



**FRANCE NATURE
ENVIRONNEMENT**

France Composition du parc nucléaire (au 1^{er} janvier 2022)

Puissance du réacteur



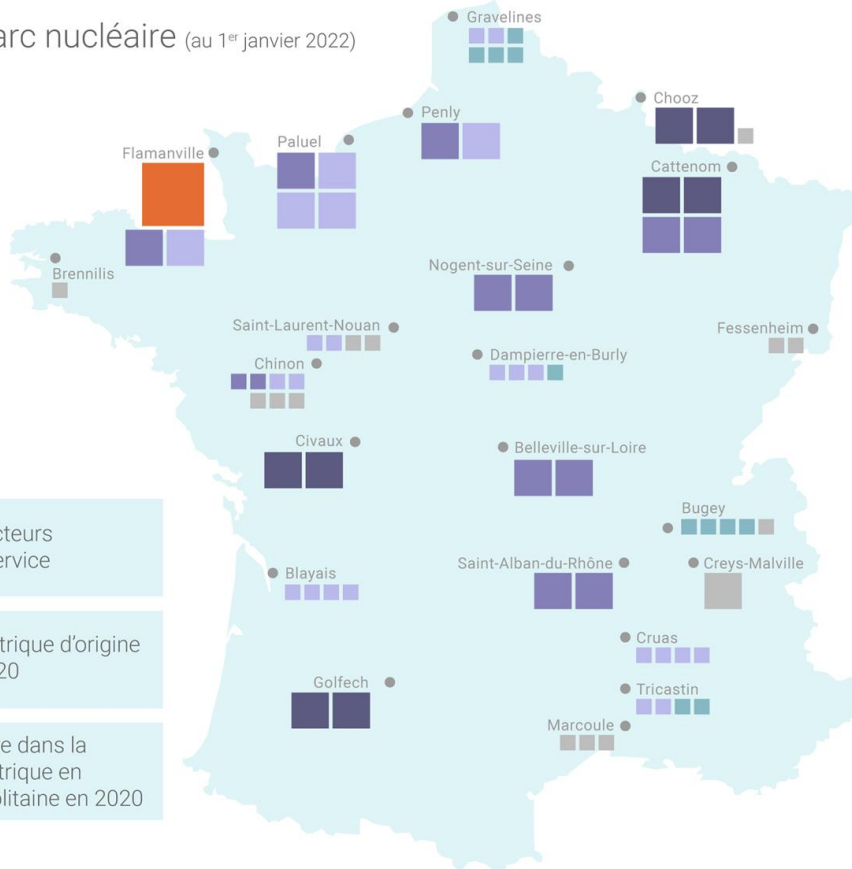
Année de mise en service



56 Nombre de réacteurs nucléaires en service

335,4 TWh Production électrique d'origine nucléaire en 2020

67,1 % Part du nucléaire dans la production électrique en France métropolitaine en 2020

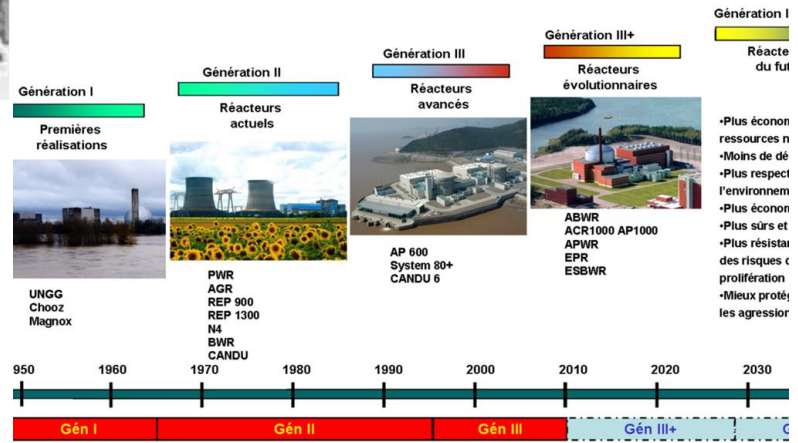
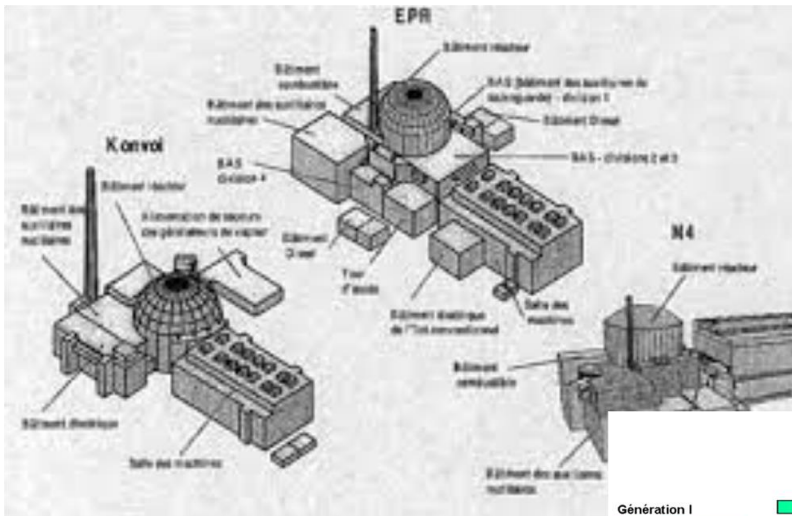


