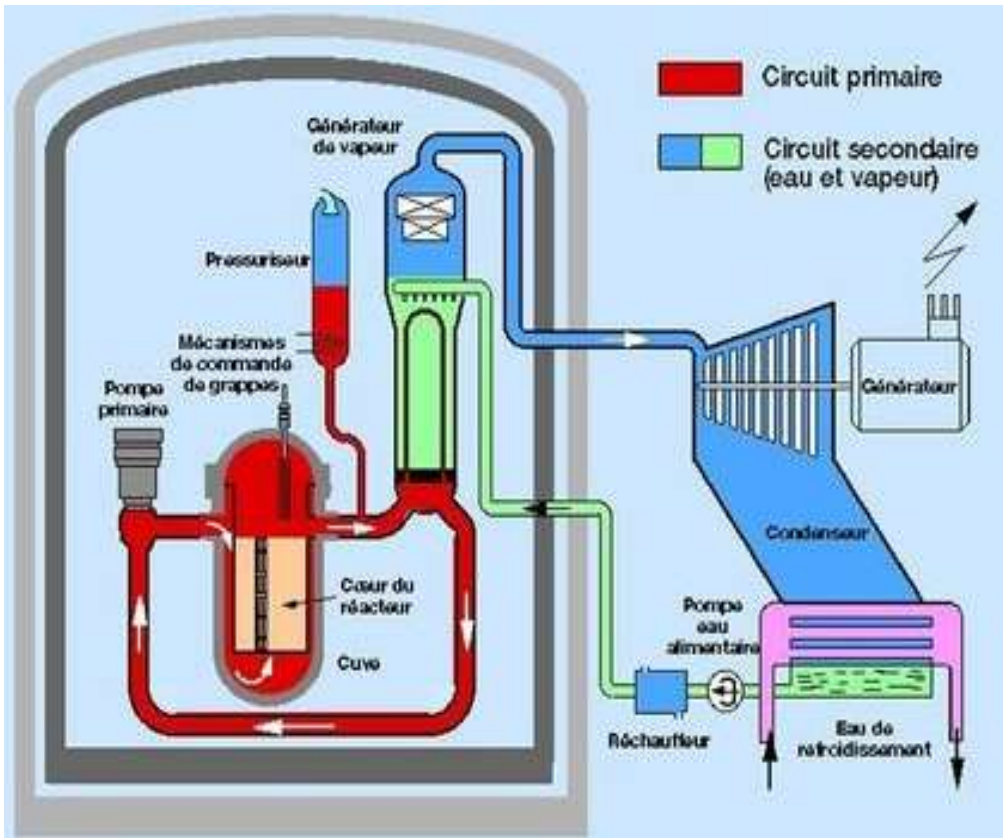


Le REP « PWR »

Les circuits primaire (radioactif en rouge) et secondaire (vapeur et eau en bleu et vert) sont distincts. Ils sont isolés du reste de la centrale par des barrières de métal et de béton.

La sécurité est dite « **active** ». les pompes primaires sont indispensables en permanence, sinon c'est l'accident de « dénoyage du combustible ».

Leur puissance (redondante) représente -par exemple pour l'EPR- quatre pompes de 8 MWe. Elles doivent évacuer l'énorme chaleur restante, même après un arrêt d'urgence



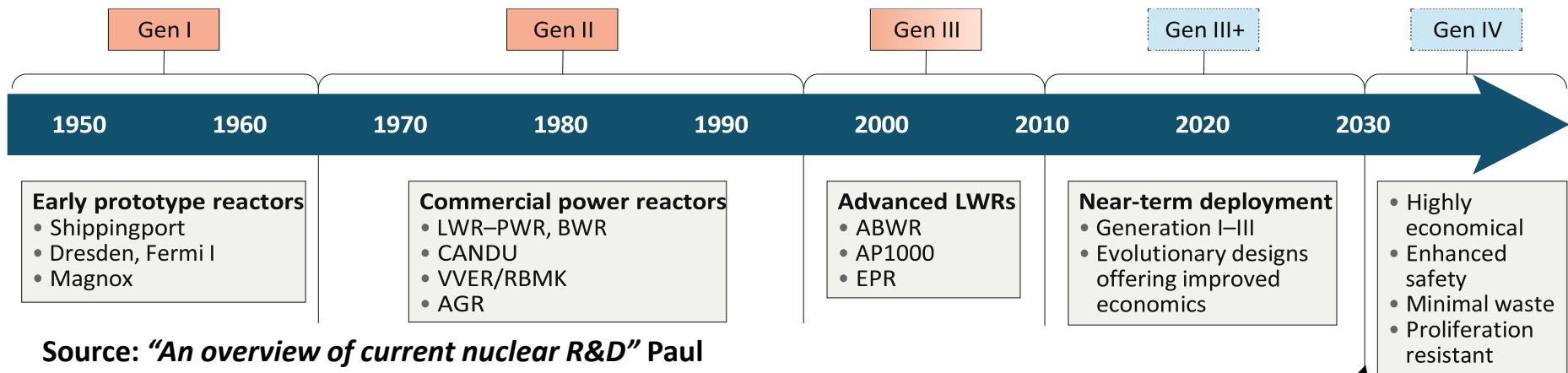
Le réacteur PWR de 1956 et les derniers réacteurs construits [ci-contre schéma Framatome] utilisent un cycle thermodynamique proche.

Dénoyage du combustible et fusion du cœur à Fukushima :

https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_FAQ_14mars2011.pdf

Et les autres réacteurs ?

Aux Etats-Unis, une partie des partisans du nucléaire souhaitent le « retour à la planche à dessin »...et s'opposent à la politique du « lièvre » dont celle de Bill Gates, de « Terrestrial Energy » ou de « OKLO »... [https://www.energy.gov/seab/downloads/final-report-task-force-future-nuclear-power] [https://www.thirdway.org/report/the-advanced-nuclear-industry]



Source: "An overview of current nuclear R&D" Paul Howarth 14 Feb. 2019, Nature Reviews Physics

Le souhait (rêve?) de la filière:

1. Economique
2. Sûr
3. Déchets minimaux
4. Pas de prolifération

La 4G on connaît



Le réacteur de Creys-Malville de « 4^{ème} génération », lancé en 1977, a été démarré en 1985. Le combustible et la couverture d'uranium sont censés « surgénérer » c'est-à-dire produire plus de transuraniens utiles que ceux consommés mais ceci n'a pas été démontré durant son fonctionnement. Le démantèlement se poursuit, il faut neutraliser les milliers de m³ de sodium radioactifs.

Superphénix, déconstruction d'un mythe. Christine Bergé, La Découverte, 160 p., 13 euros

A noter que ASTRID, le successeur potentiel de Superphénix lancé par Jacques Chirac, a été annulé en 2019 (voir plus loin).

La France a dépensé une cinquantaine de milliards de francs sur **Superphénix** (Cour des Comptes) un réacteur de « **quatrième génération** ». Il n'a rempli aucune des quatre conditions énoncées précédemment:

[Economique; Sûr; Déchets minimaux; Pas de prolifération].

Sa puissance est de **1240 MW** contre 250 MW pour le réacteur Phénix qui précède. Il est alors qualifié de « tête de série » puis plus prudemment de « prototype ».



**DR.
E. BROWN**
ENTERPRISES
24 HOUR SCIENTIFIC SERVICE/HILL VALLEY/CALIFORNIA

Le Docteur Emmet Brown de la saga « Retour vers le Futur » se fait voler ses barres de plutonium par des terroristes.

Plus sérieusement, l'utilisation du plutonium dans un réacteur civil pose des difficultés de plusieurs ordres : prolifération, retraitement, risque de sécurité, ou encore l'usage de cycles complexes et dangereux tels que celui au Sodium fondu de Superphénix.

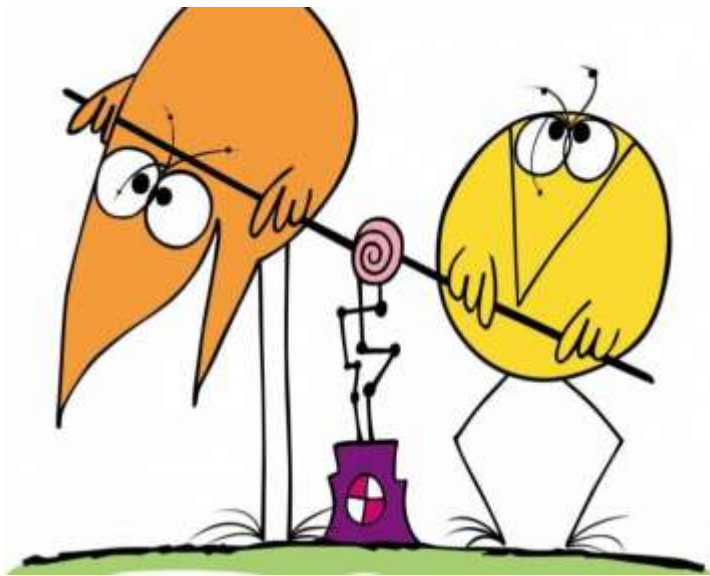
En réalité, la pénurie d'uranium semble s'être éloignée avec de nouveaux gisements (tels que Cigar Lake au Canada) et une construction limitée de réacteurs dans le monde.

Il n'est donc pas certain que le passage à un mini-réacteur doive se combiner à un changement de combustible qui multiplie encore le risque d'échec.

Superphénix?

Entre 1985 et 1997 la production du réacteur est de 8 TWh contre 120 de productible (**7% de charge!**) suite à de nombreux incidents documentés. En particulier, le « sas » de recharge de combustible en continu (« barillet ») n'a pas fonctionné. Cela n'empêche pas les partisans de la 4^{ème} génération de parler de « problèmes administratifs ou politiques »!

Par exemple selon « Le Réveilleur » le réacteur est « arrêté pour raisons politiques et économiques » « la filière et la recherche associée ont déjà été victimes des turpitudes de la vie politique » [le réveilleur <https://www.youtube.com/watch?v=uIXEnRB7TXc&t=24s> à 33' et à 36']



Logique Shadok : « pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué? »[Rouxel]

Le réacteur porté par CNRS, CEA, Framatome, et EDF. Aramis produirait 300 MWth, alimentés par des combustibles liquides, mélanges de sels [NaCl, MgCl₂, PuCl₃, AmCl₃, UCl₃ à 800°C], avec traitement à La Hague. Le projet s'inscrit dans le cadre d'un prolongement du retraitement des combustibles.

Sels liquides

Un autre type de réacteur utilise un mélange de sels liquides fondus MSR pour « Molten Salt Reactor ». Le combustible est alors aussi le caloporteur qui circule dans le cœur du réacteur.

Cela suppose de **traiter le liquide** pour limiter son « empoisonnement » progressif par des contaminants issus de la fission.

Accident : une fusion du cœur du réacteur va être moins probable car en cas d'avarie le combustible (liquide) va s'éloigner du cœur. Le risque vient plutôt de la criticité des déchets liquides concentrés, par exemple lors de transvasement dans des seaux [*cf. accident japonais dans un centre de retraitement qui rappelle –en tragique– la série « les Simpsons »*]



Retour vers le futur. Le Docteur Emmet Brown (joué dans la saga par Christopher Lloyd) aurait apprécié la proposition Naarea, faite au nom des *objectifs du développement durable* (sic)!

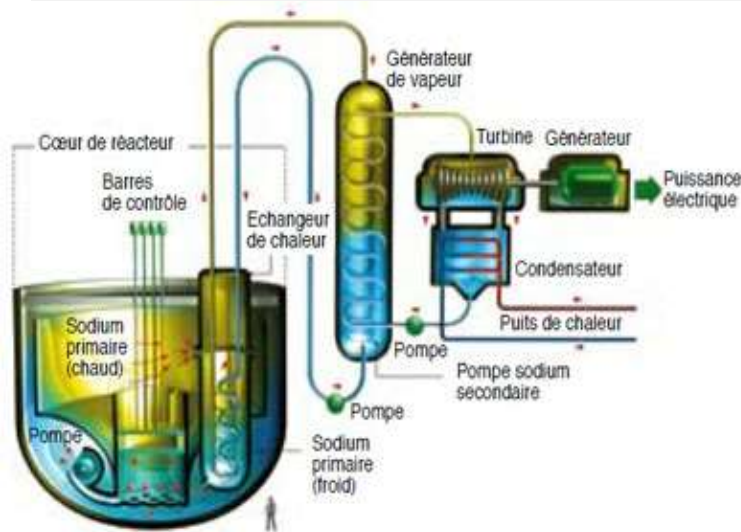
Rétro-futuriste

La start-up Naarea propose de créer un réacteur à sels fondus particulièrement complexe.[au conditionnel] Elle partirait d'uranium « classique », de plutonium de La Hague mélangé à des déchets. Elle se revendique même du surgénérateur via une couverture en thorium (prévue pour plus tard).,

« Les études initiales de Naarea portaient sur un combustible fluorure d'uranium enrichi à près de 20% avec l'ajout de fluorure de plutonium et d'actinides mineurs issu des REP actuels. Le tout devait être solubilisé dans du fluorure de lithium enrichi en 7F, pour éviter la formation de tritium. »

La société se serait convertie aux sels de chlore plus compatibles avec les installations de La Hague qui fournirait le plutonium », selon l'Académie des Sciences (rapport 10_2022), qui ne cache pas son scepticisme. La production d'énergie passe ensuite par un cycle au CO2 supercritique pour la conversion en électricité.,,,,,,, [pourquoi faire simple?]

Franco-français



Le projet ASTRID lancé sous Jacques Chirac en 2006 reçoit (déjà!) « un milliard d'Euro » sous Nicolas Sarkozy pour développer un successeur à Superphénix [**sodium fondu, plutonium, couverture fertile d'uranium**]. Il est abandonné vers 2019. Un tel réacteur est en effet vain faute de besoin tendu en combustible nucléaire.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Astrid_\(r%C3%A9acteur\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Astrid_(r%C3%A9acteur))

B. Dessus 2019 Global Chance

<https://www.global-chance.org/Reacteur-Astrid-l-effondrement-brutal-d-un-mythe#article>

- L'industrie nucléaire est considérée de longue date à Bercy [participations de l'Etat] comme stratégique, au même titre que l'armement. Pour la survie de son nucléaire, la France est donc prête à un peu de « coulage » [voir plus loin les mini-réacteurs]

Cela inclut aussi **des intérêts particuliers ou de l'Etat**. Par exemple, Technicatome (bureau d'études qui conçoit et construit avec DCN les propulsions de vaisseaux nucléaires), reçoit une mission sur les mini-réacteurs, quelques semaines après que la France a perdu un énorme marché de sous-marins australiens. Il est aussi très bien placé pour les fonds de relance « verte »

Macron à Belfort

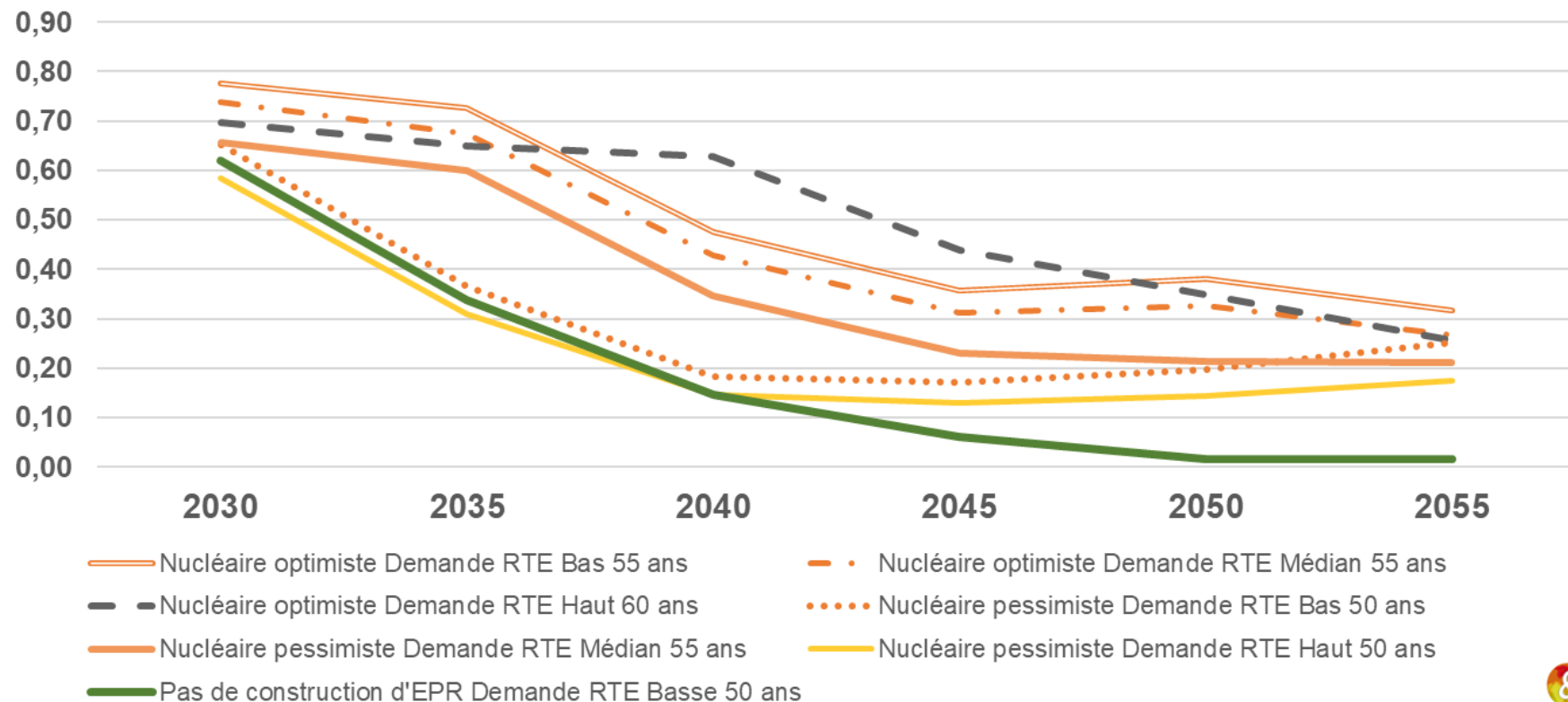


ENR bashing. Chez Macron, les renouvelables sont majoritaires (40 GW d'offshore, 37 GW d'éolien terrestre... soit 50% de la production plus 100 GW de solaire PV).

Le nucléaire garde pourtant sa « priorité » idéologique. Des cycles avancés sont aussi prévus....

Taux du nucléaire

Le taux d'énergie nucléaire dans la production électrique française dépend du scénario de demande considéré. Sur la base les **projections de référence de RTE 2021**, cette proportion baisse fortement.



Plan



- 1. C'est quoi un mini-réacteur. Expert Minute**
- 2. Les cycles proposés pour les mini-réacteurs**
- 3. Le cadre de la transition, et les trois risques : Prolifération; Déchets; Accidents**
- 4. Démographie des réacteurs et situation mondiale rabougrie**
- 5. Une France spécifique**
- 6. Economie industrielle et petits réacteurs**

Une révolution scientifique 1945

DEUXIÈME ANNÉE. — N° 199.

PRIX : 3 francs

DERNIÈRE ÉDITION

* MERCREDI

Directeur Robert BEVE-MERY

Comité de Direction :
Karl COURTIN
Christian FUNCK BRENTANO

Direction, Rédaction et Administration :
5, rue des Italiens - PARIS

Adresses télégraphiques : JOURMONDE-PARIS

TÉLÉPHONE : Cinq lignes, 111.111 - TAILOUT 16.48

PRIX DE L'ABONNEMENT

PARIS ET DÉPARTEMENTS } Six mois
Trois mois

LES ABONNEMENTS PARTENT DES 1^{er}, 15 et 31 DE CHAQUE MOIS

Un numéro (PARIS et DÉPARTEMENTS)

ABONNEMENTS à l'étranger : voir Service de "MOROSE", 5, rue de Valenciennes, PARIS 11^e - CHÈQUE POSTAL : PARIS N° 4207

Le Monde

Paris, le 7 août 1945.

BULLETIN DE L'ÉTRANGER

LE PROBLÈME ESPAGNOL

On a lu hier, dans nos colonnes, la réponse que le général Franco a faite, par la radio, au communiqué de Pékin. Il répondait comme « arbitraires et injustes » les expressions concernant son régime, où il voit le résultat « de la campagne diffamatoire des réfugiés rouges et de leurs acolytes à l'étranger ».

Après une brève allusion à la conférence de San-Francisco — qui avait déjà exclu l'Espagne franquiste du cercle des Nations unies — le Caudillo déclare fièrement que l'Espagne ne demandera pas à être admise aux futures réunions internationales et qu'elle n'acceptera rien qui ne soit compatible avec sa tradition et les services qu'elle a rendus à la paix et à la culture humaine... Et il rappelle que des « raisons semblables l'avaient déjà empêché, alors qu'elle était encore une monarchie, à se retirer de la Société des Nations... ».

Cela n'empêchera pas, au reste, l'Espagne de « continuer à collaborer à l'avantage de la paix et de la justice ».

Une révolution scientifique

LES AMÉRICAINS LANCENT LEUR PREMIÈRE BOMBE ATOMIQUE SUR LE JAPON

Washington, 6 août. — La première bombe atomique de cette guerre a été lancée aujourd'hui par un avion américain sur l'importante base navale d'Hiroshima, dans l'île de Honshu.

C'est le président Truman lui-même qui, par un communiqué, a annoncé à la Maison-Blanche la mise en action de cette nouvelle bombe, dont la force d'explosion est 2.000 fois celle de la plus grande bombe connue jusqu'à présent dans l'armée américaine.

LA DÉCLARATION DU PRÉSIDENT TRUMAN

En annonçant lui-même que la première bombe atomique avait été lancée par un avion américain sur la base navale d'Hiroshima, le président des États-Unis a précisé que le nouveau projectile est le résultat de recherches commencées dès 1940. « Nous avons maintenant, a-t-il dit, deux grandes usines et plusieurs établissements consacrés à sa fabrication. Plus de 45.000 ouvriers y sont employés. Nous avons dépensé deux milliards de dollars et nous sommes prêts à en dépenser encore deux milliards ».

Oppenheimer, de l'université de Californie, a expérimenté la bombe atomique au champ d'aviation d'Alamo-Grordo (Nouveau-Mexique). L'engin fut placé au sommet d'une tour d'acier, puis les techniciens se retirèrent à une vingtaine de kilomètres.

À l'instant de l'explosion, une fleur aveuglante éclaira la région entière. L'onde se serait cru, malgré la nuit, en plein midi. La chaîne de montagnes située à cinq kilomètres des observateurs se détachait en plein relief. Puis il y eut un roulement, un grondement soutenu et un déplacement d'air que tout le monde sentit et qui fit tomber deux des hommes de la mission. Immédiatement, les autres

Soixante villes japonaises sont maintenant détruites

Six cents superforteresses ont attaqué hier six nouvelles villes japonaises. Un seul appareil n'est pas rentré à sa base. Les quartiers industriels de Toyama, ville de 127.000 habitants, dans l'île de Honshu, notamment, ont été totalement rasés. On estime qu'un total soixante villes japonaises sont maintenant détruites. La population de quatorze d'entre elles avait été prévenue avant les raids.

Le Q. G. du général Mac Arthur communique que plus de 400 bombardiers et chasseurs américains ont attaqué les objectifs militaires du port de Tsurumi, au sud de Kios-Siou. C'était la plus puissante attaque coordonnée sur un seul objectif.

On estime à Londres que la guerre contre le Japon va entrer dans une phase nouvelle après les bombardements massifs des centres industriels et la prise de commandement par le général Mac Arthur des forces alliées allant de Formose au sud du Japon. Les commentateurs britanniques constatent l'efficacité

ENTRETIENS TURCS A BEYROUTH

Beirut, 6 août. — À Ankara, la délégation turque a participé à la conférence de Casco, à ce des entretiens sonnaillés officielles du syrien sur la possibilité offerte pour la reconnaissance de l'indépendance et du Liban.

La Turquie, qui a déjà les rumeurs sur ses intentions en Algérie, demande que la Syrie réclame pas le Sandrette. — (A. P.)

LE BILAN DE L'ÉP EN BULGARIE

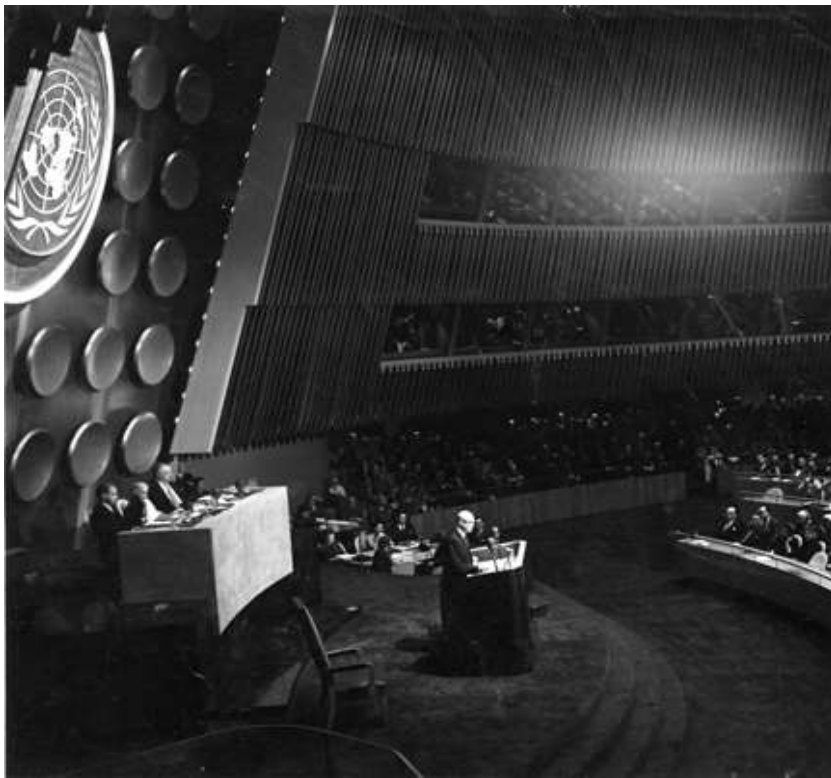
Sofia, 6 août. — Depuis peu dernier, date à laquelle a rompu avec l'Allemagne, aux côtés des Alliés, l'ÉP a été condamné à mort par les Bulgares.

D'autre part, sur les conseils à la cour et d'habiles de la politique prépayés et tracés, on justice condamné à la peine capitale 1521 personnes ont été co-détention perpétuelle, sans autres doivent subir d'emprisonnement.

Enfin, sur les 618 prisonniers que comptait la Bulgarie...

L'un des titres les plus malheureux du journal Le Monde...

La promesse



<https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech>

Document Librairie présidentielle Eisenhower

Le discours “**Atoms for Peace**” de 1953 du Président Eisenhower aux Nations-Unies donne lieu cinq ans après à l’**Agence Internationale de l’Energie Atomique (AIEA)**.

L’AIEA vise deux objectifs parfois contradictoires :

- Promouvoir l’**utilisation de l’énergie nucléaire à des fins pacifiques** et veiller à ce que cette technologie **ne puisse servir à des fins militaires** en vue de produire une arme nucléaire
- Les questions de **sûreté nucléaire** sont ajoutées par la suite.

Quelles conséquences?



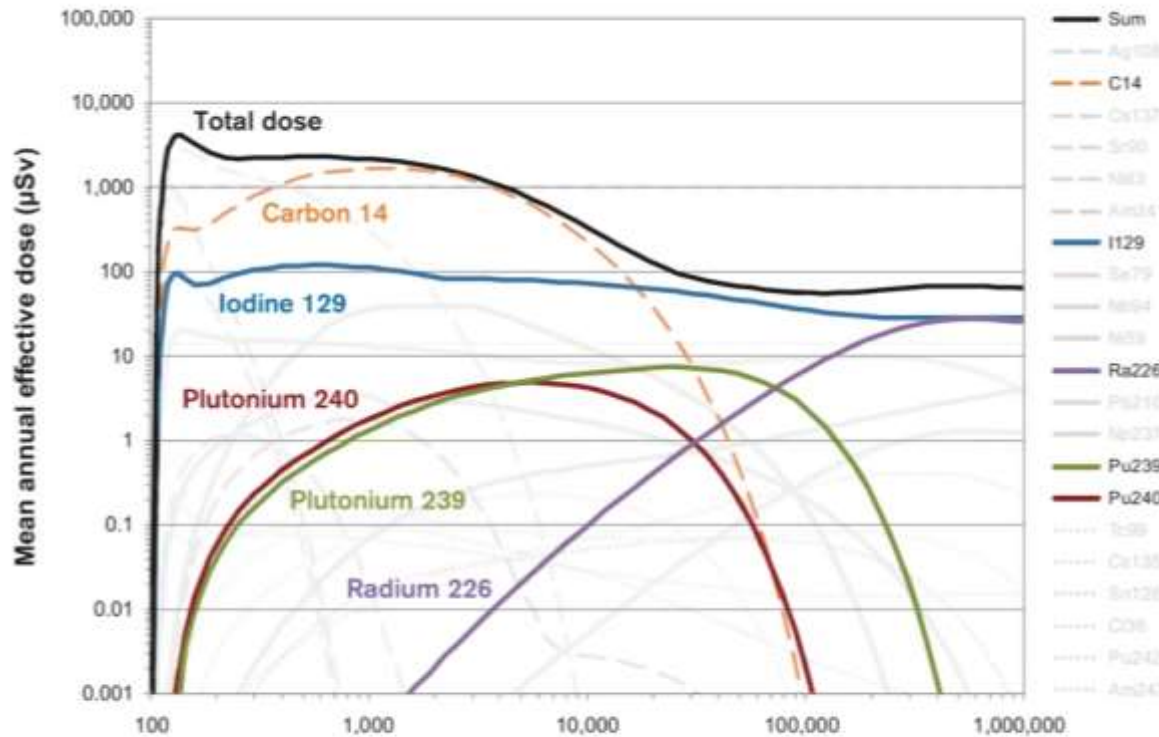
L'AIEA représente un système de conseil et de contrôle de sûreté inscrit dans le système de l'ONU, avec ses failles et ses atouts*. Il s'agit en effet d'un système « intergouvernemental » où la critique des Etats reste très limitée. L'AIEA joue aussi un rôle délétère quant au régime de protection contre les radiations.

Surtout, le nucléaire se confirme comme **une prérogative exclusive des Etats**. Beaucoup d'institutions multilatérales refusent de financer le nucléaire.

[* Il n'y a que dans James Bond que des méchants volent du plutonium – mais les Etats moins sérieux voire délinquants restent impunis]

Le contrôle des matières nucléaires limite fortement le commerce des combustibles nucléaires pour des états qui « font la bombe ». Ainsi l'Inde, qui se retrouve en violation du TNP après son « Expérience Pacifique Nucléaire » (explosion) de 1974, ne peut plus alimenter son programme militaire ni ses centrales pendant 20 ans.

Déchets



Echelle logarithmique en Années

Ci-dessus: Dose estimée à très long terme pour un fermier à la surface d'un dépôt de déchet pour plusieurs isotopes comme le plutonium ou l'iode 129. [Agence Suédoise des Déchets, SKB]

Les déchets nucléaires à vie longue durent des centaines de milliers d'année.

Ces durées sidérantes posent des problèmes techniques, démocratiques, philosophiques.

Les déchets viennent de l'**activation** des constituants du réacteur nucléaire; de la **production du combustible**, depuis la mine aux transformations jusqu'au chargement dans le réacteur; du **combustible usé**; du **retraitement** du combustible le cas échéant.

Référence sur le sujet (2005) : <https://www.global-chance.org/Petit-memento-des-dechets-nucleaires>

Déchets

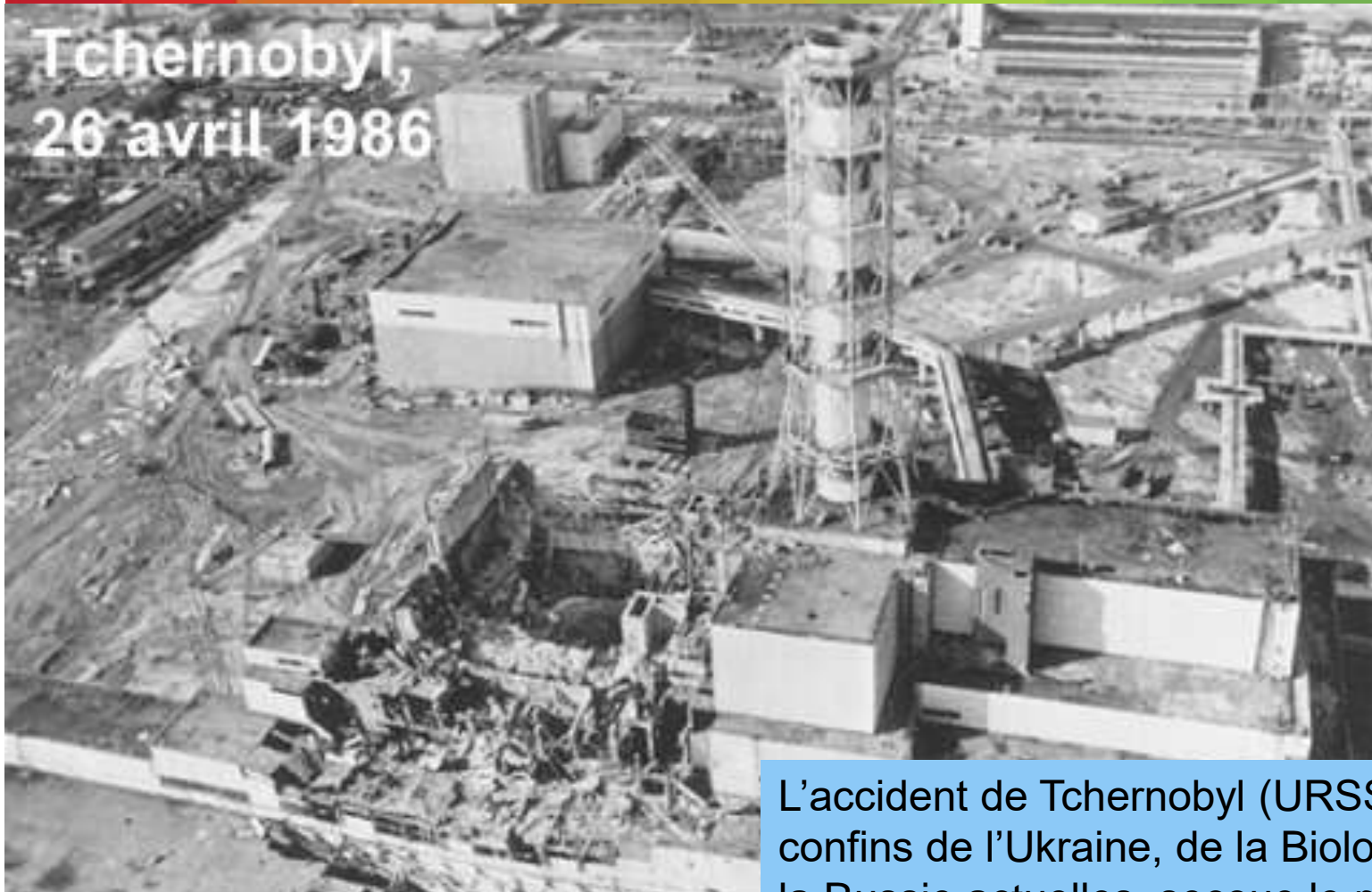


Occupation du bois Lejuc à Bure (document Reporterre).

Les oppositions au stockage des déchets nucléaires sont emblématiques des luttes écologiques de longue durée: Yuka Mountain aux USA, Gorleben en Allemagne, Bure en France.

La question des déchets nucléaires reste une épine dans le pied de l'industrie nucléaire. Elle est source d'oppositions farouches, de problèmes techniques et d'une gouvernance *impossible*. Elle bloque le développement ou l'accession du nucléaire dans un grand nombre de pays. En France, le devis officiel du stockage des déchets à vie longue est de plusieurs dizaines de milliards d'Euro.

Sureté, les certitudes mises   bas



Tchernobyl,
26 avril 1986

L'accident de Tchernobyl (URSS), aux confins de l'Ukraine, de la Biolorussie et de la Russie actuelles, secoue le monde. Ses conséquences incluent l'accélération du démantèlement de l'URSS de Gorbatchev.

Kraftwerk version Tchernobyl:

<https://www.youtube.com/watch?v=gg7CSMFpwao>

Fukushima après Tchernobyl

Fukushima
mars 2011



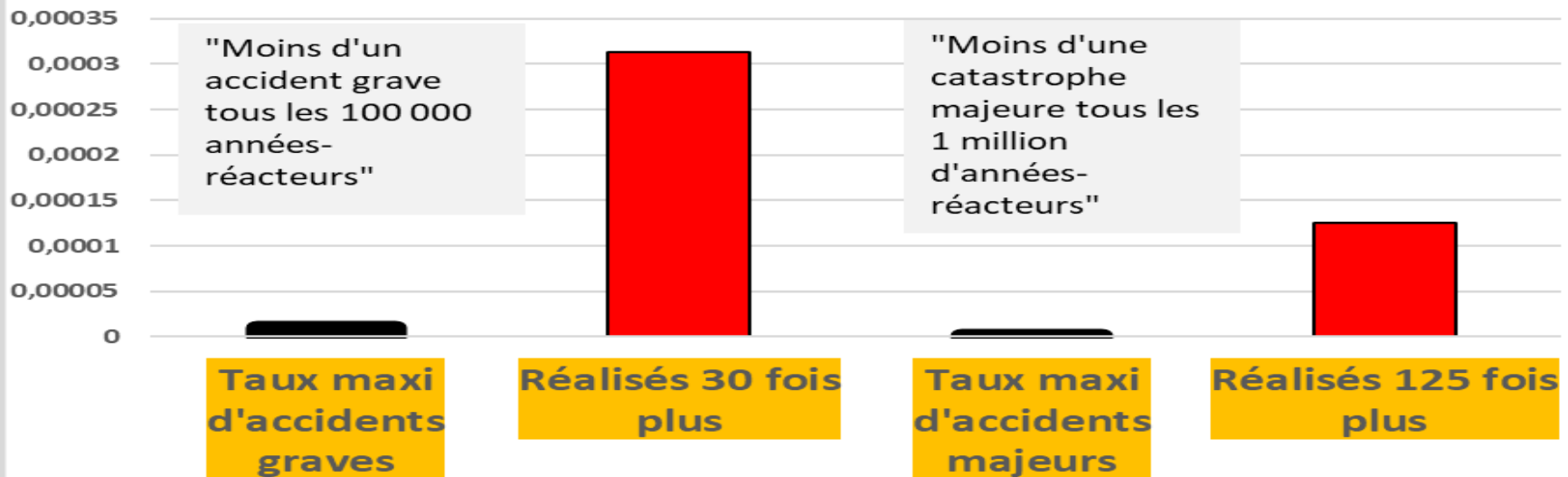
Fukushima par Kraftwerk:

<https://www.youtube.com/watch?v=gg7CSMFpwao>

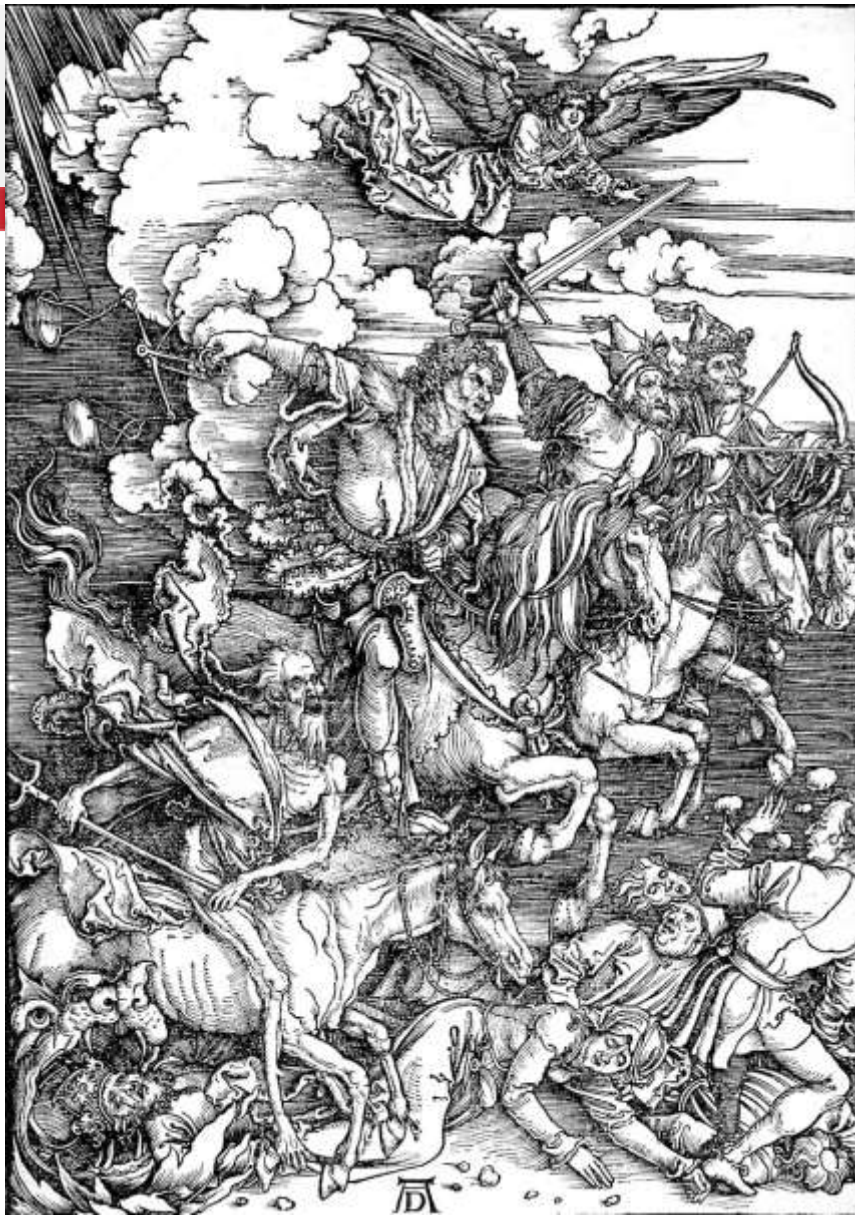
Le Tsunami de mars 2011 sur la côte Est du Japon entraîne la fusion de trois réacteurs à la centrale de Fukushima, suite à des explosions d'hydrogène spectaculaires. Dans le chaos qui suit, l'évacuation de Tokyo est évitée grâce à un changement de vents.

L'industrie de l'atome face à la réalité

Les occurrences d'accident réalisées depuis le « Price-Anderson Act » des années 50 (exemption d'assurance) dépassent largement les engagements de l'époque, basées sur des calculs de probabilité (ou d'*espérance mathématique*) utilisant des *arbres de défaillance*. Ces derniers ont été invalidés par les causes externes des accidents mais aussi par le caractère non-indépendant et non prévu de nombreuses causes d'incidents.



Selon l'industrie nucléaire, deux catastrophes seulement sur 60 ans et 16 000 années-réacteurs sont la preuve que le nucléaire est sûr <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>



Trois risques

Prolifération, déchets, accidents.

Les trois grands risques du nucléaire (“et **la mort** les suit”) vont être la motivation essentielle du refus du public, et de la contradiction avec les objectifs du développement durable (ODD) de l’ONU.

Ce refus “anti-nucléaire” voire “idéologique” va aussi masquer le handicap industriel et économique très fort, induit par ces trois risques (regulations, coûts, freins sur les échanges internationaux...).

L’industrie du nucléaire n’est pas “comme les autres”.

Les trois dangers centraux : **prolifération, déchets, accidents**... [la Conquête, la Guerre, la Famine et le quatrième cavalier, la Mort, d’après l’Apocalypse de Dürer 1498].

Bande son (Johny Cash) ici: <https://www.youtube.com/watch?v=k5dYxX-PNno>



Gro Harlem Brundtland, ancienne Première Ministre de Norvège, est créditée de la définition la plus courante du Développement Durable : « *Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* »

Nucléaire insoutenable

La notion de **soutenabilité** énonce en particulier la finitude de la planète. La critique du Développement Durable, notion connexe, pose la question de la croissance économique de long terme, source de nombreux débats et critiques dans les mouvements écologistes.

Au-delà de ces critiques, cette notion reste **fondamentale pour les mouvements écologistes** (ONG et politiques) et ceci dans le monde entier. Or **chacun des trois risques du nucléaire** est très problématique pour les générations futures, c'est ce qui explique la grande universalité de l'opposition face au nucléaire.

Ainsi, résumer les anti-nucléaires à une fraternité de lutte des années 70-80 ou à une réalité *obsolète* est un raccourci abusif.

Autres arguments politiques



Ci-dessus, **Mines d'Uranium** à Arlit dans le [Sahara](#) au nord du [Niger](#). Ci-dessous suites d'un **essai nucléaire** en Polynésie.



Les « trois risques » ont donné lieu à de nombreux développements philosophiques et politiques.

- ✓ Ulrich Beck ou André Gorz soulignent le caractère fondamentalement **centralisé et technocratique** du nucléaire.
- ✓ Grothendieck et les anarchistes insistent sur son caractère inéluctablement **policier**, incompatible avec la démocratie
- ✓ Les mouvements **anti-colonialistes** montrent le caractère profondément **inégal et immoral** de l'exploitation minière (et des essais militaires d'Algérie et de Polynésie) pour des populations sans perspective d'en bénéficier.

Quelle que soit leur validité, ces arguments restent « idéologiques » c'est-à-dire qu'ils reflètent une « vision du monde » [A. Touraine]

LE MONDE SANS FIN LE CORRIGÉ !

UNE LECTURE CRITIQUE PAR GHISLAIN DUBOIS - ILLUSTRÉE PAR NICOLAS CARUSO



Voir par exemple la bande dessinée « BLAIN Christophe et JANCOVICI Jean-Marc, *Le Monde Sans Fin*, Dargaud, 2021, mais aussi *Le Corrigé* par C. Dubois et N. Caruso.

https://www.lemondedesansfin-lecorrige.fr/wp-content/uploads/LeCorrige_28022023.pdf

Les falsificateurs (1)

Les extrémistes du nucléaire vont nier l'existence même des trois risques. Selon eux:

- *L'accident nucléaire a fait peu ou pas de morts au point d'être tolérable pour le monde.*
- *Les déchets nucléaires sont en très petite quantité et peu dangereux, pas différents dans leur nature des risques chimiques.*
- *La prolifération nucléaire est maîtrisée, impossible de faire la bombe avec les composés utilisés dans l'industrie civile; [variante « pseudo-gaulliste » : des pays souverains ont droit comme les autres à disposer de la bombe].*

Cette vision extrême s'est répandue sur les plateaux TV et les représentants politiques, suivant le principe de la « *fenêtre d'Overton* ».

Les falsificateurs (2)



Michael Shellenberger (Breakthrough Institute). Selon lui, les catastrophes de [Tchernobyl](#), [Fukushima](#) et [Three Mile Island](#) montrent en réalité que le nucléaire est sûr. Il y avance aussi l'idée que le nombre de morts liés à la catastrophe de Tchernobyl est largement surestimé et qu'il serait au maximum de 200 [wikipedia]

Michael Shellenberger lance en 2015 un *manifeste éco-moderniste*. Ce texte propose de **cesser de se donner des objectifs de développement durable** et de réduire l'empreinte de l'homme en utilisant la nature de manière plus intense, le développement économique étant une condition préalable à la préservation de l'environnement.

En 2020, son livre *Apocalypse Zéro: Pourquoi l'alarmisme environnemental est dangereux* pousse le bouchon encore plus loin en niant les effets des changements climatiques sur les événements extrêmes. Il rejoint une partie des « anti-alarmistes » en dérive sceptique du climat comme Marc Fontecave (Collège de France)(**). Un autre personnage-clé du discours « *les écolos sont devenus nucléaristes* » est Michael Moore, un ancien de Greenpeace devenu sceptique du climat et ultra-pronucléaire. L'introuvable mouvement *écolo pronucléaire* est souvent synonyme d'*astro turf* (une sorte de fausse pelouse verte aux USA).

(*)<https://www.theguardian.com/environment/2020/jul/04/the-environmentalists-apology-how-michael-shellenberger-unsettled-some-of-his-prominent-supporters>

(**) https://www.lepoint.fr/debats/marc-fontecave-pour-sauver-le-climat-il-existe-d-autres-voies-que-la-decroissance-19-12-2020-2406496_2.php



Les falsificateurs (3)

Indépendance Énergétique. Les 500 pages du rapport de l'Assemblée Nationale d'avril 2023 ne mentionnent pas les mots « prolifération nucléaire », « masse critique », « bombe atomique » ou « terrorisme nucléaire ». De plus, Fukushima ou Tchernobyl seraient *tellement spécifiques* que cela ne remet pas en cause l'excellence de la filière en France contre l'accident:

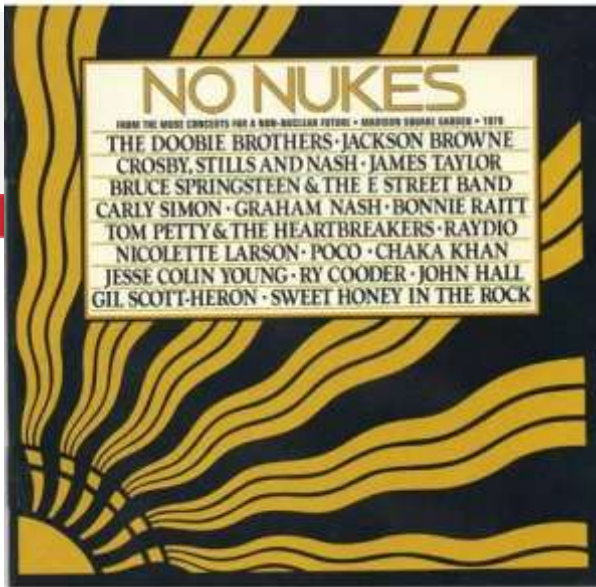
[p.151] §f. ***Une sûreté et une sécurité unanimement reconnues.***

Ces accidents nucléaires relèvent heureusement de circonstances exceptionnelles liées à une succession d'erreurs humaines graves résultant d'une impréparation et d'un manque d'anticipation. Ayant appris de ces accidents, les autorités de régulation, notamment les autorités françaises, ont adapté leur approche de la sûreté nucléaire et pris des mesures en conséquence.

Raphaël Schellenberger, homonyme du précédent et député de Fessenheim (LR, 4^{ème} Haut-Rhin), a présidé la commission d'enquête « indépendance énergétique ». Un texte de parti-pris assez représentatif des propos tenus à l'Assemblée Nationale.

<https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/organes/autres-commissions/commissions-enquete/ce-independance-energetique> Voir aussi page 437 la contribution très complète de Julie Laernoes au nom du groupe Écologiste-NUPES

OK Boomers (1)



Mettre en balance les risques nucléaires avec la questions climatique mérite le débat. Les trois risques majeurs -s'ils sont pris au sérieux- disposent d'une panoplie de techniques et de règles, appréhendables au moins sur le court-moyen terme.

Mais la **négation des risques** et la **falsification des alternatives** relèvent du sabotage de la transition. De tels arguments sont aussi très **insultants pour les professionnels du nucléaire**, qui assurent au quotidien la sûreté ou la non-prolifération, et qui réalisent le dangers et les limites du nucléaire.



Concert No Nukes (1979) à New York Bruce Sprinsteen

<https://youtu.be/eFE78WbrZjc>

Intergénérations: Le même *boomer* a sa chanson « Badlands » en générique de fin de « Gardiens de la Galaxie III »



OK Boomers (2)

Le débat nucléaire met en balance des coûts et des règles drastiques sur le nucléaire, face au risque climatique posé en priorité absolue.

Cette forme d'ultra-réalisme radical pose cependant question :

- Il suppose d'accepter aussi des compromis à grande échelle sur les ressources à court terme telles que recensées par le GIEC [ENR en particulier]
- Il suppose de donner priorité aux ressources les moins chères, les plus équitables et les plus rapides à mettre en œuvre

Sur ces deux points, nous verrons que le nucléaire est désormais **mal placé voire hors jeu**. Par contre, dans ce débat, la question du **prolongement de parcs existants** va se poser différemment de la construction de nouveaux réacteurs, ou encore des propositions exotiques de mini-réacteurs.

Problèmes induits



Ce sont ces risques réels et « consubstantiels » de la réalité nucléaire et les coûts induits qui rendent inéluctable une stagnation de l'industrie nucléaire, pas une « appétence » ou un « désamour » du public.

<https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2022-.html>

Une industrie bonzaï. Les trois risques majeurs de l'industrie nucléaire bloquent sa croissance mondiale. Le consensus actuel pour 2050 et au-delà, est une fourchette de 5-10% de la production mondiale d'électricité [AIE, AIEA, GIEC AR6...]:

- ✓ Ce **développement industriel plafonné** ne permet pas une baisse des coûts via l'apprentissage et via les effets de taille. L'industrie nucléaire ne peut plus rattraper les alternatives devenues dominantes.
- ✓ Le nucléaire n'est ainsi **pas à l'échelle** ni dans les temps **pour lutter contre les changements climatiques**, même en payant beaucoup plus cher, et en acceptant des compromis sur les risques.

[Ces points sont détaillés plus loin].

Le risque géopolitique



La centrale de Zaporizhzhia, la plus grande d'Europe, est occupée depuis mars 2022, Elle a été bombardée, coupée du réseau, menacée par la baisse des eaux de la retenue sur le Dniepr...
<https://youtu.be/RZQETfzKfH4>

En quelques années, les risques d'accident, les déchets et de la prolifération nucléaire croisent l'actualité:

- ✓ Submersion et inondations (vu au N°1)
- ✓ Risque des centrales en zone de guerre: ex-Yougoslavie, Israël et Proche-Orient, Ukraine
- ✓ Risques d'attentats terroristes sur des installations nucléaires non durcies (soit presque toutes)
- ✓ Risques sur le stockage des déchets et de combustibles usés
- ✓ Transport par avion de combustibles
- ✓ Craintes de détournement de matières nucléaires par des états-voyous



A Fort Calhoun au Nebraska en 2011, une inondation catastrophique du fleuve Missouri menace la centrale durant plusieurs mois

https://en.wikipedia.org/wiki/Fort_Calhoun_Nuclear_Generating_Station

Sur la couverture médias insuffisante:

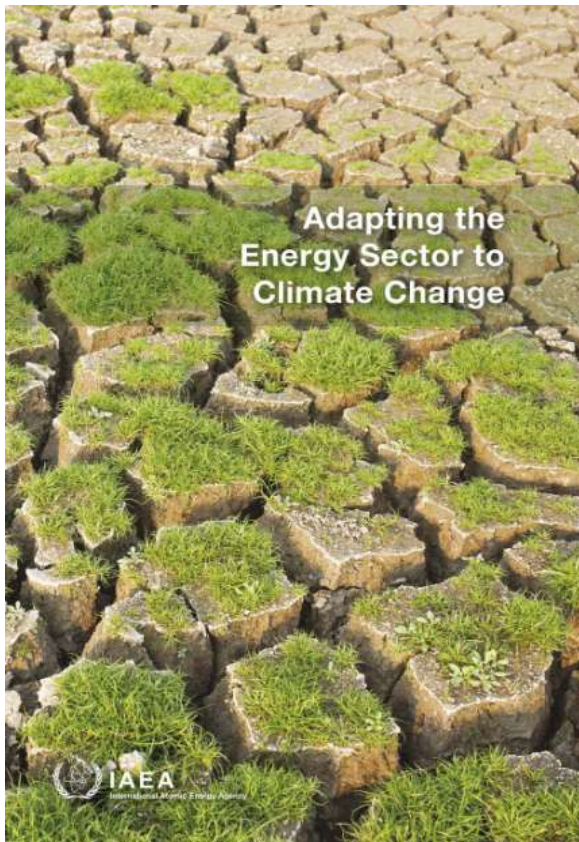
<https://thebulletin.org/2011/06/rising-water-falling-journalism/#post-heading>

Vulnérabilité

Inondations, événements extrêmes, tempêtes, sécheresses, températures élevées des eaux de refroidissement... tous ces phénomènes sont multipliés avec les changements climatiques.

Le rapport AR6 du GIEC en 2021 estime que les canicules extrêmes seront multipliées par trois pour un réchauffement global de 2°C par rapport au réchauffement actuel (1°C)

Adapter l'énergie



Adapting the
Energy Sector to
Climate Change

Adapting the Energy Sector to Climate Change est publié en 2021 par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique. Le vieillissement et le risque accru du nucléaire y sont plus inquiétants que les pertes de production

Le réchauffement climatique mondial a de nombreuses répercussions sur la production d'énergie. Selon l'AIEA et le GIEC, ce sont d'abord les centrales thermiques qui sont menacées.

[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf page 663 et suivantes]

Des pertes de rendement jusqu'à 15% sont annoncées notamment durant la période d'été. Pour les centrales sur fleuve en circuit direct de refroidissement ou en évaporation forcée un risque de limitation de production (température de l'eau) voire d'arrêt si le débit est insuffisant (ex. sur la Meuse en 2020).