Connaissance des Énergies | Sources : EDF, RTE



Le passé d'une illusion !





EPR

Réacteur à eau pressurisée

Enceinte de confinement du réacteur

Enveloppe intérieure en béton avec paroi métallique

Enveloppe extérieure en béton armé

Générateur de vapeur

Système de refroidissement

Pompe de refroidissement

Récupérateur du corium (si le cœur fond)

Cœur du réacteur
(sous pression)

Réservoir d'eau

Pressuriseur

Turbines

Transforme la vapeur en électricité (turbine, alternateur, transformateur)

Réseau électrique

Salle de contrôle

Générateurs diesel

Fournit de l'électricité au système de sécurité du réacteur dans le cas de coupures d'électricité

Sources : AREVA, epr-reactor.co.uk

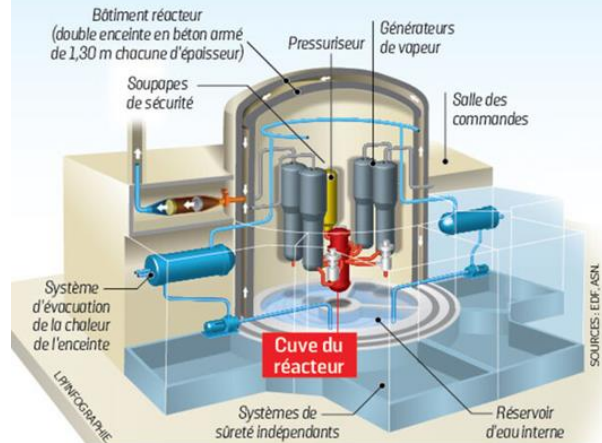
© AFP



Comment ce palier de réacteur a-t-il été mis en œuvre ?



EPR, dix ans de galères



- Décembre 2007** Début de la construction.
- Avril 2008** **Suspension des travaux** (fissures apparues à la coulée d'un bloc de béton de l'îlot nucléaire).
- Décembre 2008** **Difficultés techniques** ralentissant la construction du bétonnage du plancher du réacteur.
- Novembre 2009** Les autorités de sûreté nucléaire britannique, finlandaise et française annoncent **des failles du système de contrôle du réacteur**.
- Mars 2015** Procès de plusieurs filiales de Bouygues TP pour **travail au noir sur le chantier** de l'EPR.
- Avril 2015** Sérieuse **anomalie dans la composition de l'acier** du couvercle et du fond de cuve du réacteur.
- Juin 2015** **Défauts de fonctionnement dans les soupapes de sécurité** de l'EPR.
- Mai 2016** **Des pièces non conformes ont été livrées à l'EPR** (dont les dossiers ont parfois été falsifiés). Elles proviennent de la même usine qui a fabriqué la cuve de l'EPR dont l'acier présente un défaut.
- Avril 2018** **Des « écarts de qualité » ont été constatés sur 150 soudures** du circuit secondaire principal, qui relie le générateur de vapeur et la turbine qui produit l'électricité.

EPR* LE PROJET HINKLEY POINT C

Coût initial estimé : 23,3 milliards d'€

➤ Septembre 2019. Le coût final réévalué entre **24,3 et 25,5 milliards d'€**.

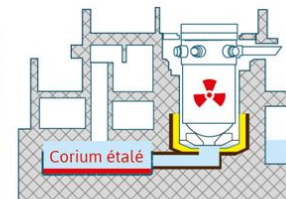
➤ 27 janvier 2021. Nouvelle réévaluation du coût final : entre **24,9 et 26 milliards d'€**.

Début des travaux → Début de production (unité 1) :
Mi-2019 → juin 2026 et non plus fin 2025.



Prise en compte de nouveaux risques

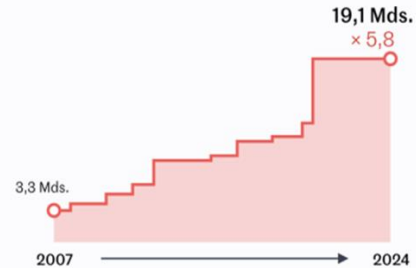
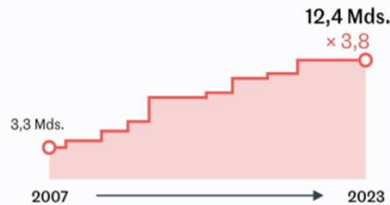
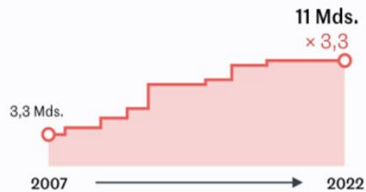
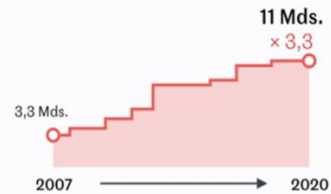
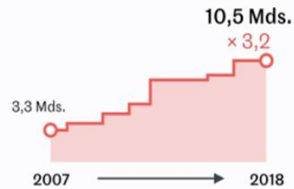
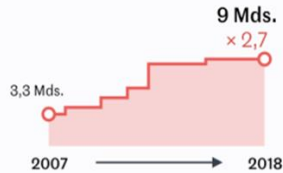
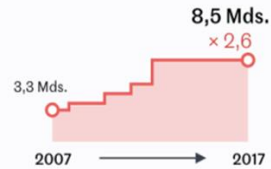
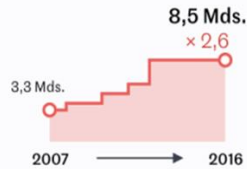
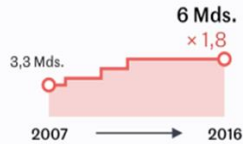
- Si fonte du cœur du réacteur : « récupérateur de corium ».
- 4 systèmes indépendants de refroidissement d'urgence.



- Si attaque terroriste : ➤ **enceinte de confinement** (2 parois en béton d'1,3 mètre d'épaisseur).
- **Protection sismique renforcée.**

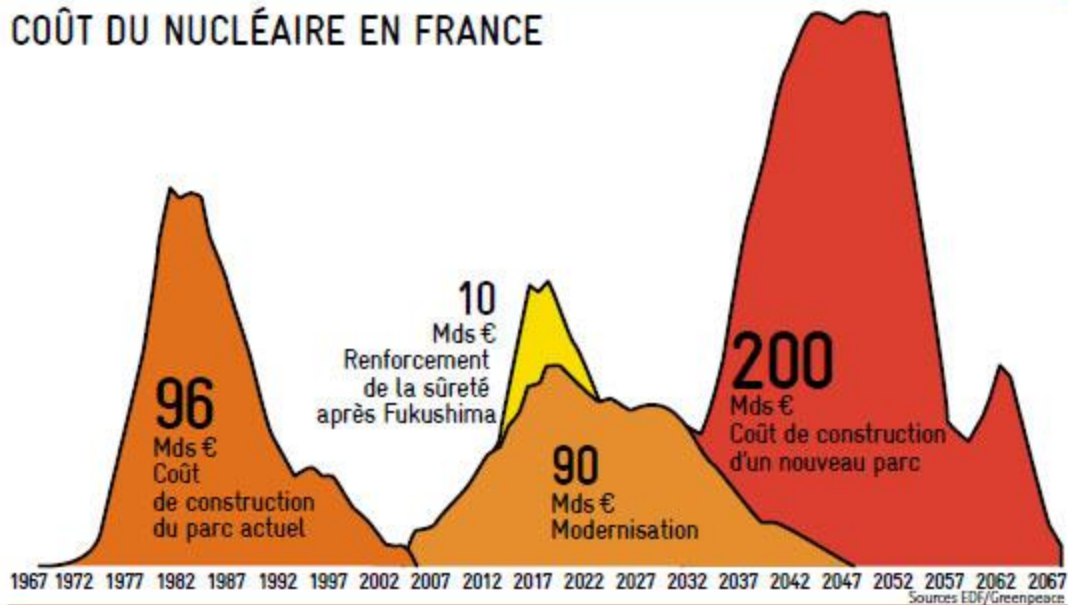
*réacteur à eau pressurisée. **China General Nuclear Power Group, opérateur chinois. Sources: médias, EDF. Images: EDF Energy, Areva. **VISACTU**





UN EPR et a fortiori plusieurs, combien ça coûte ?