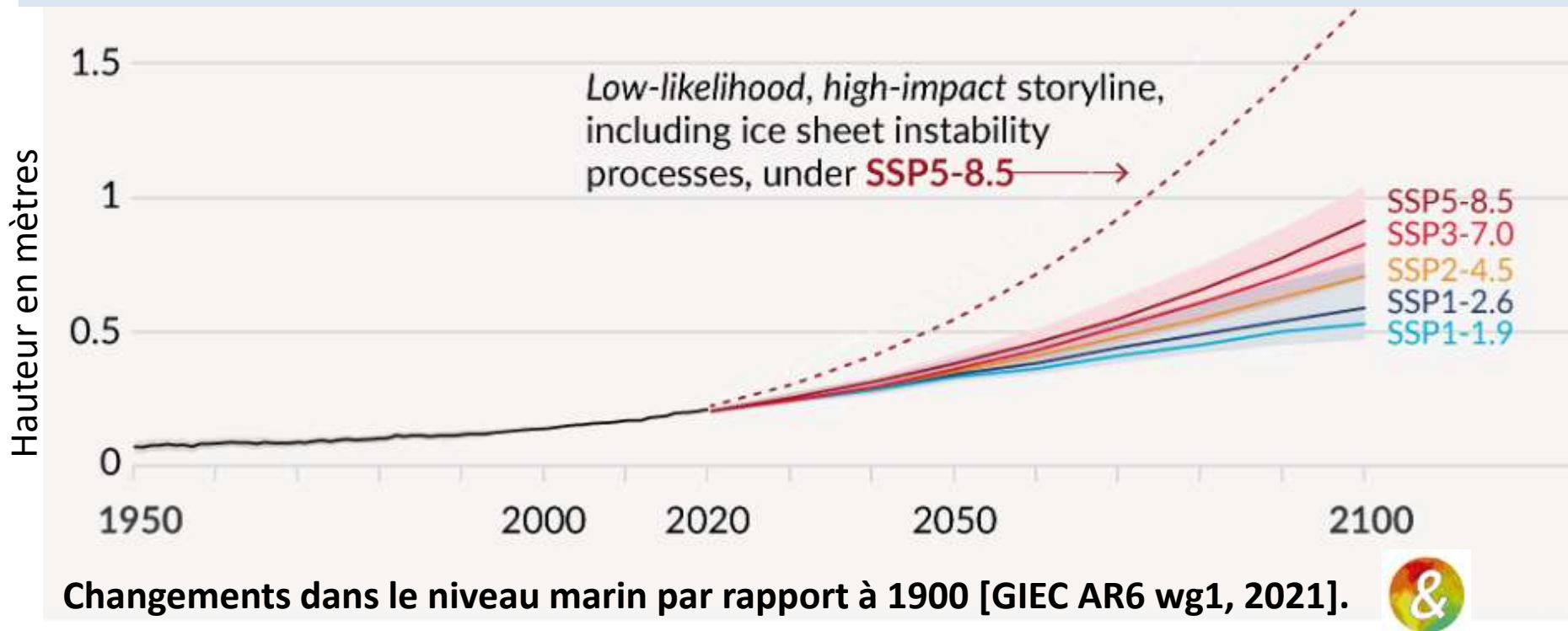
[https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/08/24/nucleaire-la-centrale-de-chooz-mise-a-l-arret-a-cause-de-la-chaleur_6049778_3234.html]

Des brouillards salins problématiques pour la corrosion et le vieillissement des composants

En face, les énergies renouvelables peuvent perdre quelques pourcent en été (solaire photo-voltaïque) ou encore subir des événements extrêmes (tempêtes ou calme plat), là aussi pour quelques pourcents.

Certitudes et risques de submersion

La version 2021 du GIEC combine deux augmentations du niveau des mers. La première est certaine et **déterministe**, proche de celle du rapport précédent du GIEC (AR5). L'autre est un **risque de déstabilisation des banquises**. La probabilité d'une submersion catastrophique supplémentaire est multipliée par rapport à l'AR5 (2015), notamment à l'échéance des deux prochains siècles. Le rapport détaille aussi les composantes de la montée des eaux : glaciers ou banquise qui fondent, océans qui se dilatent...



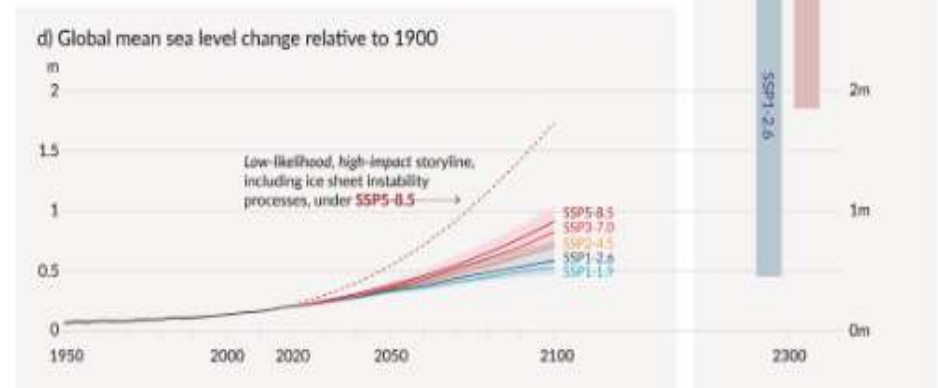
Submersion à long terme

Pour la première fois, le GIEC distingue la montée des eaux du prochain siècle, expliquée comme une quasi-certitude, du le risque de montée des eaux catastrophiques **d'ici à l'an 2300**. A noter que le premier chiffre est à peine relevé par rapport à l'AR5, en gros entre 0,5 et 1 m. [spm 8 AR6 wg1]

Année 2300

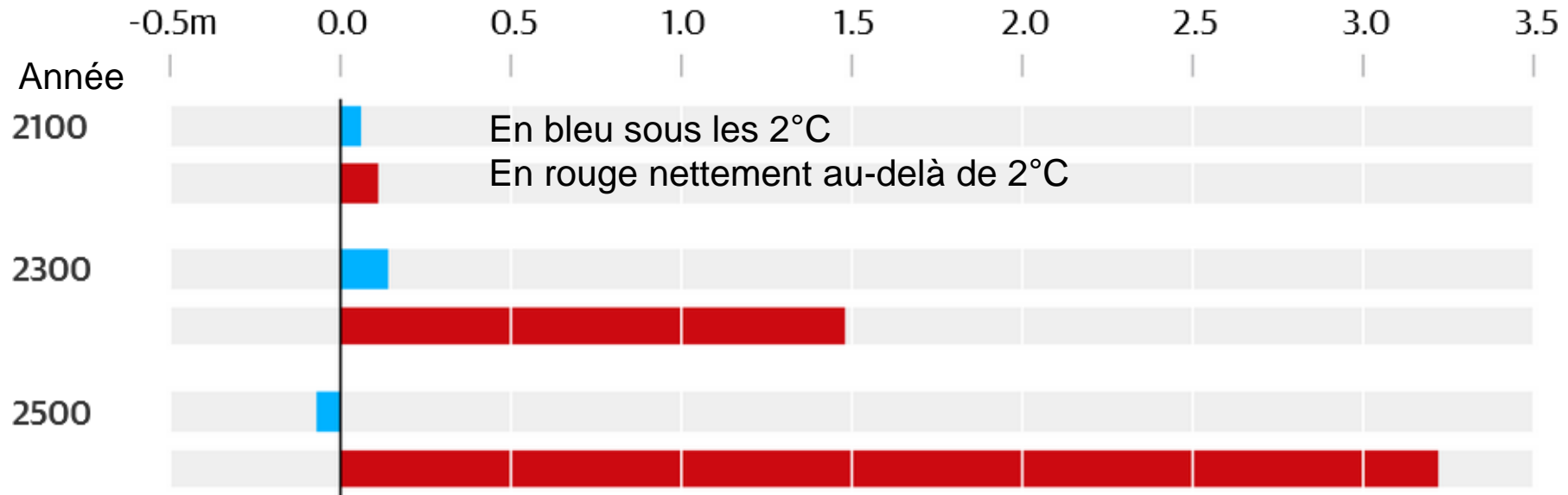
En rouge, de 2m à 7m

En bleu, de 0,5 m à 3,2 m.



Les options et les risques

Projection de la montée des océans issue de l'Antarctique (en mètres)



Risque: La submersion marine liée à la déstabilisation des glaces de l'Antarctique peut être évitée en restant sous les 2°C de réchauffement global [Estimation centrale, Stokes et al, Nature, 2022 cité par Guardian graphic]

Certitude: La fonte d'une partie du Groenland va entraîner 27 cm de hausse des mers d'ici à 2100, quel que soit le scénario. Par contre, selon les auteurs, ce chiffre passe à 78 cm « *si l'on continue au rythme actuel et que l'année 2022 devient une année normale* ».

[article accès libre dans Nature <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01441-2>]

Plan



- 1. C'est quoi un mini-réacteur. Expert Minute**
- 2. Les cycles proposés pour les mini-réacteurs**
- 3. Le cadre de la transition, et les trois risques : Prolifération; Déchets; Accidents**
- 4. Démographie des réacteurs et situation mondiale rabougrie**
- 5. Une France spécifique**
- 6. Economie industrielle et petits réacteurs**

L'industrie

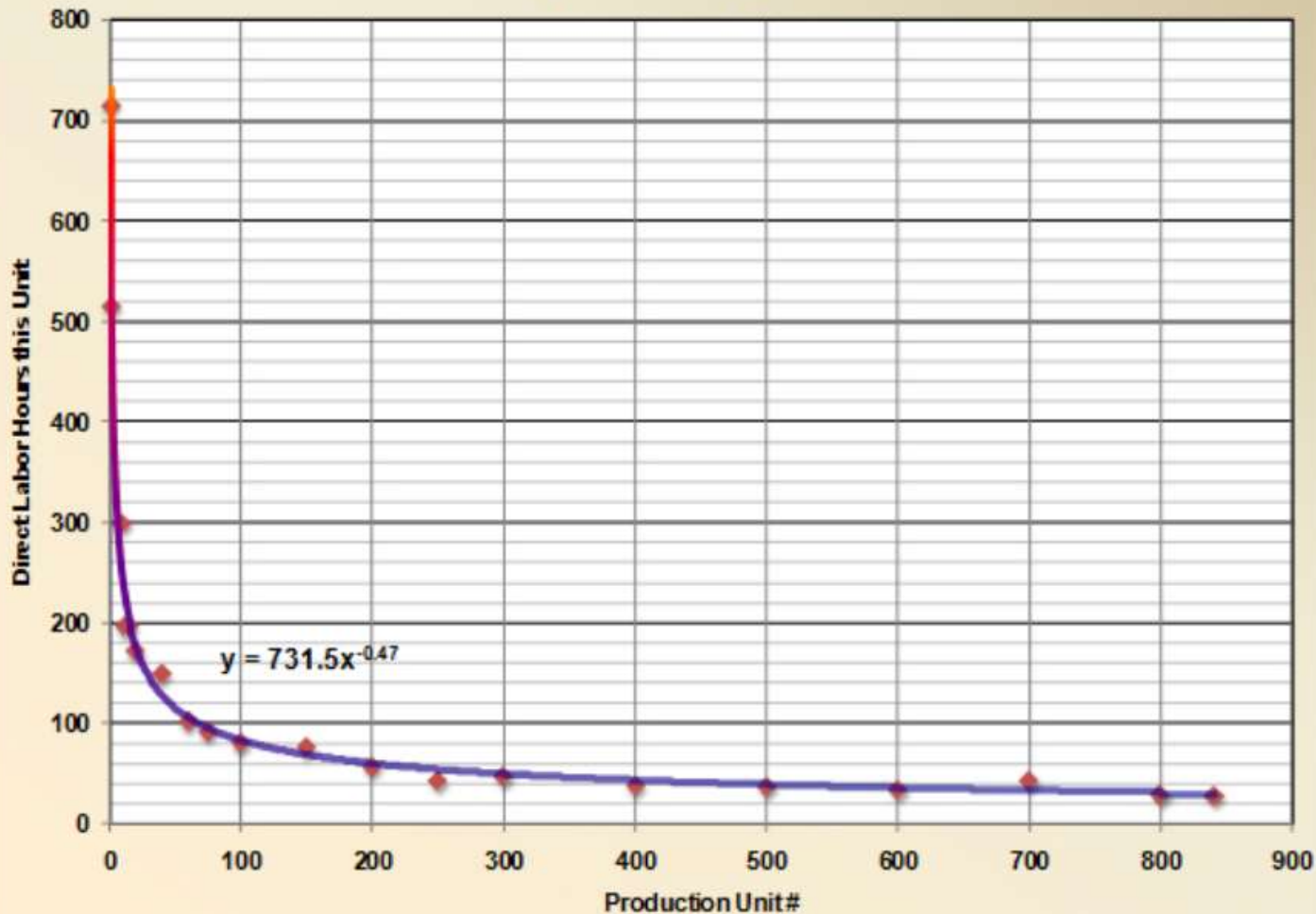


Bières d'Abbayes. De gauche à droite, la Achel, la Westvleteren, la Rochefort. Selon Pierre Musso, le développement de la méthode industrielle (heures fixes, ateliers, recettes éprouvées...) s'est développé dans les monastères. « *La Religion industrielle. Monastère, manufacture, usine. Une généalogie de l'entreprise* », Fayard, Paris, 2017.

- L'observation montre que les coûts unitaires baissent **en fonction des productions cumulées** si les conditions sont maîtrisées, notamment en atelier.
- La **série reproductible** est consubstantielle de la notion d'industrie
- La **haute technologie** est un concept différent, qui demande des qualifications et des bureaux d'études très spécifiques et uniques, et dont les séries peuvent être très faibles (cf. sous marin construit en cinq ans, dont le dessin change à chaque exemplaire)

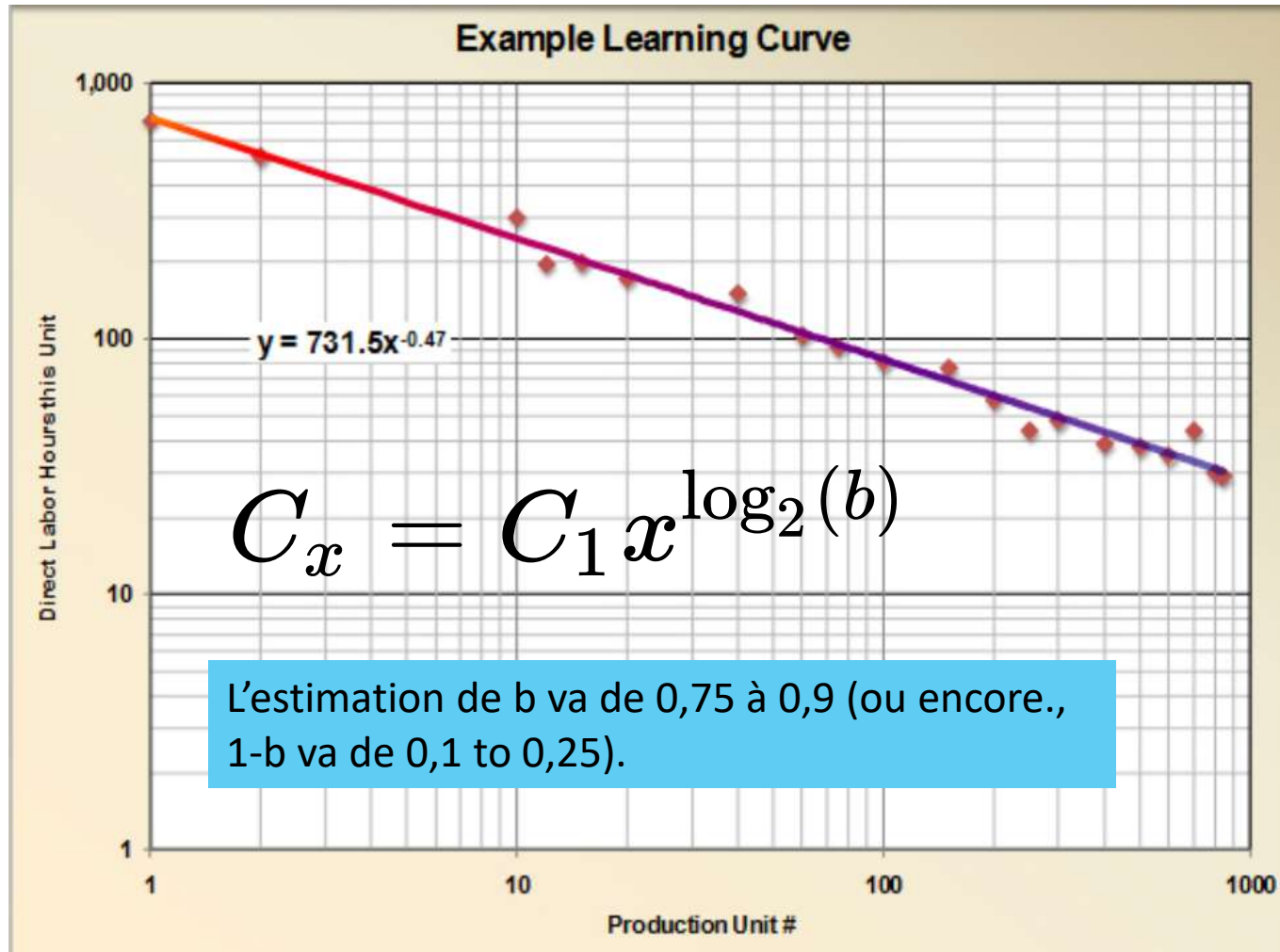
Exemples classiques

Example Learning Curve



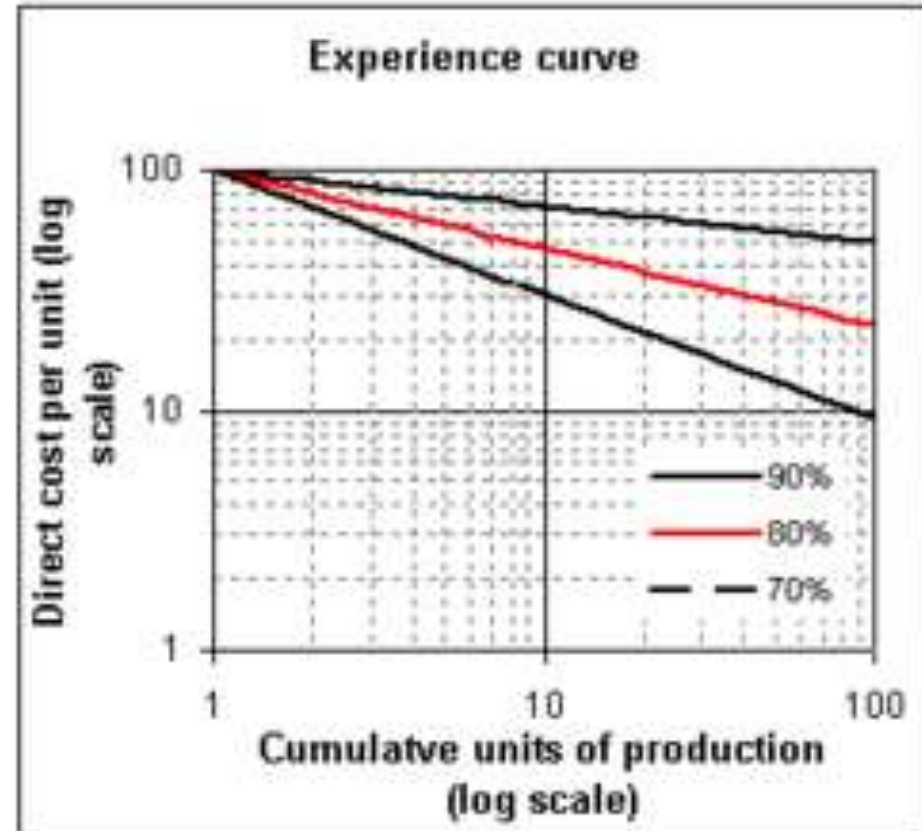
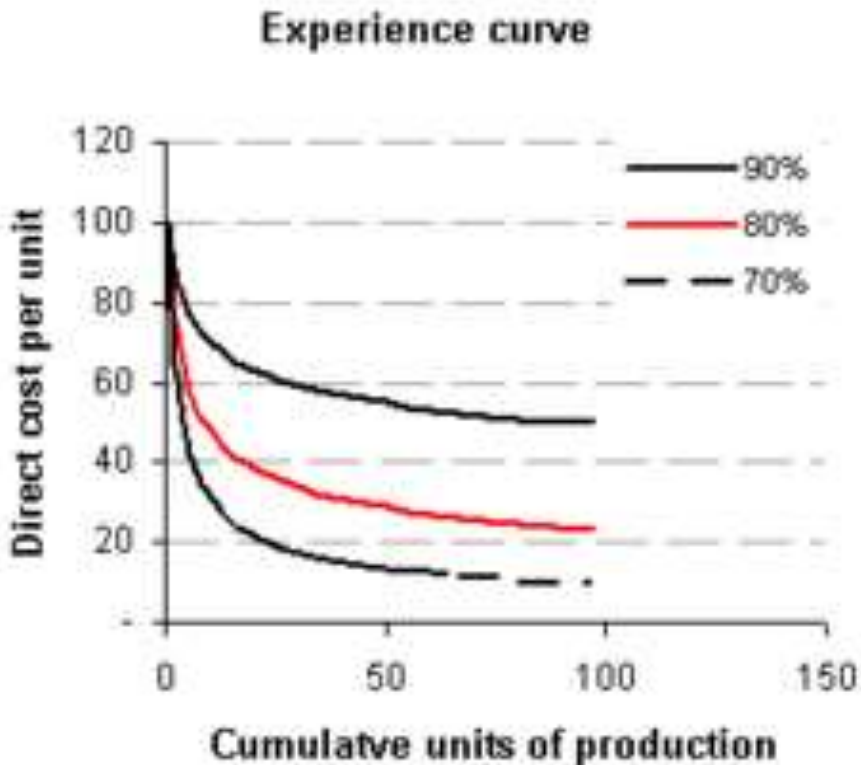
Unit #	Hours
1	716
2	516
10	300
12	197
15	198
20	173
40	150
60	103
75	93
100	81
150	77
200	58
250	44
300	48
400	39
500	38
600	35
700	44
800	30

L'industrialisation baisse les coûts par une fonction logarithmique des quantités cumulées



Expérience et échelle :

- Une production industrielle amène l'apprentissage et une économie d'échelles



L'économie industrielle



Le **taylorisme**, centré sur la parcellisation des tâches et l'organisation des mouvements et des outils, ne représente qu'une partie des gains de productivité obtenus avec la production en série, dans un atelier organisé. L'ouvrier taylorien est plus productif mais le travail devient plus aliénant et déresponsabilisant. Un siècle plus tard, ce taylorisme s'est transformé mais est toujours bien réel, notamment dans les services (call centers, restaurants fast-food par exemple).

- Il s'agit de production de masse (milliers, millions d'exemplaires)
- Cela concerne un **écosystème complet dont universités, système de recherche, financement des entreprises**
- L'apprentissage du « geste » et le taylorisme ne représente qu'une partie –faible- des gains de productivité

Décomposition de l'apprentissage



Double effet :
apprentissage et effets
d'échelle. Ces deux
concepts reposent sur des
déterminants distincts.

Effets d'apprentissage (“learning curve”)

- Efficacité/productivité de la main d'oeuvre
- Standardisation des méthodes, spécialisation des tâches
- Amélioration des conceptions
- Automation des procédés, apprentissage de l'informatisation

Effets d'échelle et de taux d'utilisation (“size effect”, “rate effects”)

- Meilleur taux d'utilisation des équipements
- Efficacité des approvisionnements et volumes
- Effets de réseaux entre industries pour accélérer les changements
- Gains liés aux industries parallèles (e.g. écrans plats numériques et modules PV pour Sharp)

Quelques taux d'apprentissages



Le taux est exprimé soit en ratio de la baisse des coûts en pourcentage, soit par l'expression inverse du coût réduit comme ici.

Selon la NASA:

- Aeronautique et espace 85%
- Chantiers navals 80-85%
- Machines-outils complexes 75-85%
- Fabrications électroniques répétitives 90-95%
- Usinages en série, emboutis sur presses 90-95%
- Opérations électriques répétitives 75-85%
- Soudages en série 90%
- Matériaux bruts 93-96%
- Achat de pièces ou de sous-ensembles 85-88%

L'apprentissage



L'apprenti sorcier, court métrage des studios Walt Disney dans Fantasia (1940), est basé sur le poème Der Zauberlehrling écrit en 1797 par Goethe et la musique de L'Apprenti Sorcier (1897) de Paul Dukas.

La baisse des coûts par l'apprentissage n'est pas totalement déterministe. Elle va être déterminée par plusieurs facteurs humains :

- ✓ Une **culture de progression** collective (dont la formation)
- ✓ Une **organisation** adaptée
- ✓ Des **technologies** en progression
- ✓ Des **investissements de production** et de diffusion à l'échelle
- ✓ Un effort persévérant **d'ingénierie**
- ✓ La personnalité des **gestionnaires**

La stratégie de Ford



Le prix de la Ford T s'abaisse considérablement avec la construction d'une usine spécifique pour réduire encore les temps d'assemblage. Le prix descend en 1922 à 269\$. En 1924 sur 24 millions d'autos aux USA, la moitié étaient des Ford.

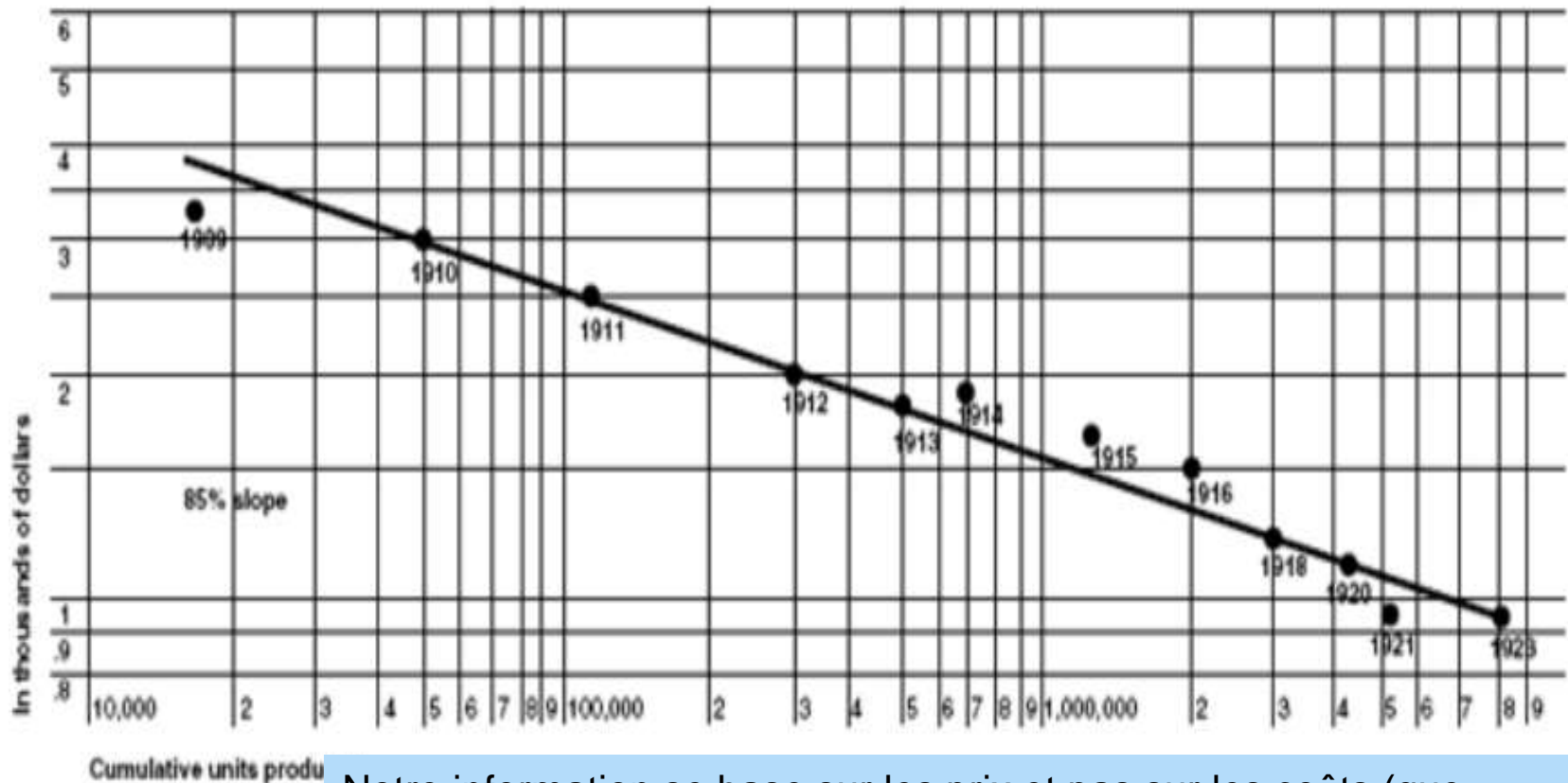
- La Ford modèle T est construite de 1910 à 1927 puis jusqu'à 1941
- Henri Ford vous vend la couleur que vous voulez, à condition quelle soit noire... car la peinture noire sèche plus vite
- Le prix de l'auto suit l'évolution des volumes.
- Par les prix bas, Ford construit son propre marché

<https://www.youtube.com/watch?v=rHXgdGSttU0>

<https://www.youtube.com/watch?v=2hVEmBKdm1s>

1909-1923, Ford baisse des prix

Prix de vente et cumul des productions 1909-1923 [en dollars de 1958]



Notre information se base sur les prix et pas sur les coûts (que Ford garde pour lui) mais l'information est très similaire car les taux de marge sont conservées sur la période au minimum par Ford.