COÛT DU NUCLÉAIRE EN FRANCE



Technologie	Réacteur	Pays	Capacité (MWe)	Début construction	Date de démarrage initialement prévue	Date de démarrage révisée	Coût de construction initial (USD/kWe)	Coût de construction révisé (USD/kWe)
EPR	Flamanville 3	France	1 600	Dec-07	2012	Fin 2019/ début 2020	2 475	7 800
	Olkiluoto 3	Finlande	1 630	Aug-05	2009	2020	2 430	> 6 260
	Taishan 1	Chine	1 660	Oct-09	2014	2018	1 960	3 150
	Taishan 2		1 660	Apr-10	2015	2019		
AP1000	Summer 2	États-Unis	1 117	Mar-13	2017	annulé	4 387	6 267
	Summer 3		1 117	Nov-13	2018	annulé		
	Vogtle 3		1 117	Mar-13	2017	2021		
	Vogtle 4		1 117	Nov-13	2018	2022		
	Haiyang 1	Chine	1 000	Sept-09	2014	2018	2 650	?
	Haiyang 2		1 000	June-10	2015	2018		
	Sanmen 1		1 000	Apr-09	2015	2018		
	Sanmen 2		1 000	Dec-09	2016	2018		
VVER 1200	Novovoronezh 2.1	Russie	1 114	Jun-08	2015	2016	2 224	?
	Novovoronezh 2.2		1 114	Jul-09	2016	2018		
	Leningrad 2.1		1 085	Oct-08	2013	2018		
	Leningrad 2.2		1 085	Apr-10	2016	2019		
Hualong 1	Fuqing 5,6	Chine	1 090	May-15	2020	?	2 800	3 500
	Fangchenggang 3,4		1 090	Dec-15	2020	?		

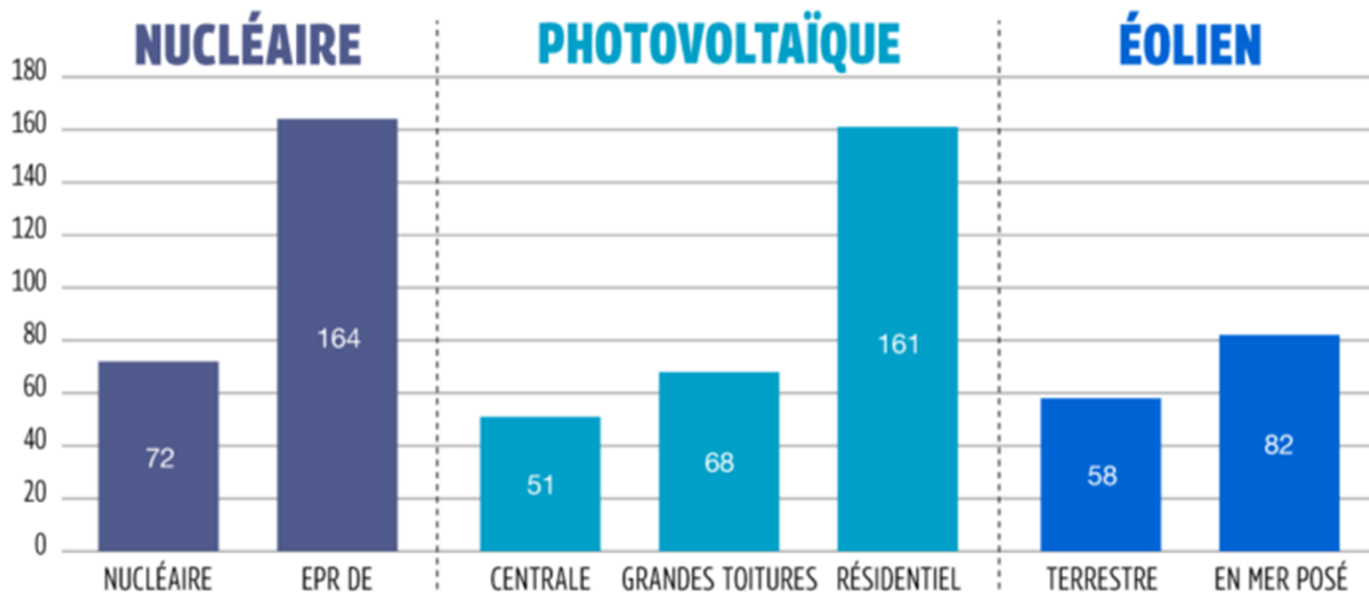
Tableau 1. Recensement mondial des réacteurs Gen-III connectés ou en construction en 2017