Questions ?

Les Simpsons. La centrale nucléaire de Springfield comprend deux tranches du modèle Fissionator 1952. Elle a évité la fusion de son cœur à maintes reprises, grâce à l'action *fortuite* de son chef de la sûreté, Homer Simpson.

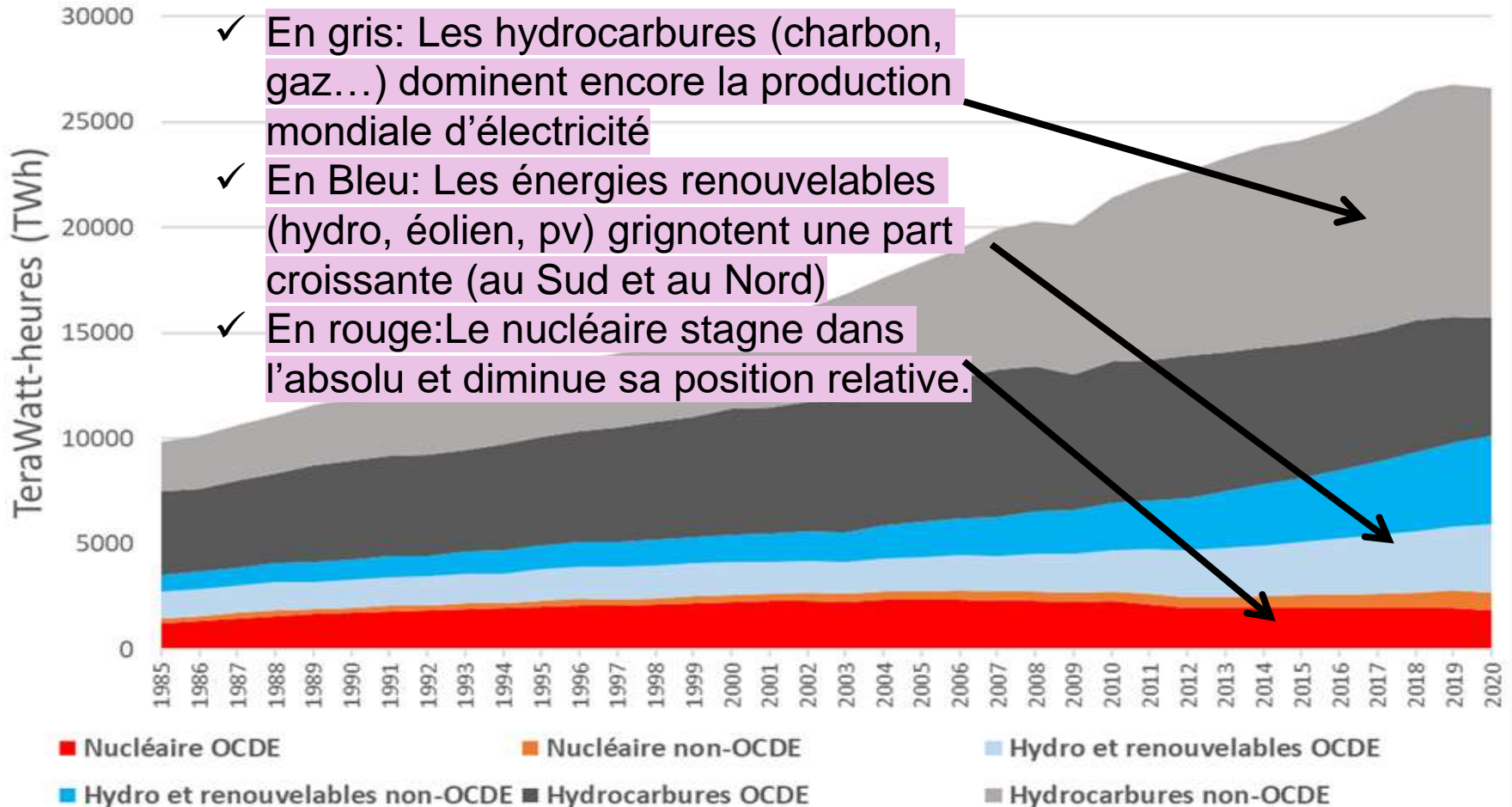
Plan



1. **C'est quoi un mini-réacteur. Expert Minute**
2. **Les cycles proposés pour les mini-réacteurs**
3. **Le cadre de la transition, et les trois risques : Prolifération; Déchets; Accidents**
4. **Démographie des réacteurs et situation mondiale rabougrie**
5. **Une France spécifique**
6. **Economie industrielle et petits réacteurs**

30 ans de stagnation nucléaire

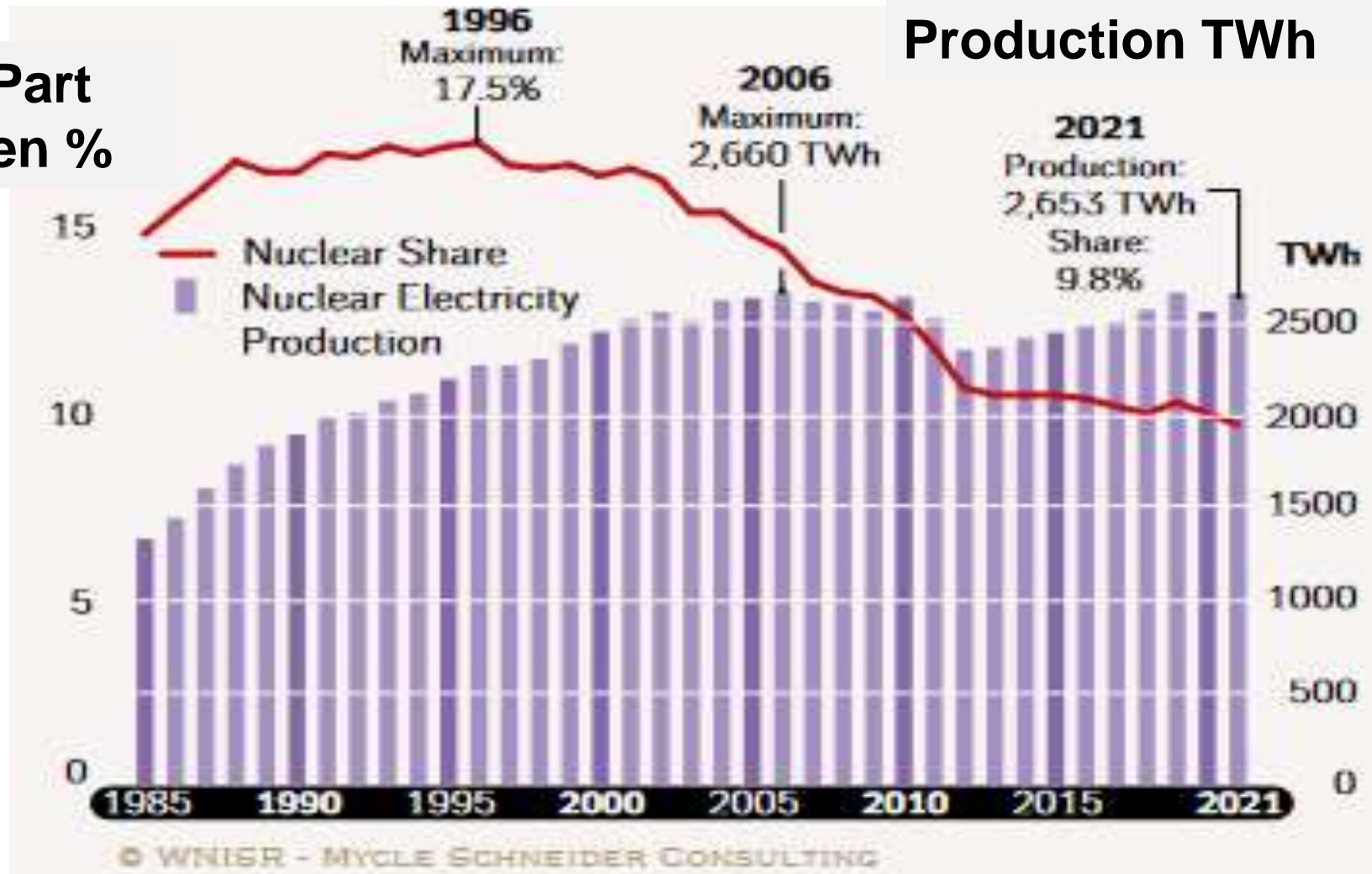
Production électrique 1985-2020



Monde: Déclin relatif de 17,5% à 9,8%

Part
en %

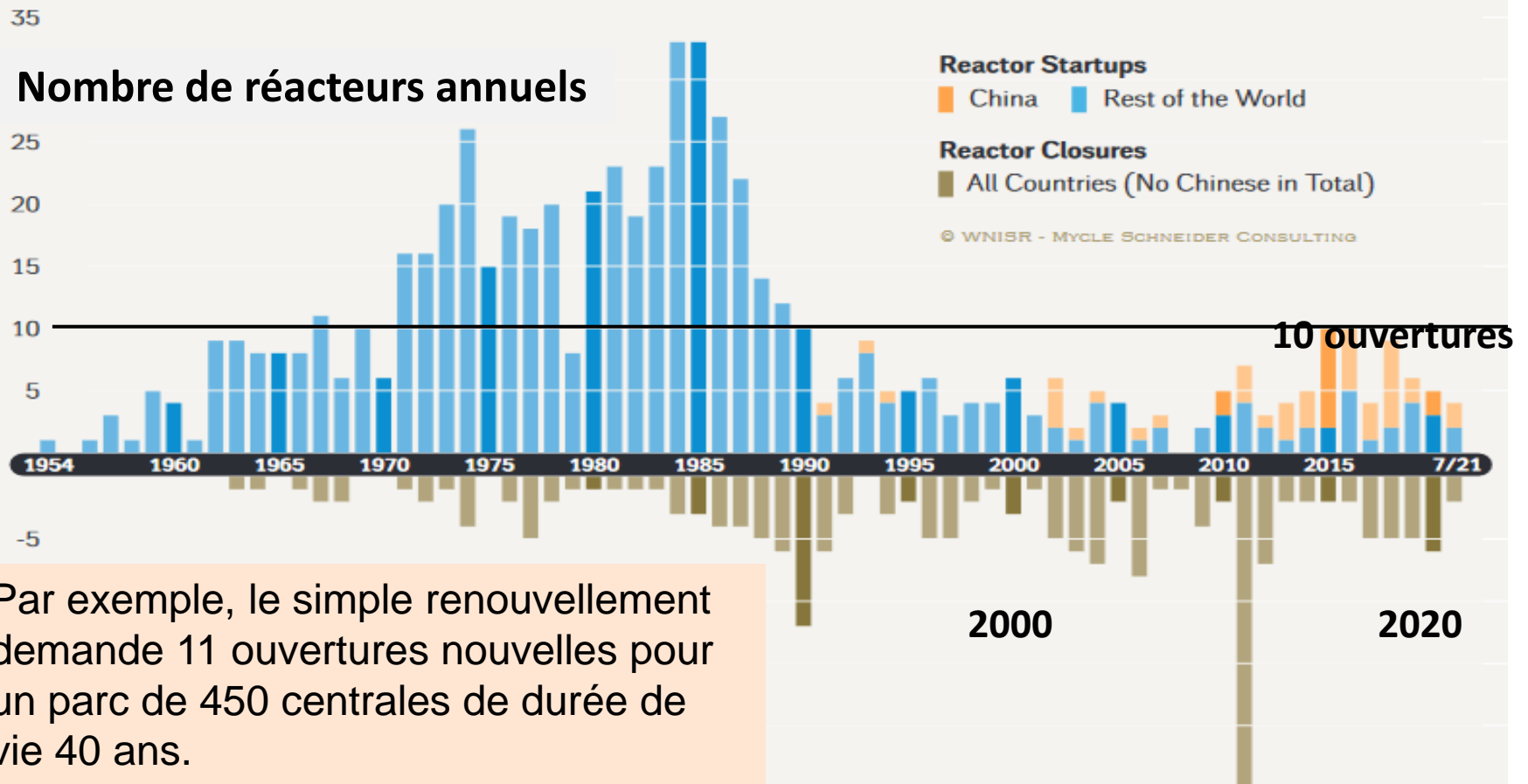
Production TWh



Electricité nucléaire dans le Monde [WNISR 2022]

Monde: démarrages et fermetures

Depuis les années 90, les mises en service ne compensent pas les fermetures de centrales.

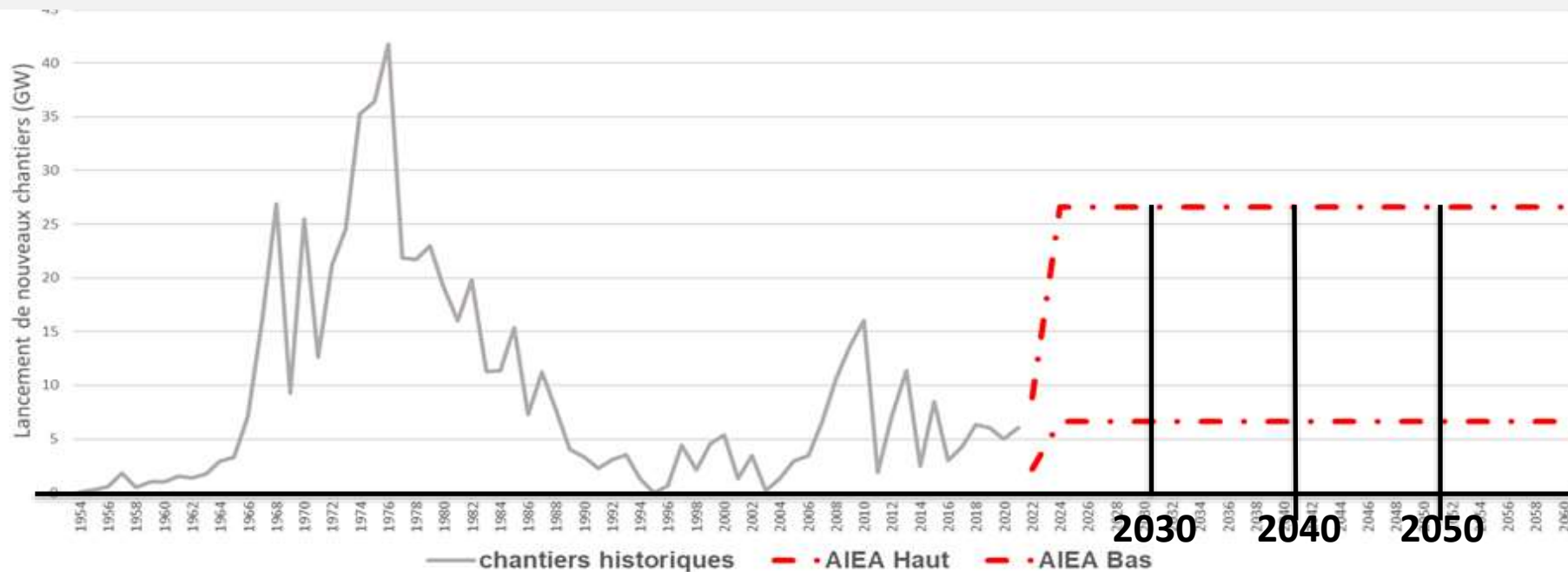


Par exemple, le simple renouvellement demande 11 ouvertures nouvelles pour un parc de 450 centrales de durée de vie 40 ans.

Relance: le scénario « haut » de l'AIEA

Pour mettre en service 400 GW nouveaux (doublement du parc mondial à 2050) il faut donc démarrer pendant 20 ans 20 GW de chantiers plus les 10 GW de maintien du parc existant. Soit **30 GW** ou **18 EPR**... chaque année.

Nombre de chantiers de réacteurs démarrés annuels [E&E avec AIEA 2021]



Ces constructions nouvelles aboutissent à un maintien de la part du nucléaire dans la production électrique à 10% dans le cadre d'un doublement de la demande mondiale électrique. On ne tient pas compte des chantiers abandonnés (5 à 10% sur longue période historique).



L'art de la vente – beaucoup d'appelés peu d'élus

Dans la réalité

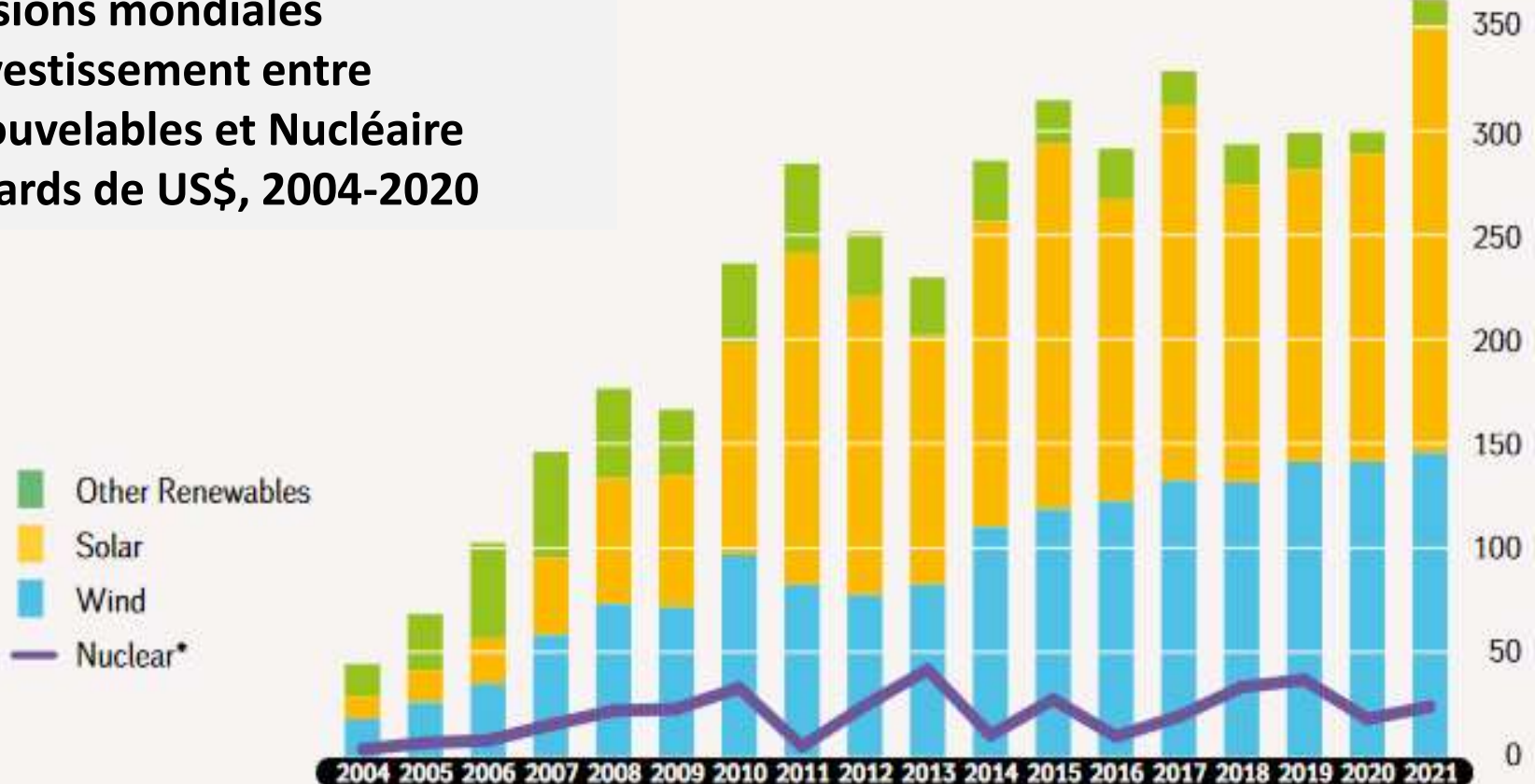
En réalité **peu de commandes nucléaires se concrétisent**. Les clients sont des compagnies électriques **beaucoup plus petites que l'EDF**, qui hésitent à se lancer :

- Il faut une **administration de la sûreté et de la radioprotection**
- L'approvisionnement en **combustible** est complexe et risque de se trouver face à un monopole commercial, voire sous embargo
- Le nombre de sites **favorable** est limité (refroidissement, urbanisme....)
- Les **déchets nucléaires** posent des questions encore non résolues.
- La **maintenance nucléaire**, représente une part élevée de l'investissement, souvent non programmée (investissement = seulement ½ coût LCOE selon la Cour des Comptes ou le rapport « Charpin »).
- Le délai de construction est **incertain**, ce qui induit des aléas sur le fonctionnement du réseau électrique et les coûts.
- Le public, le judiciaire ou un pouvoir en alternance risquent de **refuser le nucléaire**, en particulier après un accident.

Investissements relatifs

Décisions mondiales
d'investissement entre
Renouvelables et Nucléaire
Milliards de US\$, 2004-2020

© WNISR - MYCLE SCHNEIDER CONSULTING

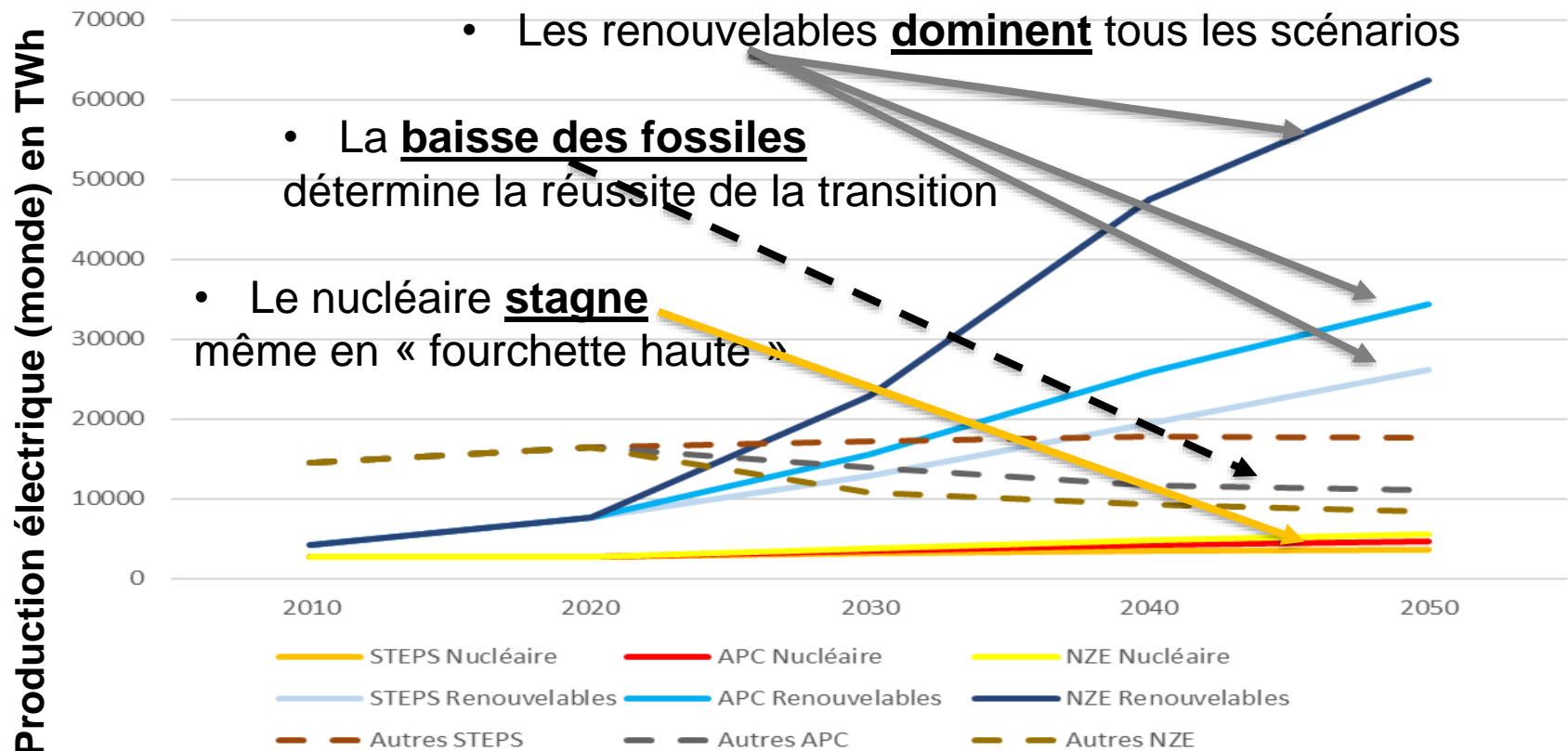


WNISR – Mycle Schneider /Sources: REN21 2022 and WNISR Original Research,

AIE Net Zero: électricité

Trois scénarios « NET Zero - 2021 » de l'AIE pour l'Accord de Paris:

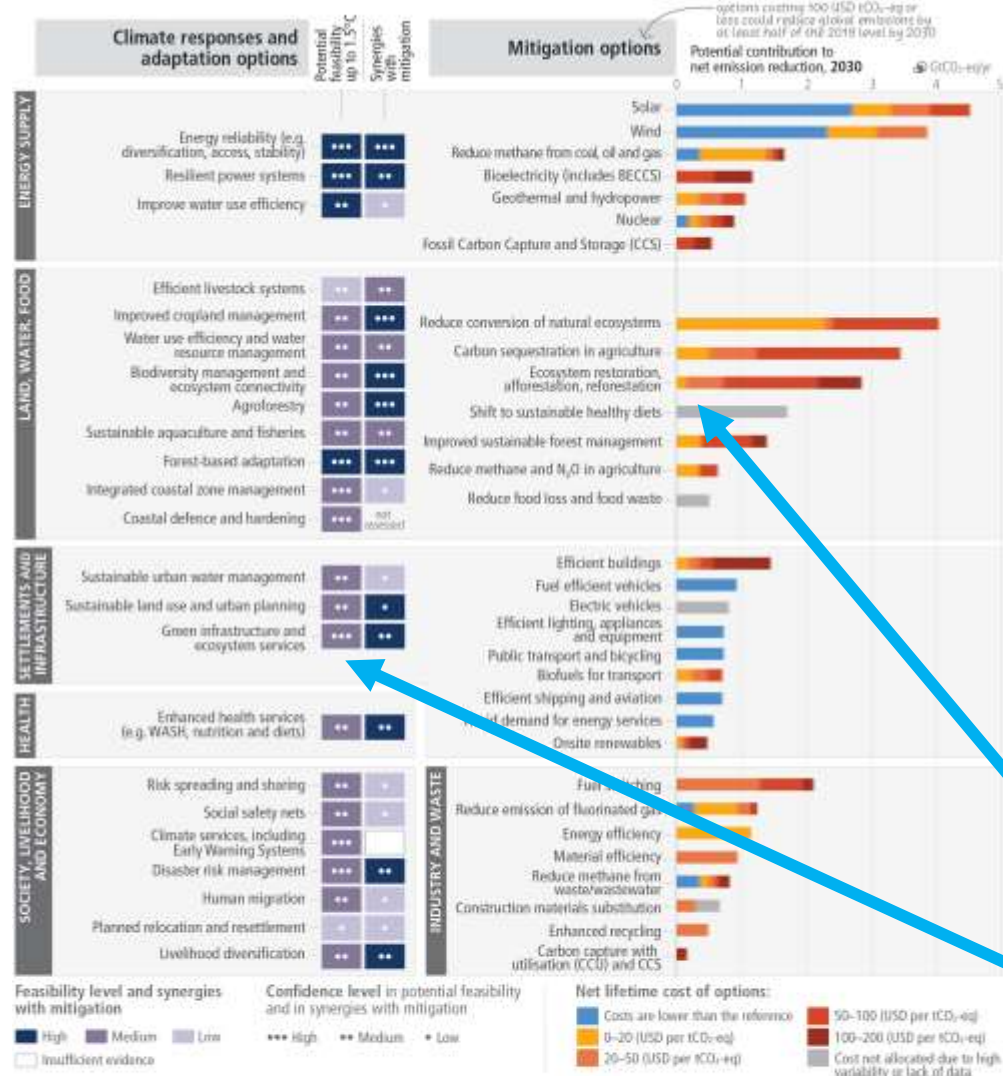
- ✓ Les mesures existantes (STEPS)
- ✓ Les mesures engagées par les états (APC)
- ✓ Les mesures pour l'objectif moins de 2°C (en « back-casting »)



Potentiels à 2030

There are multiple opportunities for scaling up climate action

a) Feasibility of climate responses and adaptation, and potential of mitigation options in the near-term



Le Graphe de synthèse des potentiels « réalistes et abordables » du GIEC présente les choix d'urgence. C'est la « feuille de route » immédiate.

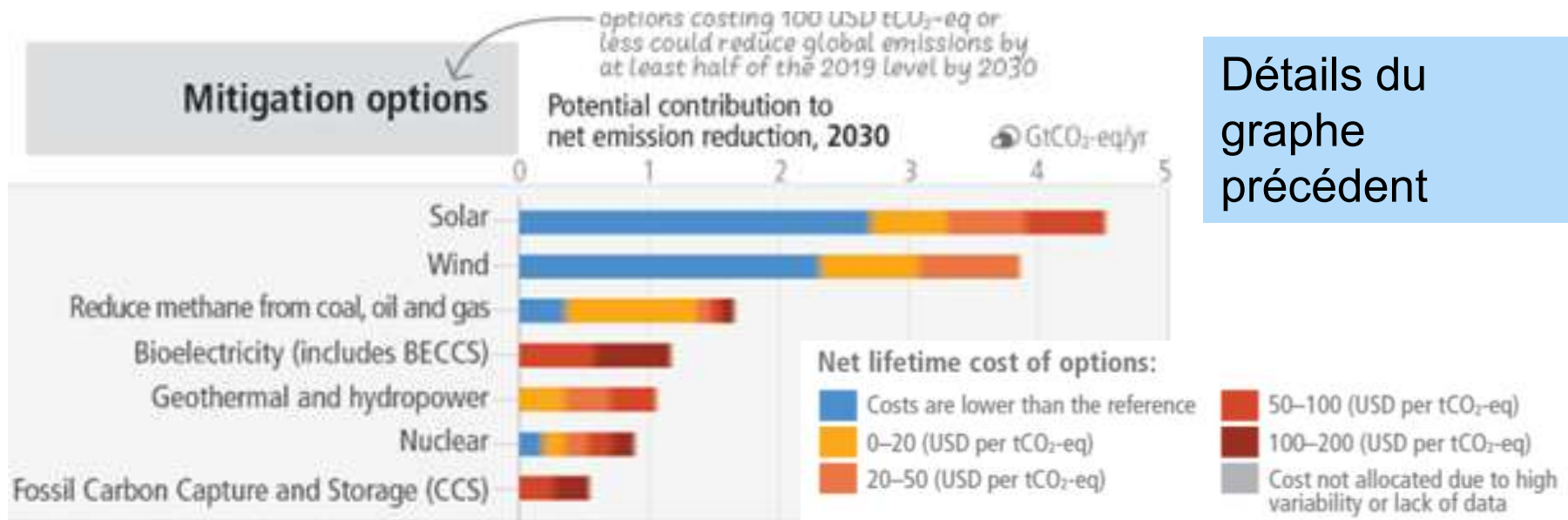
[TS23 ou SYR4.4 du GIEC AR6]
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/figures/figure-4-4>

Options en synergie avec l'action sur la biodiversité et changement de régime alimentaire

Options plus ou moins adaptées et réalistes (consensus du GIEC)

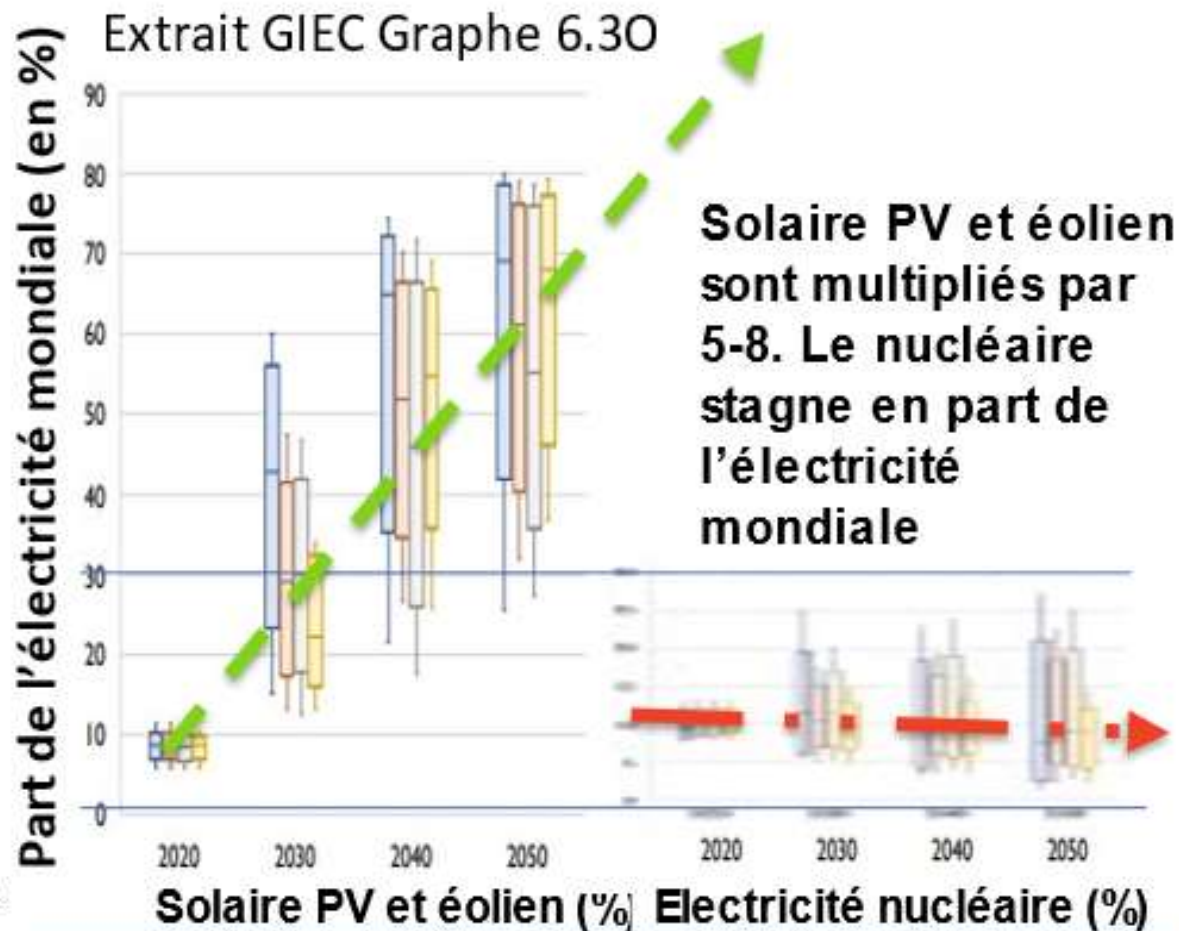
Options côté demande (efficacité et sobriété), par exemple 73% sur l'électricité à 2050.

Energie: les potentiels du GIEC



Le potentiel du nucléaire estimé par le GIEC dans la prochaine décennie est nettement plus faible que celui des renouvelables électriques, soit environ **dix fois moins**. En bleu sur le graphe (coût plus faibles que la référence) ce sont avant tout des prolongements de réacteurs nucléaires. Les *coût zéro* dominant par contre pour le solaire et l'éolien, désormais moins chers que toutes les autres solutions. Ces proportions se retrouvent dans les prévisions à moyen terme ailleurs dans le rapport 6

Scénarios à l'échéance 2050

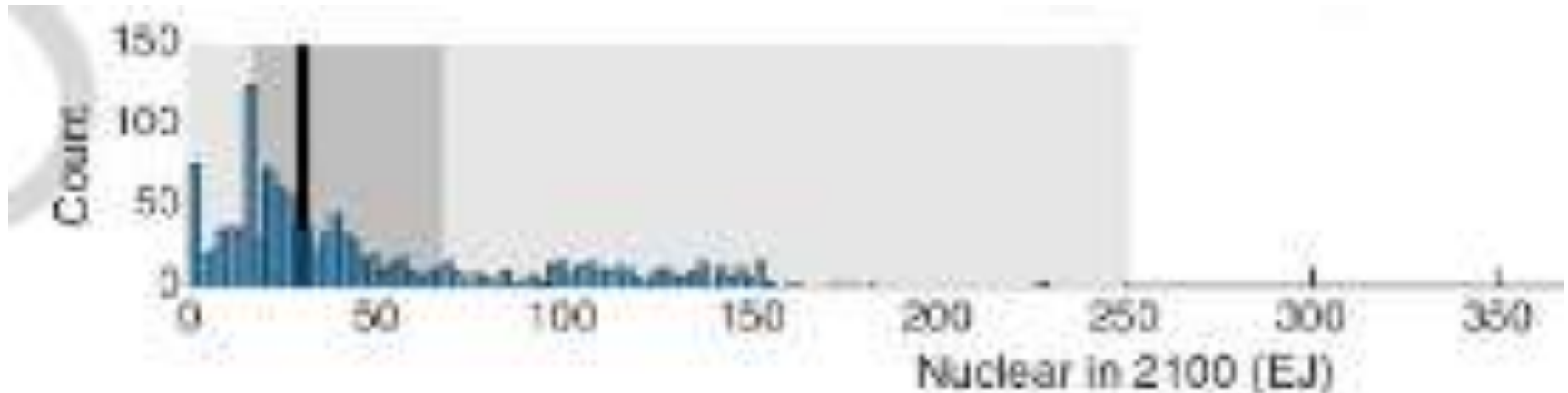


Dans le chapitre « énergie » du GIEC AR6, le GIEC recense les scénarios qui aboutissent à 1,5°C et 2°C. Ces scénarios convergent sur les parts respectives des énergies électriques

Mise à l'échelle des graphes du GIEC AR6 ch6.30. Les quatre barres correspondent aux quatre types de scénarios compatibles Accord de Paris : +1,5°C sans overshoot; +1,5°C avec overshoot, 2°C sans overshoot, 2°C « second best solutions »

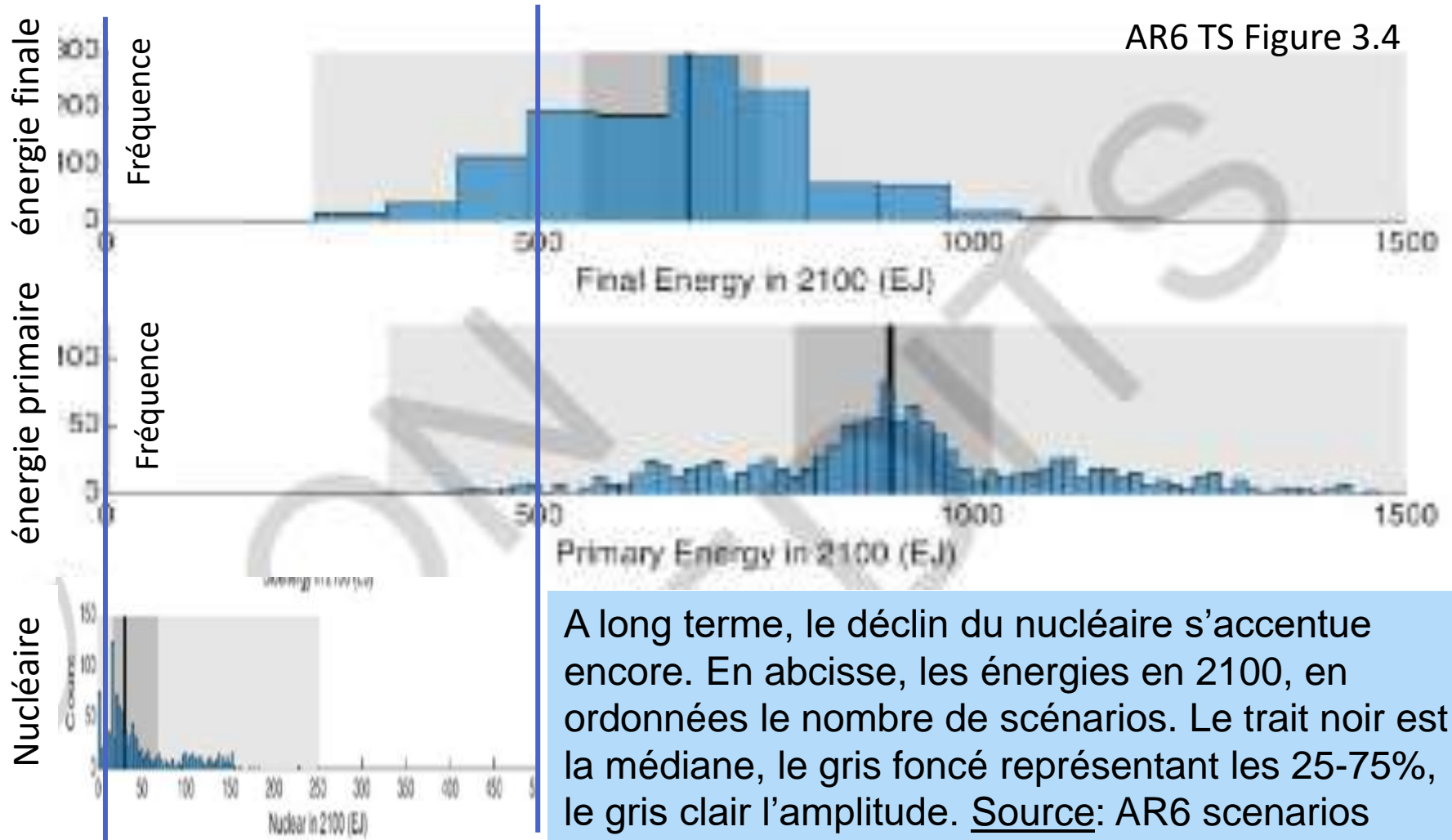
GIEC AR6 à 100 ans

AR6 TS Figure 3.4

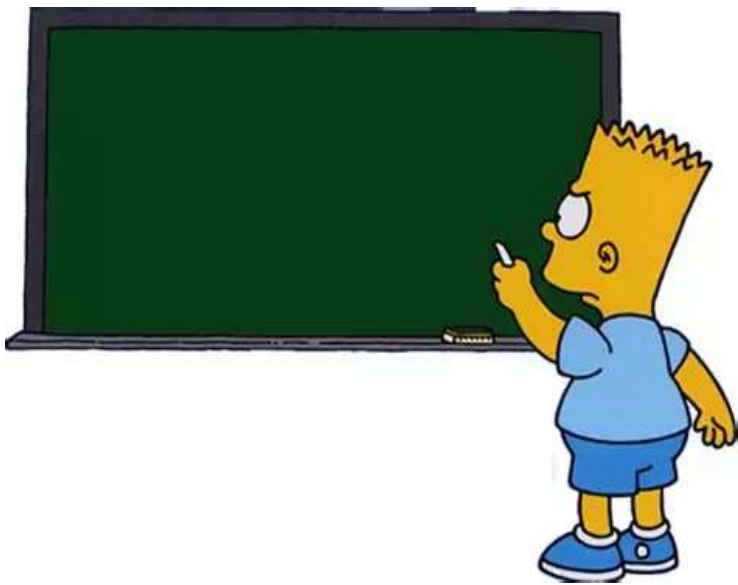


2022. La base de donnée des scénarios qui remplissent les conditions de l'Accord de Paris montre que le nucléaire (représenté sur la même échelle) représente une part le plus souvent faible de la demande. Les productions sont représentées en nombre de scénarios dans chaque classe de valeurs (les histogrammes). La barre noire est la médiane des scénarios, les zones grises représentent les parts majoritaires (25%-75% des occurrences) et en clair l'amplitude totale.

GIEC AR6 2100: énergies primaire, finale et nucléaire



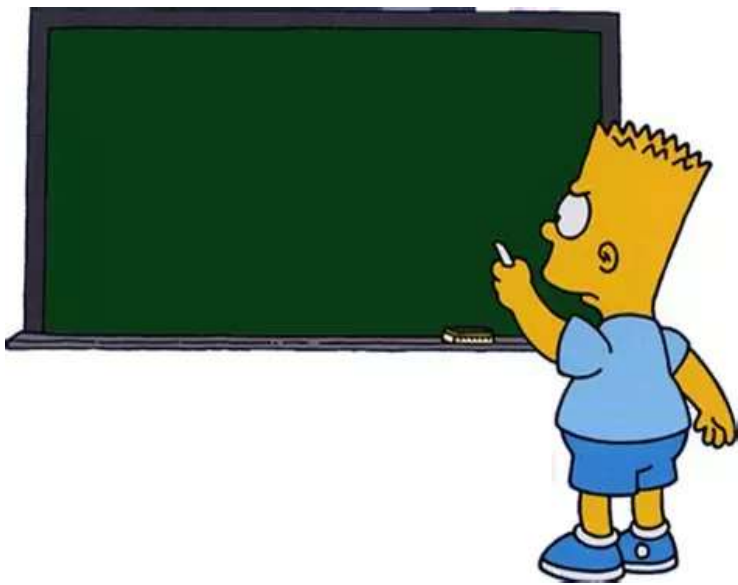
A long terme, le déclin du nucléaire s'accroît encore. En abscisse, les énergies en 2100, en ordonnées le nombre de scénarios. Le trait noir est la médiane, le gris foncé représentant les 25-75%, le gris clair l'amplitude. Source: AR6 scenarios data-base. Traitement et mise à l'échelle E&E consultant 2022.



Test

Il y a 400 réacteurs (1GW) dans le monde. Dans le scénario haut de l'AIEA, ce nombre passe

- A. Il double à 800 réacteurs dans le monde
- B. Il quadruple à 1600 réacteurs dans le monde
- C. Il est multiplié par huit à 3000 réacteurs
- D. En 2050 le nucléaire sera en route vers les 20 000 GW



Test

Il y a 400 réacteurs (1GW) dans le monde. Dans le scénario haut de l'AIEA, ce nombre passe

- A. **Il double à 800 réacteurs dans le monde**
- B. Il quadruple à 1600 réacteurs dans le monde
- C. Il est multiplié par huit à 3000 réacteurs
- D. En 2050 le nucléaire sera en route vers les 20 000 GW

Questions ?



Les Simpsons. La centrale nucléaire de Springfield comprend deux tranches du modèle Fissionator 1952. Elle a évité la fusion de son cœur à maintes reprises, grâce à l'action *fortuite* de son chef de la sûreté, Homer Simpson.

Controverse

Et si on construisait 3000 réacteurs d'ici 2050...

Démarrages de
construction par an

140

120

100

80

60

40

20

0

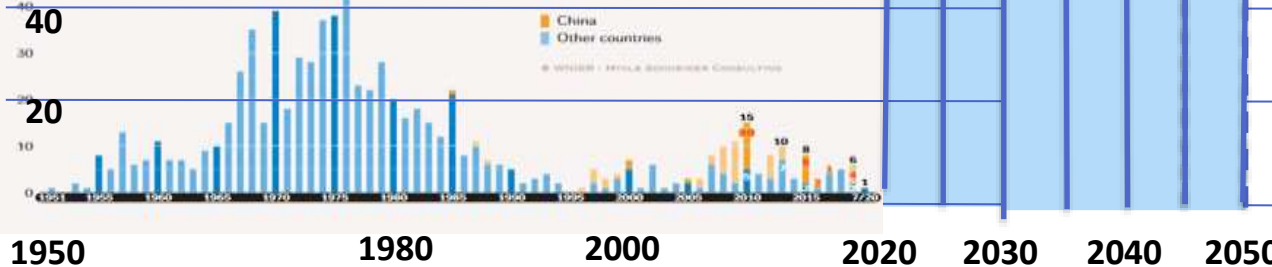
Construction proposée

« Ce n'est pas
complètement
ridicule... »

« **7% de croissance sur
35 ans, c'est 3000 GW
nucléaires en 2050...** ».

Proposition de Jean-Marc
Jancovici, Cours Ecole des
Mines / Nucléaire (2019)

Construction historique



1950

1980

2000

2020

2030

2040

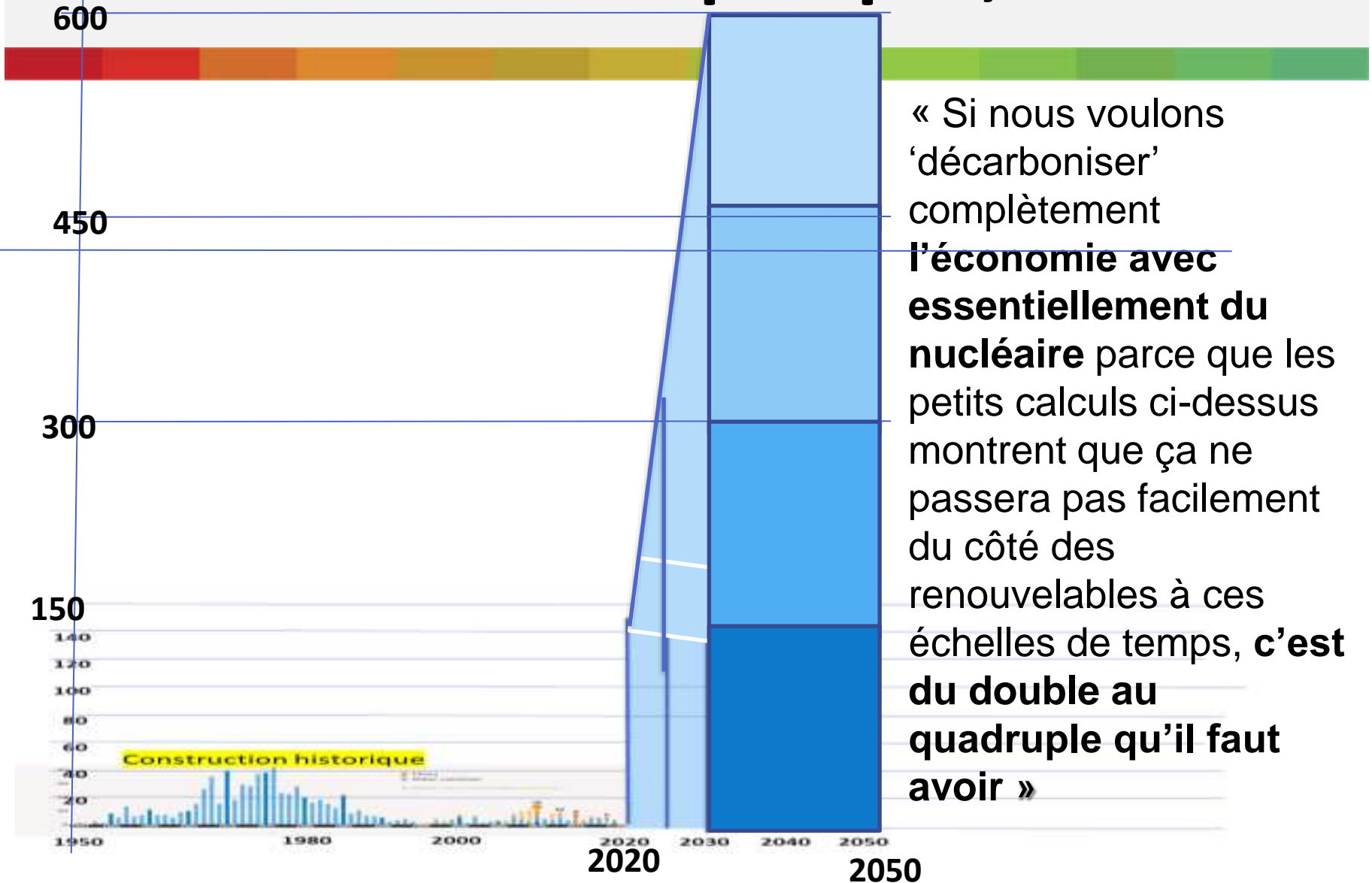
2050

Voir pages 103 à 110 sur https://jancovici.com/wp-content/uploads/2020/07/Jancovici_Mines_ParisTech_cours_6.pdf
3000 réacteurs de 1000 MW chacun, 10 ans de construction suivant indications du cours.

La séquence de construction historiques est celle du World Industry Status Report / M. Schneider

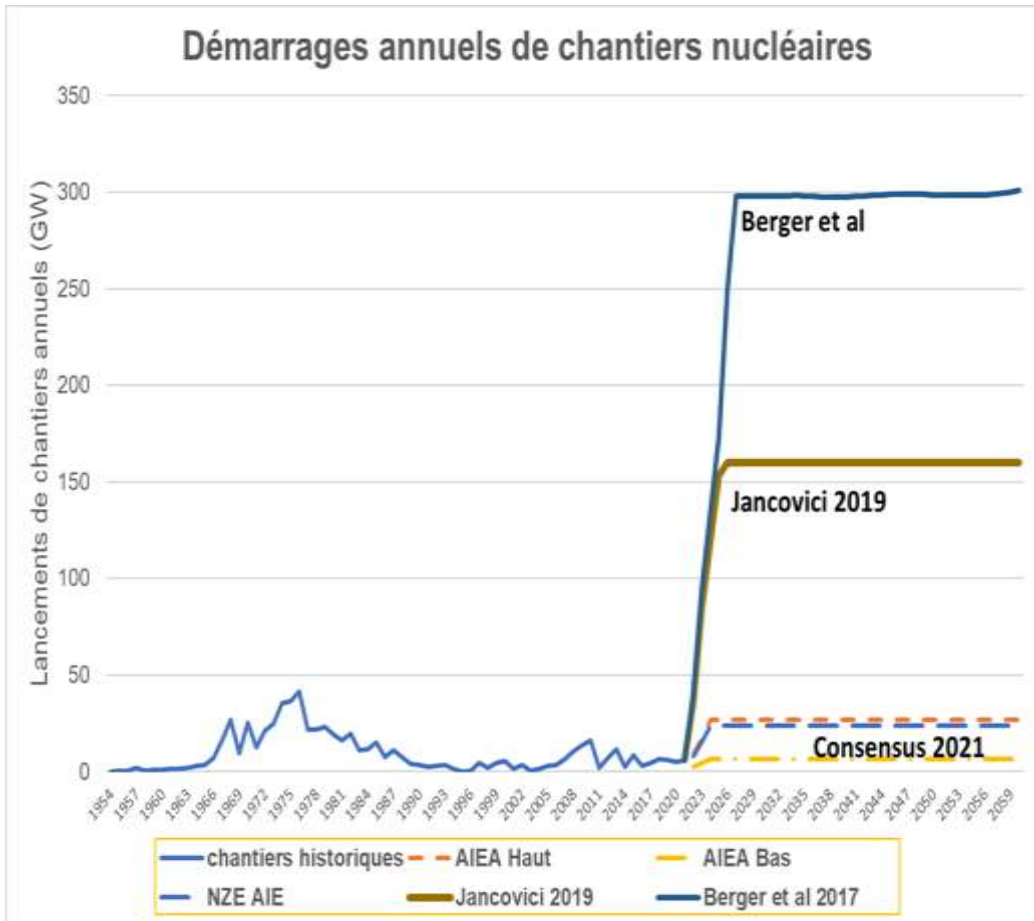


Pourquoi pas, X2 ? X4 ?



Source: Jean-Marc Jancovici, « Qu’est ce que l’équation de Kaya », 2014 sur
<https://jancovici.com/changement-climatique/economie/quest-ce-que-lequation-de-kaya/>

Outliers ?



https://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/art_sel/IJGEI400103_Berger%20et%20al.pdf
Berger, A., Bles, T., Bréon, F.-M., Brook, B.W., Hansen, P., Grover, R.B., Guet, C., Liu, W., Livet, F., Nifenecker, H., Petit, M., Pierre, G., Prévot, H., Richet, S., Safa, H., Salvatores, M., Schneeberger, M. and Zhou, S. (2017) 'How much can nuclear energy do about global warming?' Int. J. Global Energy Issues, Vol. 40, Nos. 1/2, pp.43–78.

Grappe de E&E
Consultant, base
historique de l'AIEA
(PRIS 2022)

Un groupe de défenseurs du nucléaire propose de monter à **20 000 GW** le parc nucléaire en 2100 pour substituer la majeure partie de l'énergie mondiale. Cela représente sur environ 60 ans une construction d'au moins 300 GW/an d'ici à la fin du siècle, soit autant chaque année que le parc nucléaire existant.

Explications ?



La voie du plutonium et du retraitement des déchets est portée en France sous le général De Gaulle.

Ci-dessous, terrains en construction à La Hague (Manche) en 1960 pour le lancement de l'usine de production du plutonium [document Presse de La Manche]

Le débat et la controverse s'expliquent aussi par des raisons plus prosaïques:

- Le maintien dans le débat de la possibilité, même infime, du développement massif du nucléaire, laisse ouverte **une justification du retraitement des déchets nucléaires et des cycles au plutonium**, vains sans cela. Portée par le CEA et Orano contre une partie de l'EDF, l'argument étaye encore aujourd'hui une infrastructure (La Hague, Marcoule...) issue des querelles franco-françaises des années 70 et unique au monde.