Source : SFEN (2018) : WNA website principalement et compilation d'autres informations publiées.
Les valeurs de coût indiquées ne sont pas «garanties» ni forcément comparables quant à leur contenu.



COÛT COURANT ÉCONOMIQUE DES DIFFÉRENTES ÉNERGIES

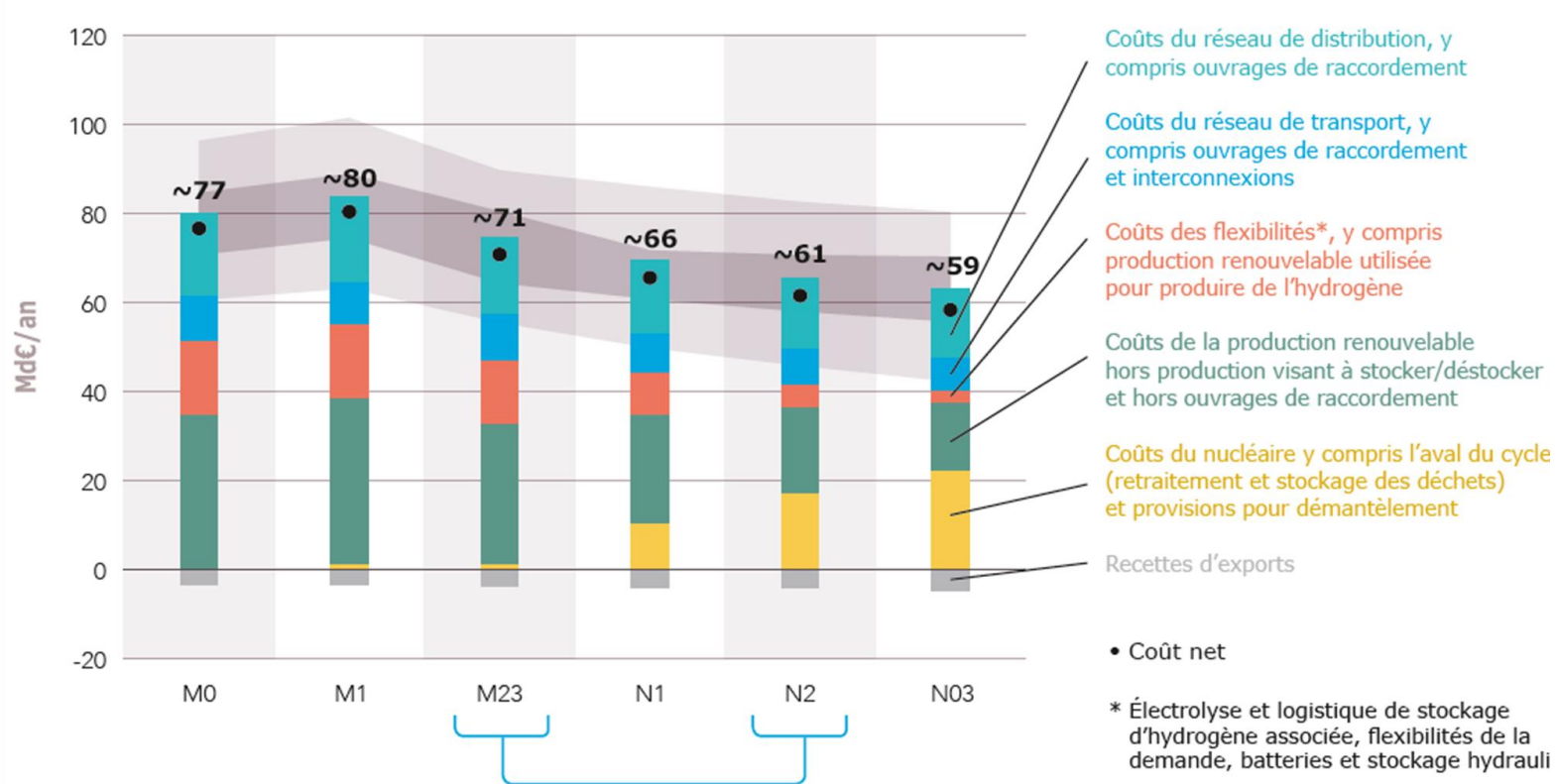
(en €₂₀₂₀/MWh)