- Souvent il s'agit d'un **discours figé** eu début du 21ème siècle, lorsque l'émergence des énergies renouvelables électriques n'était pas acquise, face au charbon triomphant.



Annexes:

- Expert-minute: la radioactivité
- Détails des trois risques
- Les raisons des surcoûts
- L'assurance-qualité et la sûreté
- Les mini-réacteurs « SMR » et autres cycles nucléaires
- Discussions d'économistes
- Aux origines, les seventies

Plan

1. Trois risques : Prolifération; Déchets; Accidents
2. Les boomers, le climat et le développement durable
3. Vulnérabilité de l'industrie nucléaire
4. Démographie des réacteurs et situation mondiale rabougrie
5. **Une France spécifique et les nouveaux EPR**



Anne Lauvergeon, à l'origine de AREVA. Le caractère absurde des cycles maintenus en France pour les combustibles usés, est accentué par plusieurs scandales de corruption sur l'approvisionnement international en uranium qui continuent d'entacher ce secteur.

Par ex. dossiers Médiapart sur -

<https://www.mediapart.fr/journal/dossier/economie/areva-dans-le-scandale-duramin>
- <https://fr.boell.org/sites/default/files/2020-11/rapport%20mondial%20sur%20les%20d%C3%A9chets%20nucl%C3%A9aires.pdf>

1- La France du plutonium

Le nucléaire “souverainiste” de la France se traduit par le **choix spécifique de retraiter les combustibles usés**.

Il est hérité des contradictions du passé entre EDF et le CEA (filiale Westinghouse PWR contre filiale nationale graphite-gaz UNGG) et par **l'échec technique du surgénérateur**.

Les usages du plutonium séparé (Mox) à La Hague sont très inférieurs à la production désormais stockée (79 tonnes).

Les Etats-Unis ont abandonné le retraitement dès 1974 sur les arguments **des coûts élevés** et de **la prolifération**. Les Anglais ont eu de **multiples accidents**. Les Japonais sont figés depuis Fukushima. Enfin, Russes et Chinois ont une structure industrielle très différente, liée à leur appareil **militaro-industriel**.

2- La capture des élites



Blason de l'Ecole Polytechnique (1979)

Le scandale coréen vu par Technology Review (MIT) et le contexte juridique japonais sur Fukushima:

<https://www.technologyreview.com/2019/04/22/136020/how-greed-and-corruption-blew-up-south-koreas-nuclear-industry/>
<https://scholarship.law.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=alr>

- La **capture du régulateur** (voir vue suivante) **et des élites** n'est pas une spécificité française, mais est accentuée ici par le **système des grands corps de l'Etat**, issus de formations homogènes. Comme au Japon, en Corée ou en Chine, profils et carrières des contrôleurs sont identiques à celles de l'industrie à contrôler.
- Ce **consensus s'est fissuré** après les accidents de Tchernobyl et surtout de Fukushima, mais aussi suite aux échecs répétés des chantiers EPR en Normandie et en Finlande.
- Aux Etats-Unis, cette capture par l'industrie est pour partie **compensée par la concurrence** (Universités côte est et ouest, think-tanks privés, états fédérés et fédéral...)



Dans un film western classique, le pouvoir appartient aux plus gros propriétaires terriens, qui souvent en abusent. Le régulateur doit être incorruptible [ici Jed Cooper (Clint Eastwood) dans *Pendez les haut et court*, 1968].

Le *Regulator* Calibre 45 LC (ci-dessous) est un revolver produit en 1873



Capture du régulateur

La théorie économique suggère qu'une industrie a besoin de régulation si elle présente un **risque** pour l'environnement, le public, ou encore pour la concurrence dans un secteur.

Le **régulateur** est une sorte d'arbitre, qui peut être un service de l'Etat ou une autorité indépendante. Pour une technique complexe il a besoin d'une **expertise** pointue (ici l'**IRSN**).

De nombreux exemples de "capture" du régulateur sont liés à la taille et à l'influence du ou des industriels sur le secteur et sur la société, et même sur les carriers (cf. aviation).

Dans l'exemple français, un important responsable de l'industrie nucléaire, Jean Syrota, a été longtemps aussi le patron de-facto du Corps des Mines. Ce dernier commandait les carrières d'une bonne part du régulateur, du Ministère concerné ou d'autres opérateurs etc.

La capture réglementaire

https://fr.wikipedia.org/wiki/Capture_r%C3%A8glementaire

3- Des gros et des nains



En **Suisse**, l'approvisionnement en énergie électrique des clients finaux est assuré par près de 700 entreprises, qui disposent en commun des moyens de production. Il faut imaginer l'ambiance des réunions de « co-propriété » des centrales nucléaires quand la moitié des villes concernées sont devenues opposantes au nucléaire.

La **taille du réseau EDF** (500 TWh) est très différente de la grande majorité des opérateurs électriques du reste du monde (Chine exceptée). Aux Etats-Unis, les deux plus grosses compagnies (PG&E à San Francisco et Tennessee Valley Authority) ne représentent pour l'électricité qu'une fraction de la taille d'EDF. C'est la même chose pour les quatre principales compagnies en Allemagne.

Même TEPCO à Tokyo, souvent citée parmi les plus grandes compagnies du monde, ne représente qu'une partie limitée de l'électricité au Japon.



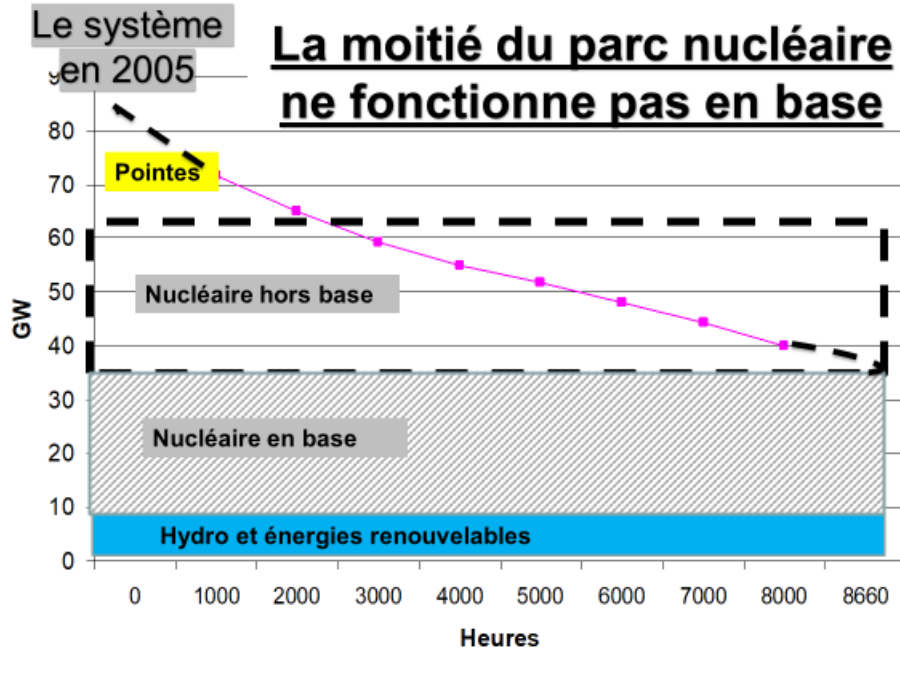
Ébriété énergétique...

4- La surcapacité

- A partir de 1988 et jusqu'à ce jour, le parc électrique n'est pas adapté à la demande. Il y a trop de réacteurs nucléaires pour l'équilibre économique optimal du système. Ceci est lié à la récession des années 70 puis aux prévisions erronées. Conséquences:
- L'**exportation** à très bas prix a été massive, majoritairement vers l'Italie et le Royaume-Uni. Certaines destinations ont mieux rémunéré le courant (Suisse, Allemagne, Espagne). La dernière PPE prévoit encore de l'augmenter à 100 TWh
- Le taux de fonctionnement des centrales nucléaires est tombé à **moins de 75%** (58% en 2022) contre +90% ailleurs
- Cette situation a **impacté les économies d'électricité** sur longue période

5- Nucléaire

« hors base »

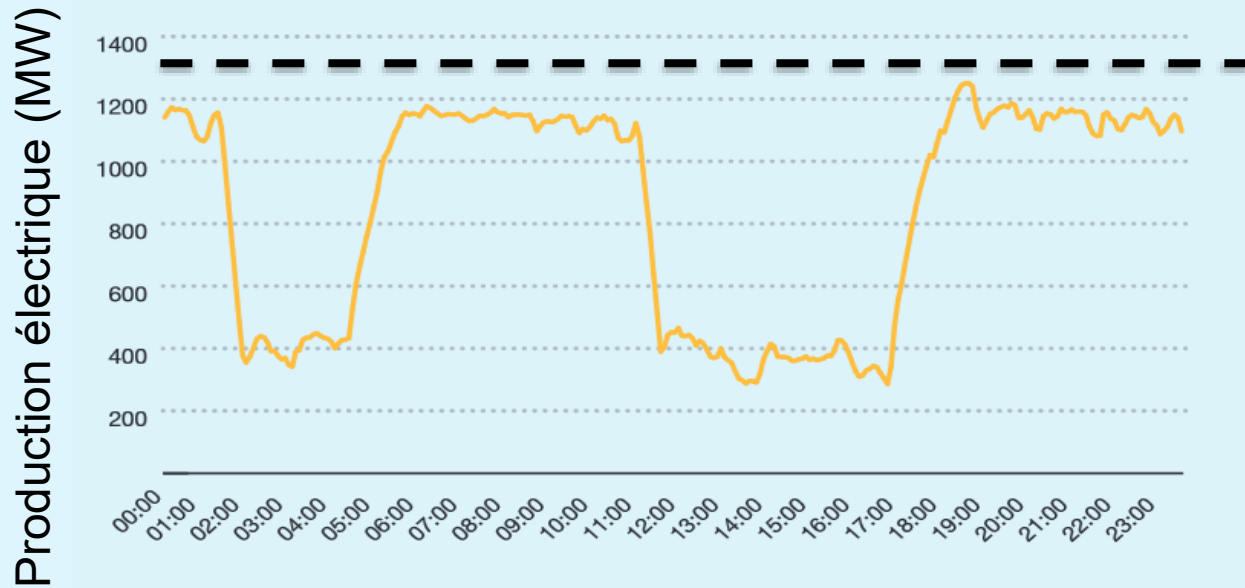


(**) Calcul de la surcapacité, transcrit open source sur https://www.ee-consultant.fr/IMG/pdf/Surcapacite_nucleaire_AB_2006.pdf

La surcapacité nucléaire représente jusqu'à 27 tranches nucléaires construites hors de l'optimum économique. Elle est ici représentée schématiquement sur la « **monotone de charge** ». Cette courbe représente les demandes annuelles du réseau regroupées de façon décroissantes (ici 2005). La montée des renouvelables et la dégradation des demandes de pointe accentue encore ce déséquilibre

- La France est le **seul pays** où le nucléaire n'est pas une énergie fonctionnant en base.
- En conséquence, le parc a été **équipé pour régler et moduler** sa puissance.
- La production excédentaire est **exportée ou modulée**.
- Après 2005, l'amortissement des investissements nucléaires se dégrade encore, avec une augmentation de la **pointe thermique de demande** et la montée en charge des **énergies renouvelables** (éolien et PV)

Modulation de la production



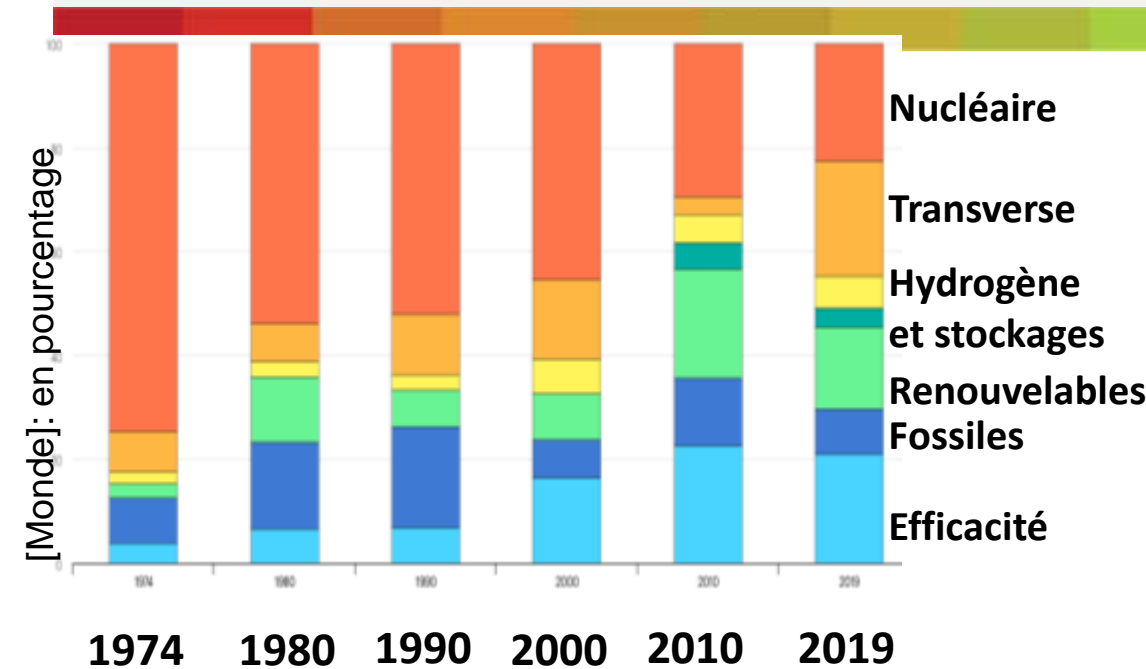
<- Puissance nominale
<- Suivi de charge permanent

<- Modulation forte

Power output of a French nuclear power plant in one day (courtesy of EDF). [E&E 2022 avec AIE]

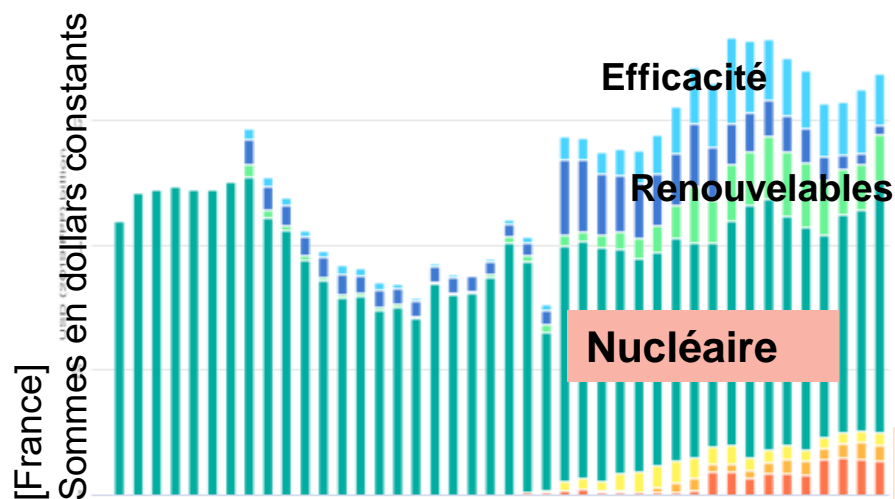
France. L'équipement des centrales françaises en « barres grises » leur permet une flexibilité de production importante, jusqu'à leur minimum de production à 25% environ. Les centrales équipées font jusqu'à 125 grandes modulations par an (graphe). Ces équipements produisent aussi un réglage de fréquence. En moyenne, chaque réacteur est modulé 30 fois par an. L'impact de ce « cyclage thermique sur le vieillissement des cuves de réacteur n'est pas connu.

R&D nucléaire: le village gaulois résiste



Selon les statistiques de l'Agence Internationale de l'Energie sur la Recherche-Développement, dans le monde développé, le nucléaire s'efface derrière l'efficacité, les renouvelables et le reste des systèmes (en haut).

En France, le nucléaire français (en bas) conserve la **majorité des financements de la recherche-développement** pour l'énergie [51% en 2020, 1 Milliard d'Euro par an]



<https://www.iea.org/reports/energy-technology-rdd-budgets-2022>

Creusot-Loire

Areva a avoué que **plus de 400 pièces** produites depuis les années 60 par l'usine comporteraient des "irrégularités" - 66 de ces pièces sont actuellement utilisées par des réacteurs français en fonctionnement. Des documents prouvent qu'EDF et Areva **étaient alertées dès 2005**



Nucléaire : la forge du Creusot veut oublier les fraudes (Le Monde, 30/7/2018) : « *un des épisodes les plus inquiétants de la filière nucléaire française : **des falsifications de dossiers à grande échelle et la manipulation de données sur les composants qui sortaient des forges du Creusot*** »

https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/07/30/nucleaire-la-forge-du-creusot-veut-oublier-les-fraudes_5337370_3234.html /

Made in Japan

La **cuve du réacteur nucléaire EPR** en construction à Flamanville (Manche), fournie par Areva, a été à **80% forgée au Japon**, a indiqué à l'AFP le groupe nucléaire français après des informations de presse. L'essentiel du "forgeage" de la **pièce cruciale du réacteur** (425 tonnes, 11 mètres de haut) vient de Japan Steel Works (JSW) au Japon, seul en mesure de la mettre en œuvre.

Attention, la « **fabrication** », c'est-à-dire l'usinage, perçage, finitions a bien eu lieu au Creusot (France).

[Autres grosses pièces, les générateurs de vapeur, ont été forgés à 30% au Japon le reste au Creusot]

[la cuve de Olkiluoto (Finlande) a été forgée par un autre industriel japonais, Mitsubishi Heavy Industries]

[dépêche AFP 30 janvier 2014 sur <https://www.connaissancedesenergies.org/afp/nucleaire-la-cuve-de-lepr-de-flamanville-forgee-80-au-japon-140130>]

Questions ?



Les Simpsons. La centrale nucléaire de Springfield comprend deux tranches du modèle Fissionator 1952. Elle a évité la fusion de son cœur à maintes reprises, grâce à l'action *fortuite* de son chef de la sûreté, Homer Simpson.

Plan



Annexes:

- Expert-minute: la radioactivité
- **Détails des trois risques**
- L'assurance-qualité et la sûreté
- Les mini-réacteurs « SMR » et autres cycles nucléaires
- Discussions d'économistes
- Aux origines, les seventies

1. Trois risques :
Prolifération; Déchets;
Accidents
2. Les boomers, le
climat et le
développement
durable
3. Démographie des
réacteurs et situation
mondiale rabougrie
4. Une France
spécifique et les
nouveaux EPR

Projet Manhattan

Essai Trinity de la **première bombe nucléaire** le 16 juillet 1945 à Alamogordo (Nouveau-Mexique).

L'explosif utilise le **plutonium** produit dans des réacteurs **à cycle ouvert** sur la rivière Columbia, à Hanford (Etat de Washington). Les terres sont expropriées en 1942 à des fermiers, ou confisquées aux tribus indiennes.

La réserve Hanford dite « W » comprend au total neuf réacteurs construits dans l'urgence et sans contrôle pendant la guerre froide, et cinq usines de retraitement du plutonium (pour 60 000 bombes construites). Le nettoyage du site (1500 km²) très contaminé continue.



Document public Jack Aeby

Energie concentrée. L'uranium fissile 235 ou le plutonium 239 ont une masse volumique sous forme métal d'environ 20, tandis que 4 à 10 kg suffisent (suivant la qualité d'enrichissement) pour fabriquer une bombe, soit un volume de ½ litre (la taille d'une orange).

Little Boy et Fat Man

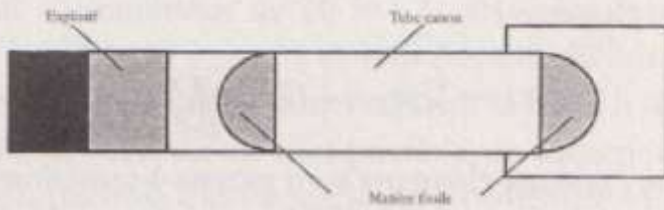


Figure 11.1 – Schéma d'une bombe à rapprochement.

J.L-Basdevant, « Maitriser le Nucléaire », Eyrolles 2012

La bombe atomique la plus simple (sans essais) est la bombe à rapprochement (« gun-type fission weapon »). Elle rapproche deux demi-sphères de plutonium (8 kg) ou d'uranium hautement enrichi (25 kg à +90% d'U235).

Plus petite et plus puissante, une **bombe à implosion** demande la maîtrise d'explosifs et de détonateurs déclenchés de façon synchrone. Sa combinaison avec une charge d'éléments légers permet de créer la pression et la température (50 millions de degrés) pour les armes à fusion (la **bombe H** ou « *super* ») (*). L'uranium enrichi pourrait descendre à 20% pour une masse plus importante et peu d'intérêt militaire.

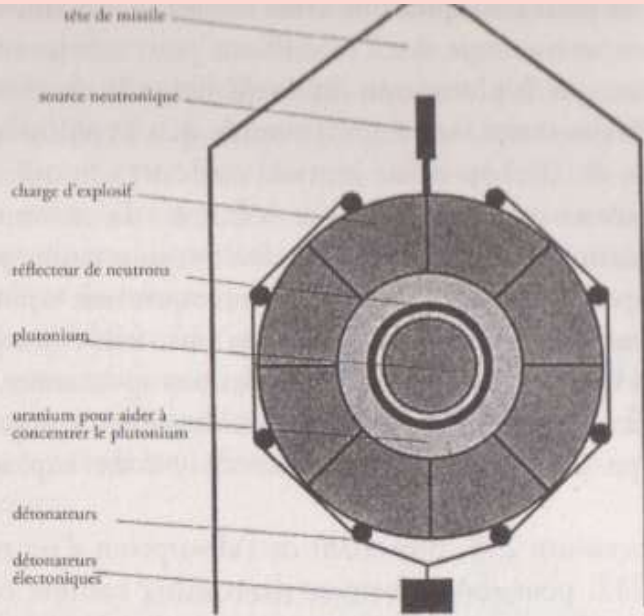
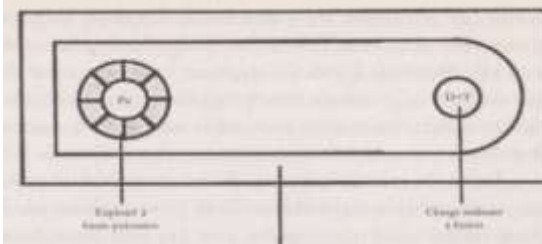


Figure 11.4 – Éléments d'une arme nucléaire rudimentaire.

Pour réaliser une arme nucléaire simple, disposer la matière fissile est la principale condition. Le secret multiplie cependant le coût.



Dans l'arme à fusion, l'enveloppe d'uranium permet de concentrer les neutrons vers la charge

Une révolution scientifique 1945

DEUXIEME ANNEE. — N° 199.

PRIX : 3 francs

DERNIERE EDITION

* MERCREDI

Directeur Robert BEVE-MERY

Comité de Direction :
Karl COURTIN
Christian FUNCK BRENTANO

Direction, Rédaction et Administration :
5, rue des Italiens - PARIS

Adresses télégraphiques : JOURMONDE-PARIS

TELEPHONE : Cinq lignes, 96.48. - TAIPOUT 16.48

PRIX DE L'ABONNEMENT

PARIS ET DEPARTEMENTS } Six mois
Trois mois

LES ABONNEMENTS PARTENT DES 1^{er}, 15 et 31 DE CHAQUE MOIS

Un numéro (PARIS et DEPARTEMENTS)

ABONNEMENTS : en France de "MOIS", 5,70
CHIQUE POSTAL : PARIS N° 4257

Le Monde

Paris, le 7 août 1945.

BULLETIN DE L'ETRANGER

LE PROBLEME ESPAGNOL

On a lu hier, dans nos colonnes, la réponse que le général Franco a faite, par la radio, au communiqué de Peñíscola. Il répondait comme « arbitraires et injustes » les expressions concernant son régime, où il voit le résultat « de la campagne diffamatoire des réfugiés rouges et de leurs acolytes à l'étranger ».

Après une brève allusion à la conférence de San-Francisco — qui avait déjà exclu l'Espagne franquiste du cercle des Nations unies — le Caudillo déclare fièrement que l'Espagne ne demandera pas à être admise aux futures réunions internationales et qu'elle n'acceptera rien qui ne soit compatible avec sa tradition et les services qu'elle a rendus à la paix et à la culture humaine... Et il rappelle que des « raisons semblables l'avaient déjà empêché, alors qu'elle était encore une monarchie, à se retirer de la Société des Nations... ».

Cela n'empêchera pas, au reste, l'Espagne de « continuer à collaborer à l'avantage de la culture humaine ».

Une révolution scientifique

LES AMERICAINS LANCENT LEUR PREMIERE BOMBE ATOMIQUE SUR LE JAPON

Washington, 6 août. — La première bombe atomique de cette guerre a été lancée aujourd'hui par un avion américain sur l'importante base navale d'Hiroshima, dans l'île de Honshu.

C'est le président Truman lui-même qui, par un communiqué, a annoncé à la Maison Blanche la mise en action de cette nouvelle bombe, dont la force d'explosion est 2.600 fois celle de la plus grande bombe connue jusqu'à présent dans l'armée américaine.

LA DECLARATION DU PRESIDENT TRUMAN

En annonçant lui-même que la première bombe atomique avait été lancée par un avion américain sur la base navale d'Hiroshima, le président des Etats-Unis a précisé que le nouveau projectile est le résultat de recherches commencées dès 1940. « Nous avons maintenant, a-t-il dit, deux grandes usines et plusieurs établissements consacrés à sa fabrication. Plus de 45.000 ouvriers y sont employés. Nous avons dépensé deux milliards de dollars et nous sommes prêts à en dépenser encore deux milliards de plus ».

Oppenheimer, de l'université de Californie, a expérimenté la bombe atomique au champ d'aviation d'Alamo-Geordo (Nouveau-Mexique). L'engin fut placé au sommet d'une tour d'acier, puis les techniciens se retirèrent à une vingtaine de kilomètres.

A l'instant de l'explosion, une fleur aveuglante éclaira la région entière. L'onde se serait cru, malgré la nuit, en plein midi. La chaîne de montagnes située à cinq kilomètres des observateurs se détachait en plein relief. Puis il y eut un roulement, un grondement soutenu et un déplacement d'air que tout le monde sentit et qui fit tomber deux des hommes de la mission. Immédiatement, les autres

Soixante villes japonaises sont maintenant détruites

Six cents superforteresses ont attaqué hier six nouvelles villes japonaises. Un seul appareil n'est pas rentré à sa base. Les quartiers industriels de Toyama, ville de 127.000 habitants, dans l'île de Honshu, notamment, ont été totalement rasés. On estime qu'un total soixante villes japonaises sont maintenant détruites. La population de quarante d'entre elles avait été prévenue avant les raids.

Le Q. G. du général Mac Arthur communique que plus de 400 bombardiers et chasseurs américains ont attaqué les objectifs militaires du port de Tsurumi, au sud de Kios-Siou. C'était la plus puissante attaque coordonnée sur un seul objectif.

On estime à Londres que la guerre contre le Japon va entrer dans une phase nouvelle après les bombardements massifs des centres industriels et la prise de commandement par le général Mac Arthur des forces alliées allant de Formose au sud du Japon. Les commentateurs britanniques constatent l'efficacité

ENTRETIENS TURCS A BEYROUTH

Beirut, 6 août. — A Ankara, la délégation turque a participé à la conférence de Peñíscola, à ce des entretiens sonnaillés officielles du syrien sur la possibilité d'entente pour la reconnaissance de l'indépendance et du Liban.

La Turquie, qui a déjà les rumeurs sur ses intentions en Algérie, demande que la Syrie réclame pas le San drette. — (A. P.)

LE BILAN DE L'ÉP EN BULGARIE

Sofia, 6 août. — Depuis peu dernier, date à laquelle a rompu avec l'Allemagne, aux côtés des Alliés, l'ÉP a été condamné à mort par populaires.

D'autre part, sur les conseils à la cour et d'habiles de la politique pré pays et traculta en Justice condamnés à la peine capitale 1521 personnes ont été co détention perpétuelle, tant autres doivent subir d'emprisonnement.

Enfin, sur les 618 prisonniers que comptait la Bulgarie...

L'un des titres les plus malheureux du journal Le Monde...

La promesse

Le discours “**Atoms for Peace**” de 1953 du Président Eisenhower aux Nations-Unies donne lieu cinq ans après à l’**Agence Internationale de l’Energie Atomique (AIEA)**.



<https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech> Document Librairie présidentielle Eisenhower

La phrase « **too cheap to meter** » est de Lewis Strauss (Commission de l’Energie Atomique US). Selon lui, nos enfants et nos petits enfants auront du courant « trop bon marché pour être compté, juste comme notre eau est trop bon marché pour être comptée. »

Sur les usages civils de l’atome, voir par exemple le film enthousiaste « Monsieur Prudent »
https://www.laradioactivite.com/site/pages/Monsieur_Prudent.htm

Atoms for Peace



Après la Crise de Cuba (photo), les Etats-Unis négocient avec l'URSS le Traité de Non-Prolifération (TNP) nucléaire de 1968. Il s'agit de limiter la possession de l'arme atomique aux pays qui en disposent déjà, et de faciliter la production d'énergie ou les usages civils (médical...) du nucléaire

L'AIEA vise deux objectifs parfois contradictoires :
Promouvoir **l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques** et veiller à ce que cette technologie **ne puisse servir à des fins militaires** en vue de produire une arme nucléaire
Les questions de **sûreté nucléaire** sont ajoutées par la suite.

Accidents will happen



1980. Les dommages suite à l'explosion de l'amorce d'un missile nucléaire Titan II à Damascus en Géorgie (Etats-Unis). Il faisait suite à la chute d'une clé à douille non standard par l'équipe de maintenance et à l'éjection de sa charge nucléaire à 200m.

Officiellement aux Etats-Unis, il y a eu 32 « broken arrows », détonations, vols ou accidents et bien plus de « bent spears » plus mineures. [Eric Schlosser 2022, *COMMAND AND CONTROL. Nuclear Weapons, the Damascus Accident, and the Illusion of Safety*, Penguin]

Nucléaire militaire. Le danger des accidents ou des vols va être proportionnel au nombre de charges nucléaires et à celui des pays possesseurs de l'arme.

En réalité, le risque vient plutôt des défauts de la chaîne **complexe et rigide** de détection et de commandement nucléaire. Jusqu'ici tout va bien.

Quelles conséquences?



L'AIEA représente un système de conseil et de contrôle de sûreté inscrit dans le système de l'ONU, avec ses failles et ses atouts*. Il s'agit en effet d'un système « intergouvernemental » où la critique des Etats reste très limitée. L'AIEA joue aussi un rôle délétère quant au régime de protection contre les radiations.

Surtout, le nucléaire se confirme comme **une prérogative exclusive des Etats**. Beaucoup d'institutions multilatérales refusent de financer le nucléaire.

[* Il n'y a que dans James Bond que des méchants volent du plutonium – mais les Etats moins sérieux voire délinquants restent impunis]

Le contrôle des matières nucléaires limite fortement le commerce des combustibles nucléaires pour des états qui « font la bombe ». Ainsi l'Inde, qui se retrouve en violation du TNP après son « Expérience Pacifique Nucléaire » (explosion) de 1974, ne peut plus alimenter son programme militaire ni ses centrales pendant 20 ans.

EURATOM



Paul-Henri Spaak et Jean-Charles Snoy et d'Oppuers

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:12012A/TXT>

1957. Signature à Rome du Traité de la Communauté Européenne de l'Energie Atomique (EURATOM), simultanément à la Communauté Economique Européenne (CEE).

Selon les termes du Traité, *"l'énergie nucléaire constitue la ressource essentielle qui assurera le développement et le renouvellement des productions et permettra le progrès des oeuvres de paix"*. Mais l'ambition est ensuite déçue car les états ne jouent pas le jeu. L'occasion d'une mise en commun est perdue.



L'Atomium du Heysel à Bruxelles (1958, rénové récemment), représente la structure du fer, symbole de la richesse de l'Europe et de la Belgique

Un traité « zombie »

EURATOM reste un traité figé en 1957 dans ses objectifs (par ex. il est prévu l'usage civil des “explosifs nucléaires”!)

En théorie, contrôle des matières nucléaires et indépendance de l'Europe sont au programme. En réalité, **un rôle limité** par le refus des Etats de concéder leur souveraineté, avec en particulier le blocage de la France.

Il reste un budget (par ex. 1,6 Mds sur 2014-2018), **sans droit de regard du Parlement Européen** (créé seulement ensuite dans la cadre de la Communauté Européenne puis l'UE).

Tout nucléaire



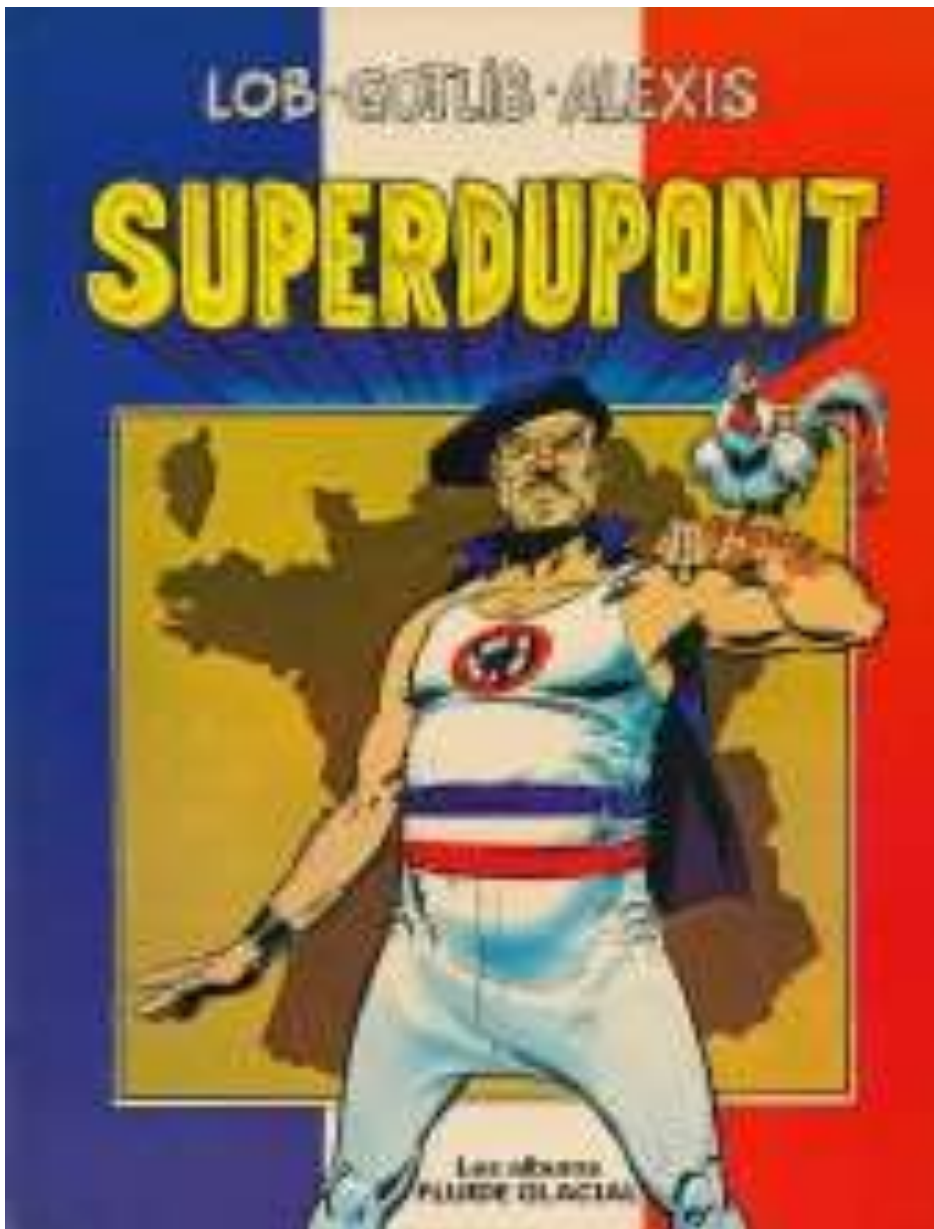
Document US-Air Force.

Seul avion construit visant la propulsion atomique, le NB-36H est un « Convair B-36 Peacemaker » muni d'un réacteur destiné à remplacer la chambre de combustion d'un turboréacteur. Plusieurs cycles complexes et risqués (et l'équipage? et les crashes?) sont testés au sol. Ces programmes sont annulés par John Kennedy en 1961.

Voir aussi le film de Stanley Kubrick 1964. « Docteur Folamour »...
<https://www.qwant.com/?q=doctor%20strangelove&t=web&overlay=open>

Le rêve de nucléaire ne s'arrête pas à la production électrique. *Science et Vie* ou *Popular Mechanics* s'extasient longtemps sur l'**avion nucléaire** et sur la **fusée nucléaire**

Survit le **satellite nucléaire**. Un tel satellite espion (Cosmos 954) s'écrase en 1978 au Canada. 65 kg de débris radioactifs doivent être décontaminés sur des centaines de kilomètres.

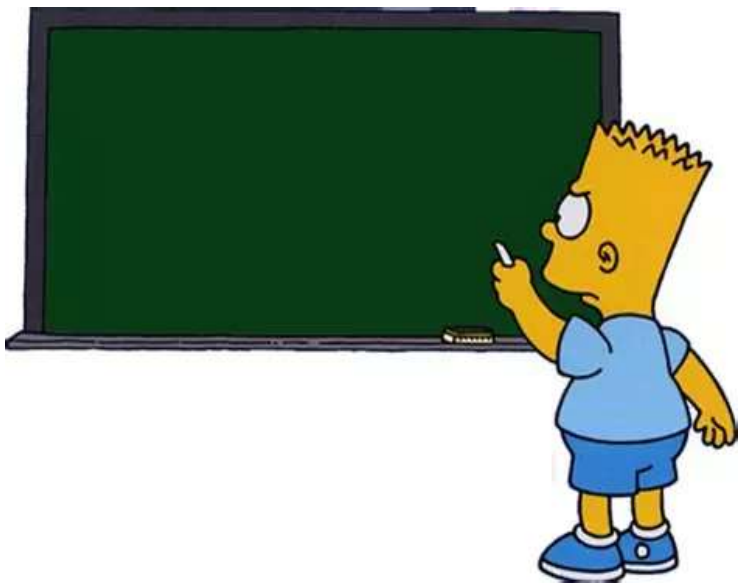


Superdupont éditions Fluide Glacial

Et la France?

Sur le désarmement, la France n'a pas signé le **Traité d'Interdiction des Armes Nucléaires (TIAN)**.

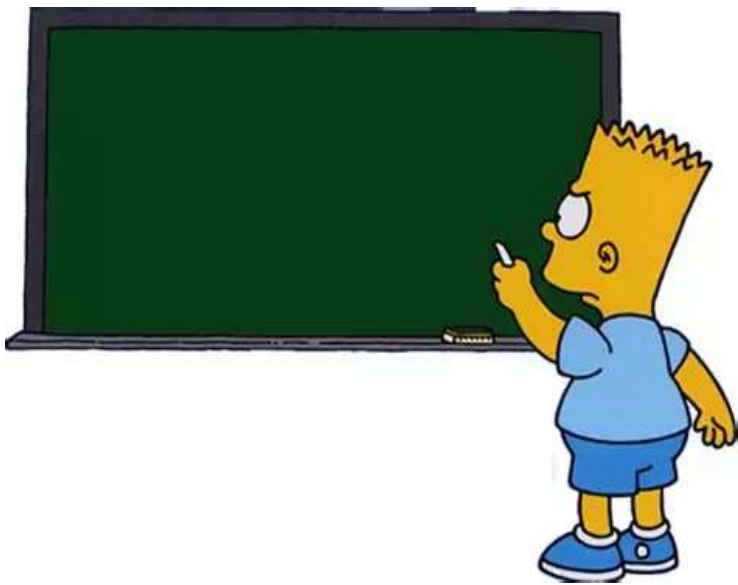
De manière générale, sur ce plan la France est avant tout **souverainiste**, et s'est refusé à une coopération plus poussée autour du traité Euratom.



Test

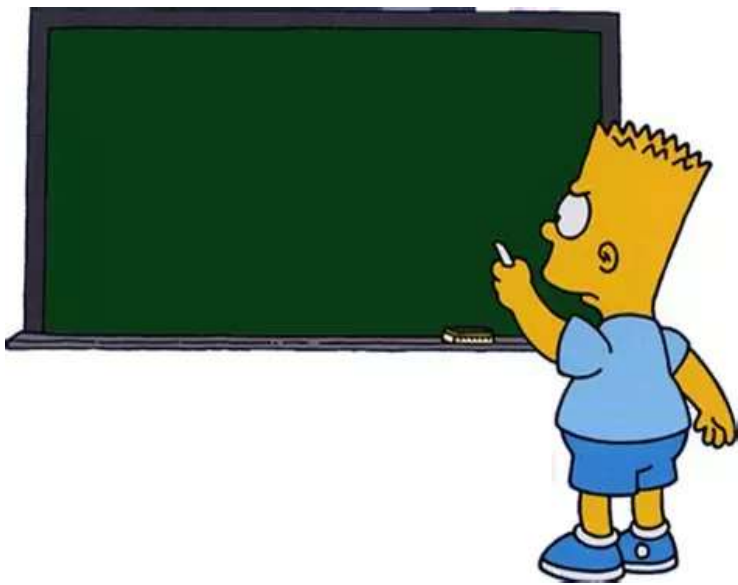
- **La prolifération nucléaire**

- A. Elle désigne la multiplication des réacteurs fonctionnant à l'uranium enrichi
- B. Ce terme désigne la multiplication des ravageurs agricoles sous l'influence de la radioactivité
- C. C'est l'acquisition de la bombe atomique par des états qui ne l'ont pas encore
- D. Cela signifie que les régulateurs sont débordés et ne peuvent pas faire face aux tâches de sûreté



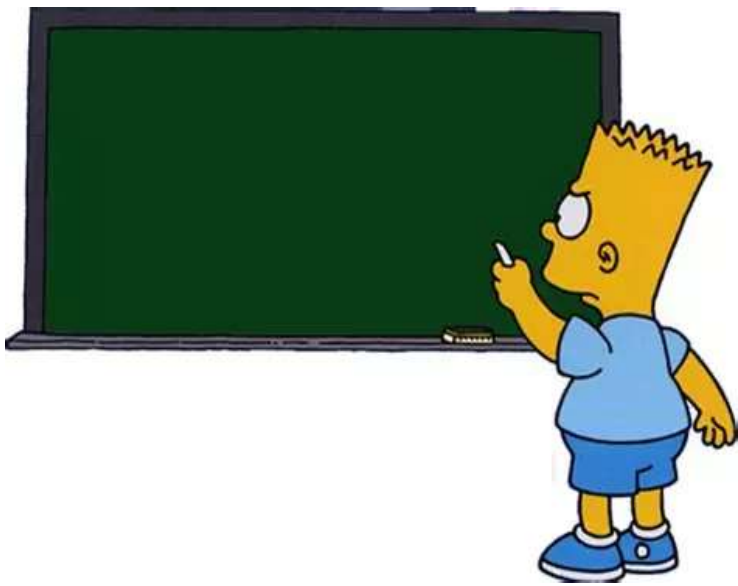
Test

- La prolifération nucléaire
 - A. Elle désigne la multiplication des réacteurs fonctionnant à l'uranium enrichi
 - B. Ce terme désigne la multiplication des ravageurs agricoles sous l'influence de la radioactivité
 - C. **C'est l'acquisition de la bombe atomique par des états qui ne l'ont pas encore**
 - D. Cela signifie que les régulateurs sont débordés et ne peuvent pas faire face aux tâches de sûreté



Test

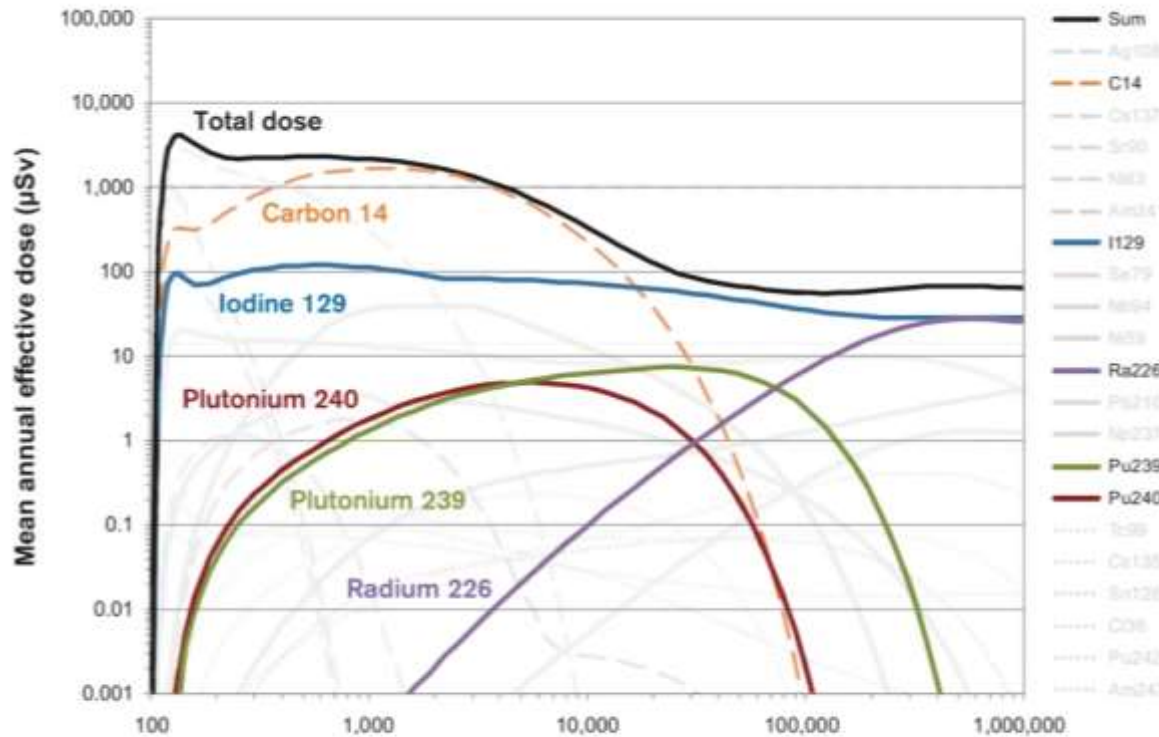
- Pourquoi le REP est dit « **à sûreté active** »
 - A. Les barres de contrôle sont asservies via un algorithme de suivi permanent du flux neutronique
 - B. Le déclenchement des barres de contrôle et d'arrêt est activé sans intervention des opérateurs
 - C. Les équipes de sûreté disposent de commandes redondantes hydrauliques et électriques
 - D. Le circuit primaire doit rester noyé en permanence par les pompes pour éviter une fusion du cœur



Test

- Pourquoi le REP est dit « à sûreté active »
 - A. Les barres de contrôle sont asservies via un algorithme de suivi permanent du flux neutronique
 - B. Le déclenchement des barres de contrôle et d'arrêt est activé sans intervention des opérateurs
 - C. Les équipes de sûreté disposent de commandes redondantes hydrauliques et électriques
 - D. **Le circuit primaire doit rester noyé en permanence par les pompes pour éviter une fusion du cœur**

Déchets



Echelle logarithmique en Années

Ci-dessus: Dose estimée à très long terme pour un fermier à la surface d'un dépôt de déchet pour plusieurs isotopes comme le plutonium ou l'iode 129. [Agence Suédoise des Déchets, SKB]

Les déchets nucléaires à vie longue durent des centaines de milliers d'année.

Ces durées sidérantes posent des problèmes techniques, démocratiques, philosophiques.

Les déchets viennent de l'**activation** des constituants du réacteur nucléaire; de la **production du combustible**, depuis la mine aux transformations jusqu'au chargement dans le réacteur; du **combustible usé**; du **retraitement** du combustible le cas échéant.

Référence sur le sujet (2005) : <https://www.global-chance.org/Petit-memento-des-dechets-nucleaires>

Déchets

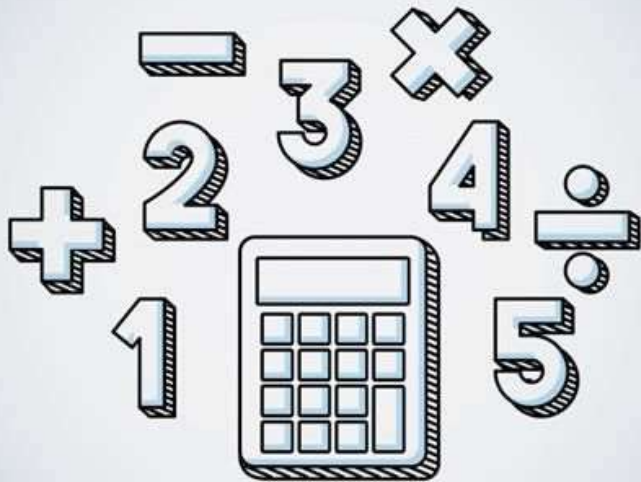


Occupation du bois Lejuc à Bure (document Reporterre).

Les oppositions au stockage des déchets nucléaires sont emblématiques des luttes écologiques de longue durée: Yuka Mountain aux USA, Gorleben en Allemagne, Bure en France.

La question des déchets nucléaires reste une épine dans le pied de l'industrie nucléaire. Elle est source d'oppositions farouches, de problèmes techniques et d'une gouvernance *impossible*. Elle bloque le développement ou l'accession du nucléaire dans un grand nombre de pays. En France, le devis officiel du stockage des déchets à vie longue est de plusieurs dizaines de milliards d'Euro.

La doctrine initiale de sûreté



Icône calculette. Pour calculer un risque d'accident, il faut en effet beaucoup de données. Les constructeurs d'éolien danois ont eu un problème similaire, résolu par une transparence accrue en échange du soutien public... mais seulement lors du démarrage de la filière

Le Price-Anderson Act de 1957 édicte un **plafond de responsabilité** à 10 milliards de dollars pour l'exploitant d'une centrale nucléaire. Le texte devait être temporaire, pour permettre à Westinghouse et General Electric de démarrer en tant qu'industrie civile. En échange de ce plafond, les constructeurs s'engagent sur un niveau très faible de risque d'accidents, comptés en « années réacteurs » :

- **Accidents graves** (fusion du cœur),
probabilité $< 1/100\ 000$

- **Accidents majeurs** (contamination du public) probabilité $< 1/1\ 000\ 000$

(*) Une année-réacteur représente l'expérience de fonctionnement d'un réacteur civil (1 GW) durant un an



2020. Le basketteur Kobe Briant s'écrase en hélicoptère. Des trolls ressortent un épisode des Simpsons montrant un crash en 1993. Comme dit Yardley Smith (la voix de Lisa Simpson) « *si vous êtes 30 ans à l'antenne, de temps en temps vous tapez dans le mille...* »

Explications au CERNA/Ecole des Mines. François Leveque sur le dilemme entre calcul de probabilités et expérience... L'auteur a une vision plutôt optimiste d'une **amélioration continue et mondiale des gouvernances via l'indépendance des autorités..**

<https://www.cerna.minesparis.psl.eu/Donnees/data07/746-FLEVEQUE.pdf>

Voir aussi <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00795152v2/document>

Observation ou calcul

Il y a deux méthodes, théorique et expérimentale, pour estimer la probabilité d'un accident.

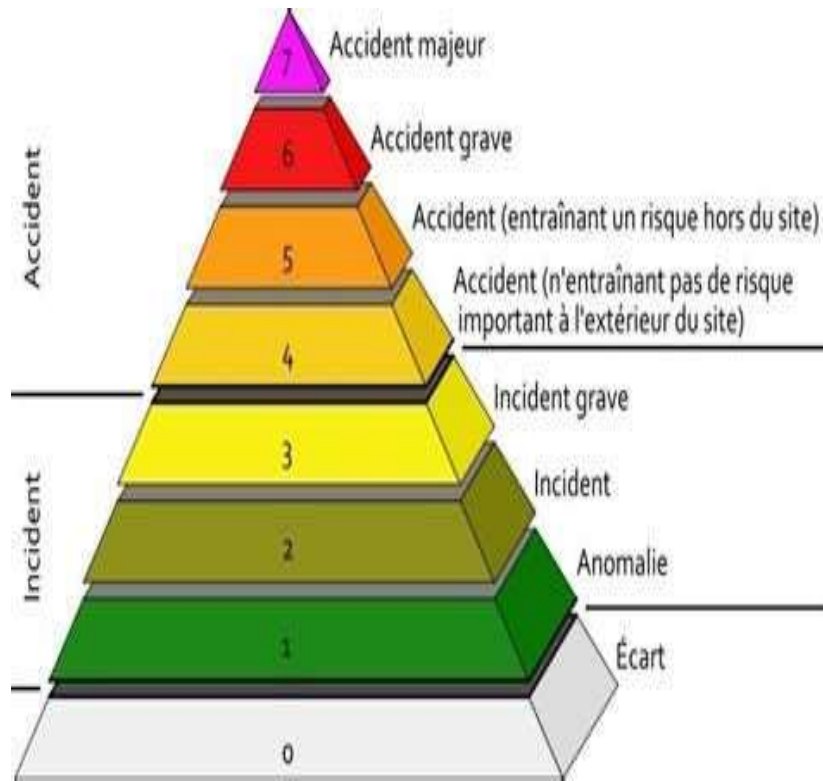
Théorique: on calcule une « espérance mathématique » sur la base de scénarios de simulation d'accidents prenant en compte les systèmes de défense et les risques de dysfonctionnement (arbres de causes et défaillances...)

Expérimentale : on prend en compte les accidents survenus, ce que l'on fait par exemple pour les accidents de voiture (méthodes assurantielles...)

La théorie de prévention des accidents vue de manière sympathique :

https://academic.csuohio.edu/duffy_s/Section_03.pdf

Combien d'accidents?



Désormais l'échelle des incidents-accidents est plus fournie et nuancée

<https://www.iaea.org/fr/ressources/echelle-internationale-des-evenements-nucleaires-et-radiologiques-ines>

Explications par le physicien Bernard Laponche:

http://mclams.free.fr/data/pages/revue_de_presse/2011_06_telerama2.pdf

Accidents graves (fusion du cœur) : Three Miles Island 1978; Tchernobyl 1986; Fukushima 2011 (3 réacteurs*), mais aussi Saint-Laurent-des-Eaux 1980, Lucens en Suisse 1969... [5 accidents]

Catastrophes majeures (radioactivité massive) : Tchernobyl 1997; Fukushima 2011 (3 réacteurs) [2 occurrences]

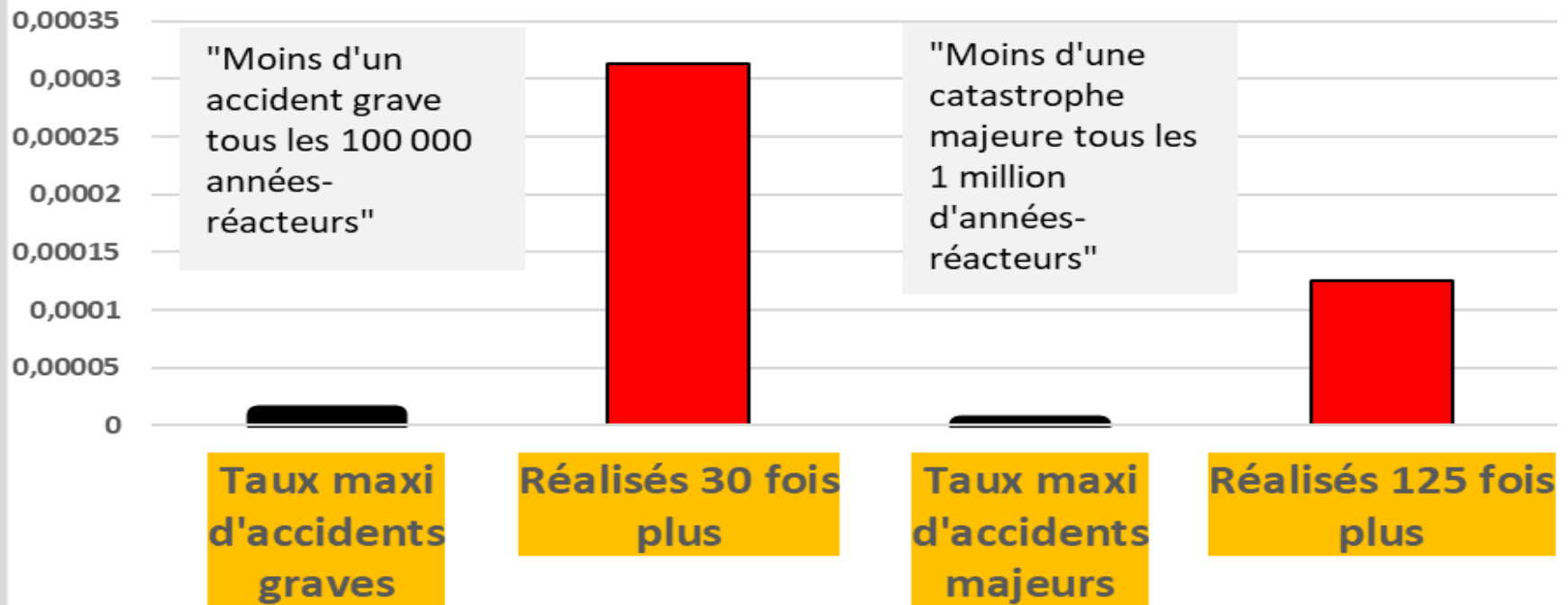
Nombre de **réacteurs commerciaux** exploités : 448 réacteurs soit **16 000 années-réacteurs** environ.

(*) Note: on a compté un seul accident pour les trois réacteurs endommagés à Fukushima.

(**) https://fr.wikipedia.org/wiki/Accident_nucl%C3%A9aire_de_Saint-Laurent-des-Eaux_de_1980

Engagements et réalité


Engagements de l'industrie nucléaire face à la réalité: Les occurrences d'accident réalisées depuis le « Price-Anderson act » dépassent largement les engagements de l'époque, basées sur des calculs de probabilité (ou d'*espérance mathématique*) utilisant des *arbres de défaillance*. Ces derniers ont été invalidés par les causes externes des accidents mais aussi par le caractère non-indépendant et non prévu de nombreuses causes d'incidents.



Selon l'industrie nucléaire, deux catastrophes seulement sur 60 ans et 16 000 années-réacteurs sont la preuve que le nucléaire est sûr <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>

Le coût de l'accident

Le plafond de dommages et d'indemnisation est similaire partout dans le monde [en France de 0,7 milliard pour EDF]. Il contraste avec **le coût de l'accident de Fukushima**, estimé par le Japan Center for Economic Research, plutôt favorable au nucléaire, à 750 milliards de dollars. En France, l'IRSN (*) l'évalue à plus de 400 milliards d'Euro.



Bourgade abandonnée près de Fukushima. La banderole (en japonais) dit « **L'électricité nucléaire est notre avenir** » [document Bulletin of Nuclear Scientists].

(*) Note de présentation des travaux de l'IRSN sur le coût économique des accidents nucléaires entraînant des rejets radioactifs dans l'environnement. https://www.irsn.fr/Fuku2ans/Documents/IRSN_Dossier-Fukushima-2-ans_annexe-I-Cout-economique-accident.pdf

Autre point de vue : « Même si tous les 20 ans se produit un accident similaire, le nucléaire évitera toujours plus de risques qu'il n'en crée [...], estime Jean-Marc Jancovici selon qui l'accident de Fukushima a été surtout un problème médiatique majeur voir <https://reporterre.net/Jean-Marc-Jancovici-Fukushima-aura-surtout-ete-un-probleme-mediatique-majeur>



Selon un ancien Commissaire du régulateur de sûreté des Etats-Unis (la NRC), la probabilité “officielle” d’accidents est si faible qu’elle pourrait être assurée plus facilement que d’autres risques [*déjà couverts par les assureurs*] de ces entreprises. En refusant tout changement, ces constructeurs nucléaires montrent qu’ils **ne croient pas aux estimations** du risque en vigueur. Cela justifie selon lui d’autant plus la suppression de l’absence de garantie face à un accident majeur.

(*) Victor Gilinsky dans le Bulletin of Nuclear Scientists, <https://thebulletin.org/2020/02/the-us-government-insurance-scheme-for-nuclear-power-plant-accidents-no-longer-makes-sense/>

Les assureurs

L’absence d’assurance à l’échelle des accidents observés par le passé n’est pas qu’une **subvention implicite** au nucléaire.

Dans toutes les autres industries comparables, les techniciens des assureurs et leurs agents de confiance (contrôleurs techniques...) jouent un rôle bien plus important de surveillance, distinct et indépendant de celui des autorités publiques : aviation, transport maritime, industries chimiques, raffineries.

L’absence d’assurance est ainsi une **incitation pour les constructeurs et les exploitants nucléaires à moins d’efforts de sûreté.**



La question **des impacts des radiations sur la santé** a été tôt **capturée** par l'industrie nucléaire et une partie du monde médical de façon similaire à celle de l'amiante (*). L'Organisation Mondiale de la Santé s'est même engagé à ne jamais contredire l'AIEA sur ce terrain. Ce sujet est donc très difficile sans controverse, car même les revues à comité de lecture de la communauté atomique ne jouent pas leur rôle de « juge de paix ».

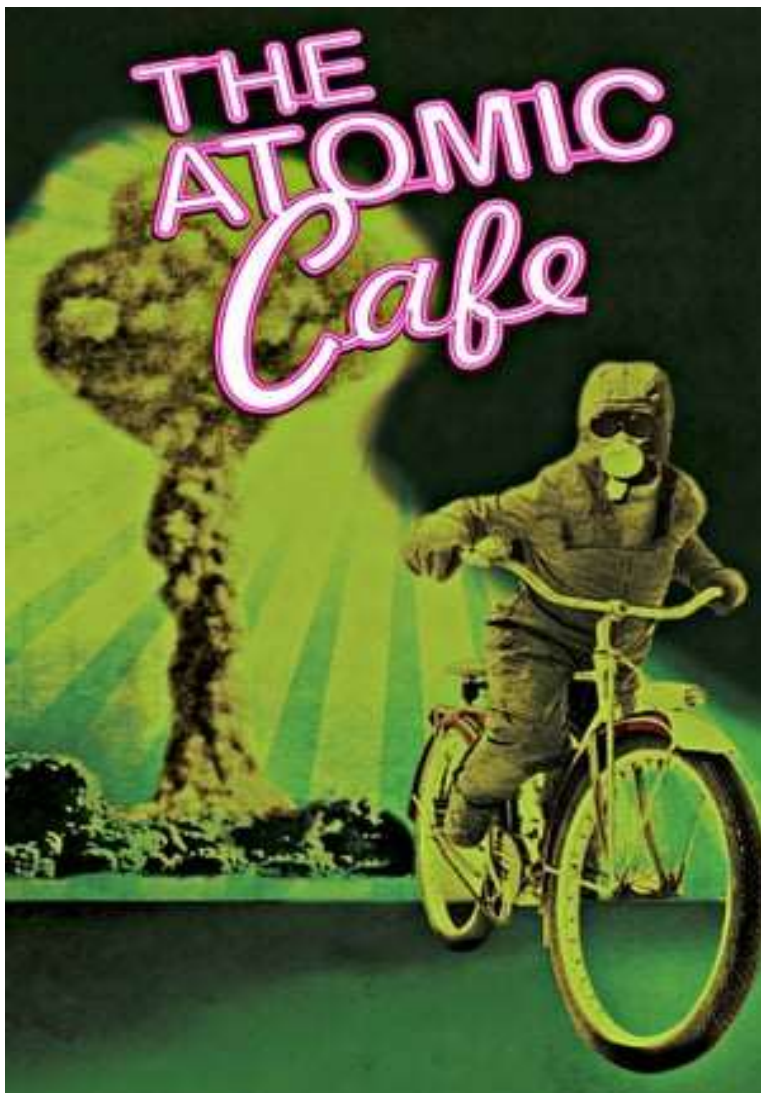
(*) Voir « la Comédie Atomique » de Yves Lenoir (2016, La Découverte) résumée ici : <https://reporterre.net/De-Tchernobyl-a-Fukushima-le-meme-mensonge-officiel-sur-la-radioactivite>

Et les victimes?

Les accidents de Tchernobyl et de Fukushima donnent lieu à une floraison de versions du nombre des victimes, sur la mortalité directe ou sur les irradiations des populations, ainsi que sur les cohortes des nettoyeurs et leur suivi (plusieurs centaines de milliers en ex-URSS).

Quel que soit le bilan humain ou son interprétation, l'accident est un **énorme traumatisme** pour les pays concernés (Ukraine, Biélorussie, Japon), très au delà du périmètre condamné.

Ce seul point –et le coût des accidents– suggère éviter d'entrer dans ces comptabilités macabres face à des débatteurs cyniques.



<https://francais2020-films.atlanticchristianschool.org/complete-film/26851/atomic-cafe-film/>

Les archives détaillées par le film illustrent la paranoïa de la guerre froide induite dans la population des Etats-Unis
<https://www.youtube.com/watch?v=IF0r1OdDIME>

Héritages des origines

Pour le **nucléaire civil actuel**, les conséquences de cette période des débuts de l'atome sont encore très prégnantes, spécifiques à cette l'industrie :

- ✓ Les **exportations sont limitées**, tant pour les technologies "duales" que pour les matières nucléaires, pour limiter la prolifération de la bombe.
- ✓ Les **déchets nucléaires** représentent encore aujourd'hui un problème non résolu de façon satisfaisante
- ✓ Les installations nucléaires sont **exemptées d'assurance** contre l'accident.

Exportations impossibles?

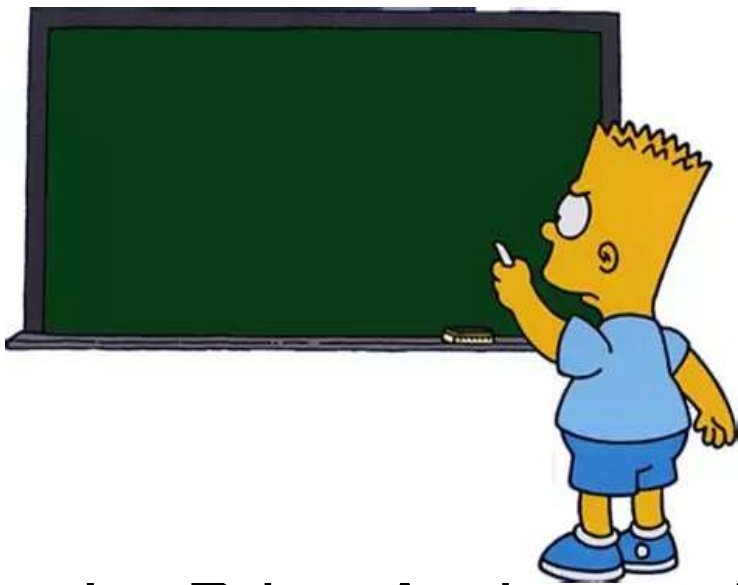


2007. Mouammar Khadafi vient de déclarer officiellement qu'il renonce au terrorisme et à la bombe. Le dictateur lybien plante sa tente dans les jardins de l'Élysée, courtisé par Nicolas Sarkozy. Contre les conseils des industriels du nucléaire, les deux présidents demandent la construction d'un EPR en Lybie

Les liaisons dangereuses

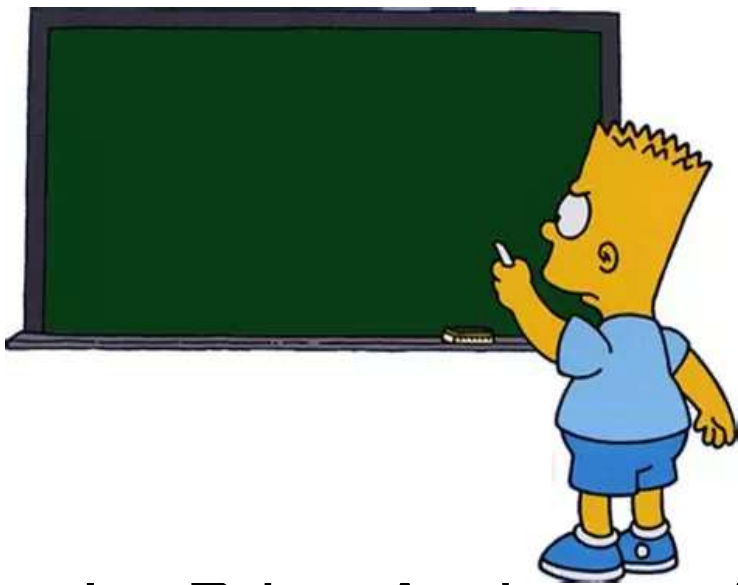


Saddam Hussein achète à Jacques Chirac le réacteur nucléaire Osirak fonctionnant à l'uranium très enrichi. Le réacteur est détruit en 1977 peu après par l'aviation israélienne pour l'empêcher le dictateur irakien de produire une bombe. Document : visite de Saddam Hussein (à droite) à Cadarache alors que Jacques Chirac (à gauche) est Premier Ministre de Giscard d'Estaing (1975)



Test

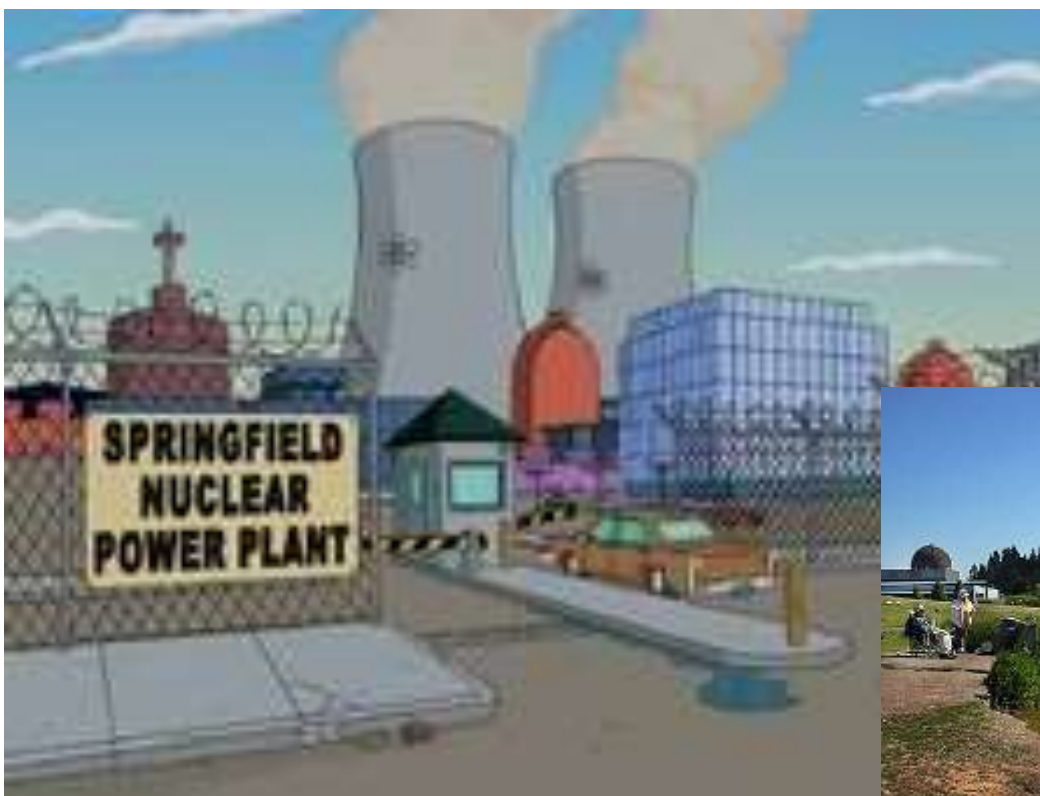
- Le Price-Anderson Act et la doctrine initiale de dispense d'assurance contre l'accident nucléaire
 - A. Pas d'accident avant 100 000 ans
 - B. Moins de une fusion du cœur pour les 100 000 années-réacteurs
 - C. Pas plus de 100 000 morts par accident de réacteur
 - D. L'assurance ne couvre que les dommages créés hors de la centrale
 - E. Probabilité pour les réacteurs européens civils d'avoir un accident majeur (avec relâchement de radioactivité) inférieure à 1 million d'années d'exploitation



Test

- Le Price-Anderson Act et la doctrine initiale de dispense d'assurance contre l'accident nucléaire
 - A. Pas d'accident avant 100 000 ans
 - B. **Moins de une fusion du cœur pour les 100 000 années-réacteurs**
 - C. Pas plus de 100 000 morts par accident de réacteur
 - D. L'assurance ne couvre que les dommages créés hors de la centrale
 - E. Probabilité pour les réacteurs européens civils d'avoir un accident majeur (avec relâchement de radioactivité) inférieure à 1 million d'années d'exploitation

Questions?



La centrale de Springfield a sans doute été inspirée par la centrale Trojan d'Oregon (construction et exploitation calamiteuse, stoppée en 1993).

La centrale vue par Matt Groening est dans un état délabré et n'a visiblement pas beaucoup de personnel qualifié. Elle n'a pas été entretenue depuis son ouverture (entre 1974 et 1980), elle enfreint 352 règles de sécurité nucléaire, les réparations coûteraient 56 000 000 de dollars. Tous les arbres autour de la centrale sont morts et on trouve des poissons de 3 à 6 yeux nageant dans la rivière proche.

Plan



Annexes:

- Détails des trois risques
- Les raisons des surcoûts
- L'assurance-qualité et la sûreté
- Les mini-réacteurs « SMR » et autres cycles nucléaires
- Discussions d'économistes
- Aux origines, les seventies

1. Trois risques :
Prolifération; Déchets;
Accidents
2. Les boomers, le
climat et le
développement
durable
3. Démographie des
réacteurs et situation
mondiale rabougrie
4. Une France
spécifique et les
nouveaux EPR



La procédure suppose d'une part le suivi d'une procédure prévue à l'avance, d'autre part une collectivité de travail respectueuse de cette procédure. **Pas de super-héros ni d'improvisation** dans le monde nucléaire (souvent moins haut en couleur qu'un film hollywoodien).

Ici le personnage de Shuri (Marvel Comics).

Sûreté procédurale

Pour éviter les accidents et créer une industrie la plus sûre possible, des méthodes procédurales poussées sont préconisées.

Pour être certain que les fabrications répondent aux exigences, on se base sur l'assurance-qualité (voir plus loin) pour la fabrication des ensembles et les pièces.

Pour le fonctionnement des réacteurs et du système, un respect de **procédures figées**, d'une **hiérarchie stricte**, et de **reports d'incidents** est aussi essentiel. L'expérimentation ou la créativité sont exclues du processus de construction et de production.



Devant les Parlementaires (*), André-Claude Lacoste, alors patron de **l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)** explique qu'il avait critiqué vertement ses homologues japonais avant l'accident de Fukushima de 2011 sur les défauts structurels de leur organisation de prévention et de réponse aux urgences. Mais ce « dialogue entre pairs » devait rester secret.

(*) Voir André-Claude Lacoste sur https://www.assemblee-nationale.fr/contrôle/opecest/surete_nucleaire/CR_audition_20110505.pdf

Evaluation par les pairs

L'évaluation par les pairs (régulateurs et opérateurs) est consubstantielle au système de l'AIEA, très chatouilleux –comme l'ONU– sur la **souveraineté**. Paradoxalement, le respect du secret est une condition pour que le système fonctionne.

Même dilemme dans les entreprises. L'échange ne sera libre que si la parole n'est pas divulguée ou pénalisée.

Au final, sans médias, sans syndicats indépendants et sans lanceurs d'alerte, le système risque de **se corrompre**. Cela pose le problème de la sûreté dans des pays dictatoriaux ou si la société civile et les médias sont faibles.

L'assurance qualité



Crash d'un Boeing 737 MAX de Ethiopian Airlines à Bukavu, Congo, après un autre crash d'un avion de Lion Air à Jakarta.

Une modification du moteur validée trop rapidement par le régulateur FAA aux Etats-Unis est en cause. L'Autorité voulait éviter à Boeing des délais coûteux. Le constructeur, responsable, doit indemniser les passagers.

Documentaire du New York Times:
<https://www.nytimes.com/2021/09/13/NYT-Presents/boeing-737-max-crash-frontline.html>

L'objectif est de garantir une **fiabilité des pièces** et des ensembles **critiques**, c'est-à-dire mettant en cause la sûreté du public ou des usagers

La conformité ne peut être démontrée que dans la **répétition exacte des processus** de fabrication, pour des pièces –notamment métallurgique- qui ne peuvent être contrôlées **sans destruction** (par ex. disque de turbine...)

Un système **procédural à l'extrême** pour habilitier et valider les fournisseurs

Une **réussite spectaculaire** dans l'aviation du point de vue des constructeurs

Une **confiance perdue en France** [affaire Creusot-Loire / Framatome] suite à des falsifications

La pièce critique...

Sa destruction risque d'entraîner la **perte de l'avion** ou un **accident nucléaire** : **disque de turbine** d'un moteur d'avion; **attache de l'aile**; **coude de circuit primaire** de centrale nucléaire; **couvercle de cuve**...



La liasse



Glossa ordinaria psalterii de Conrad Brampach, 15e siècle. Cet imposant manuscrit pèse 10 kg. La reliure est protégée par des pièces de métal ou ferrure ornées d'animaux fantastiques. Bibliothèque Humaniste, Sélestat (67).

<https://www.bibliotheque-humaniste.fr/musee/les-incontournables.html>

L'**assurance qualité** impose des dossiers imposants à tous les stades, de la conception à la fabrication.

Il s'agit en effet d'assurer la conformité méticuleuse aux choix validés initialement, **tant dans les procédés de fabrication** que dans les **caractéristiques mesurables** de la pièce ou de l'ensemble.

L'objectif est d'assurer une **traçabilité unitaire des pièces** et de conserver la mémoire **des incidents ou des dérogations**.

Le dossier papier (homologation, suivi des pièces) est souvent plus lourd que l'ensemble surveillé!

Creusot-Loire

Areva a avoué que **plus de 400 pièces** produites depuis les années 60 par l'usine comporteraient des "irrégularités" - 66 de ces pièces sont actuellement utilisées par des réacteurs français en fonctionnement. Des documents prouvent qu'EDF et Areva **étaient alertées dès 2005**



Nucléaire : la forge du Creusot veut oublier les fraudes (Le Monde, 30/7/2018) : « *un des épisodes les plus inquiétants de la filière nucléaire française : **des falsifications de dossiers à grande échelle et la manipulation de données sur les composants qui sortaient des forges du Creusot*** »

https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/07/30/nucleaire-la-forge-du-creusot-veut-oublier-les-fraudes_5337370_3234.html /

Made in Japan

La **cuve du réacteur nucléaire EPR** en construction à Flamanville (Manche), fournie par Areva, a été à **80% forgée au Japon**, a indiqué à l'AFP le groupe nucléaire français après des informations de presse. L'essentiel du "forgeage" de la **pièce cruciale du réacteur** (425 tonnes, 11 mètres de haut) vient de Japan Steel Works (JSW) au Japon, seul en mesure de la mettre en œuvre.

Attention, la « **fabrication** », c'est-à-dire l'usinage, perçage, finitions a bien eu lieu au Creusot (France).



[Autres grosses pièces, les générateurs de vapeur, ont été forgés à 30% au Japon le reste au Creusot]

[la cuve de Olkiluoto (Finlande) a été forgée par un autre industriel japonais, Mitsubishi Heavy Industries]

[dépêche AFP 30 janvier 2014 sur <https://www.connaissancedesenergies.org/afp/nucleaire-la-cuve-de-lepr-de-flamanville-forgée-80-au-japon-140130>]

Le nucléaire est une industrie d'états

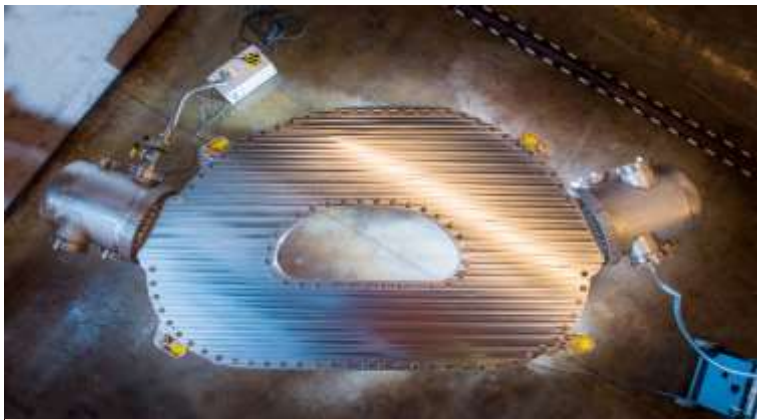


Comme le nucléaire, la monnaie ou l'armement sont des activités souveraines par excellence. Le rôle du privé y est limité par les exigences de la régulation. Selon l'AIEA, le choix nucléaire suppose des décisions pour « cent ans »...

- La prolifération et son statut particulier fait du nucléaire **une industrie liée aux états**
- Ceci a de nombreuses conséquences sur les exportations, similaire à celles du commerce des armes.
- Les financements sont aussi quasi-exclusivement bilatéraux, la plupart des banques multilatérales ne financent pas le nucléaire (Banque Mondiale...)
- Ceci pose la question de la corruption d'une part (cf. Creusot-Loire mais aussi l'exemple de la Corée*), et de la « **capture** » de l'état ou du régulateur par l'industrie. «
- Le développement par des « start-up » purement privées est avant tout une manipulation

(*) <https://www.technologyreview.com/2019/04/22/136020/how->

Et la fusion?



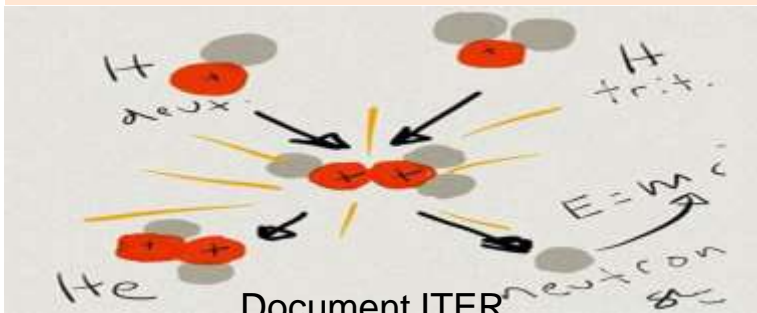
[MIT 2021] Les nombreuses avancées des super-aimants et des matériaux innovants font rêver à une machine à fusion simplifiée. Le « **breakthrough** » [invention capitale] est invoqué pour des start-up en mal de capitaux ou de prix scientifiques. Ce concept est aussi porté par l'idée –fausse selon le GIEC- que les technologies de rupture manquent pour la transition climatique.

La fusion de deux atomes d'hydrogène lourd génère une énergie considérable, mise en œuvre dans des explosifs militaires [bombe H]. Mais les conditions (pression, confinement, neutronique...) en font un gageure pour la production civile d'énergie.

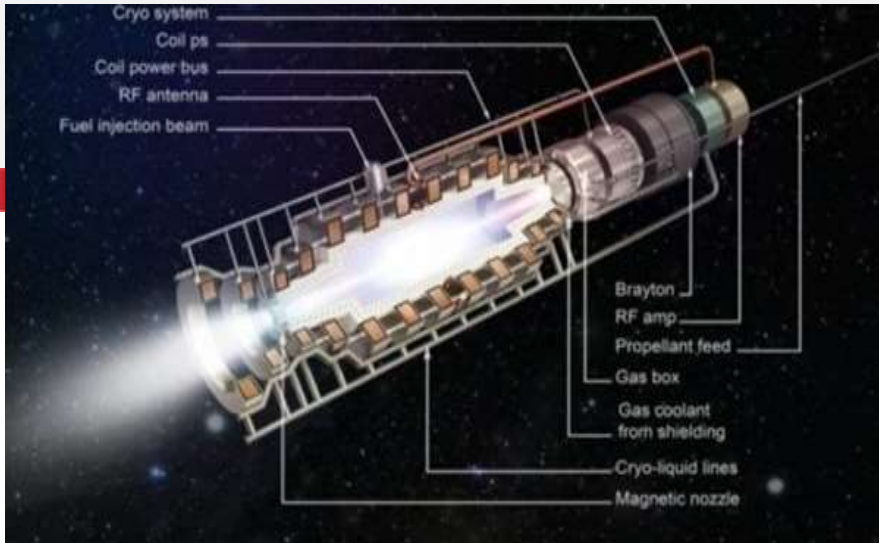
Un succès du projet de fusion nucléaire par confinement magnétique ITER serait suivi dans les années 2040 ou 2050 d'un réacteur DEMO de 500 MW encore plus onéreux.

Vingt ans plus tard, on commencera à parler de prix et d'usines de traitement des isotopes à isoler, de couverture fissile à retraiter, et surtout de bilans d'énergie total et de rendement de conversion de la chaleur produite, encore loin d'être convaincants.

[\[https://youtu.be/LJ4W1g-6JiY\]](https://youtu.be/LJ4W1g-6JiY)



Loin, très loin



Selon un documentaire de ARTE, un usage de la fusion pourra être le **voyage vers les étoiles après 2300** (sur 50-100 ans). Pour des raisons de bilan de masse, la sonde automatique utilise l'éjection d'ions et des réacteurs à fusion de grande dimension, produisant plusieurs fois l'énergie terrestre actuelle pour amener une capsule de 20 tonnes sur une étoile proche. Intéressant mais...pas très utile pour notre sujet.

Le GIEC ne prend pas en compte la fusion dont le débouché hypothétique se situe à la fin du siècle, donc très au-delà de l'échéance de la transition énergétique.

L'utilisation de l'énergie de la fusion a donc peu de sens dans le contexte climatique.

Cela n'empêche pas le sujet « fusion » de revenir périodiquement dans les conversation publiques...

<https://thebulletin.org/premium/2021-11/fusions-role-in-fighting-climate-change/>