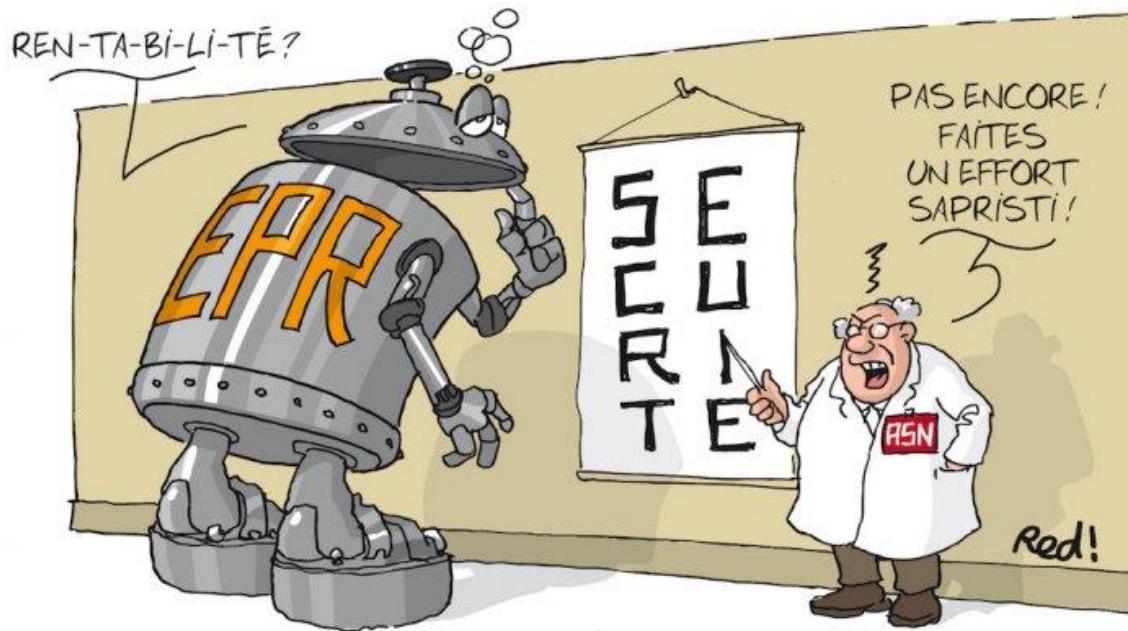
e : Greenpeace et Institut Rousseau, Les coûts actuels des énergies électriques bas-carbone, 2021



Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



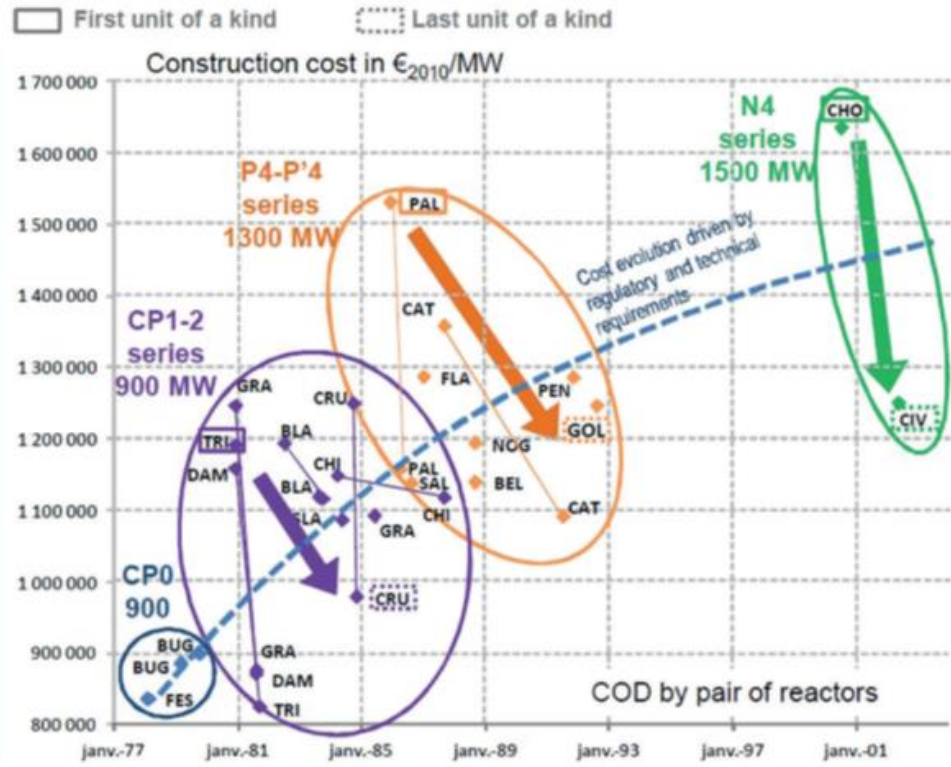
Peuvent-ils faire mieux ?



Overnight cost of 58 units
(63.2GW) : €₂₀₁₀ 83,2 bn

4% pre-operation
8% engineering

88% construction cost



Projets en cours	Olkiluoto 3	Flamanville 3	Hinkley Point C
MWe (net)	1 630	1 600	3 300
Durée de construction	13 ans	11 ans	6,5 ans
Coût de construction	> 8,5 Mrds€	10,9 Mrds€	23 Mrds€ *
€/kWe	> 5 200	6 812	7 000
Étude AIE/AEN horizon 2020	Finlande	France	Royaume-Uni
€/kWe ***	3 672	3 800 **	4 520
Facteur de progrès	- 28 %	- 44 %	- 36 %

* £19,6 Mrds (World Nuclear News, 03/07/2017) pour 2 réacteurs.

** Pour un réacteur de série en 2030.

*** Avec 1 USD = 0,75 € = 0,64 GBP.

Tableau 2. Coûts de construction estimés des futurs EPR

Source : AIE/AEN, 2015

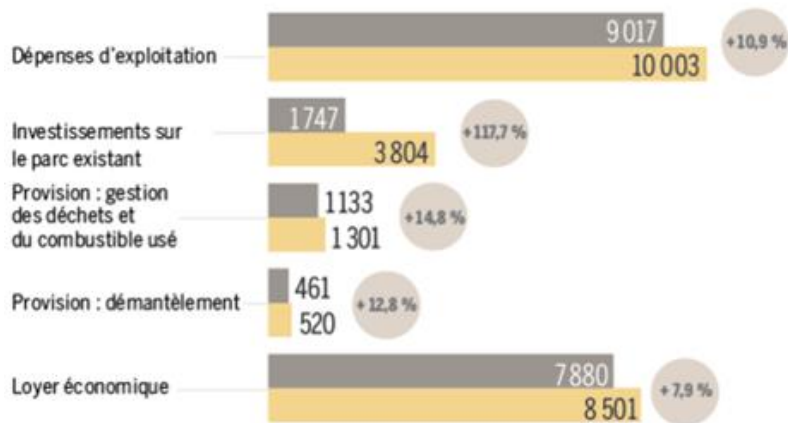


Deux milliards en plus consacrés à l'investissement en trois ans

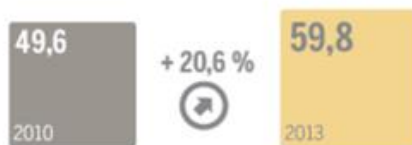
ÉVOLUTION DES COÛTS DE PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ NUCLÉAIRE
ENTRE 2010 ET 2013, EN MILLIONS D'EUROS COURANTS

■ En 2010

■ En 2013



COÛT DE L'ÉLECTRICITÉ NUCLÉAIRE, EN €/MWh



SOURCE : COUR DES COMPTES



Une seule solution, la simplification...



Les leviers d'optimisation



1. S'appuyer sur le REX des EPR en chantier dans le monde ainsi que sur le parc en exploitation



2. Améliorer la constructibilité



3. Faire appel à la préfabrication en usine et à la modularité



4. Industrialiser le produit, s'appuyer sur les bonnes pratiques, des autres industries et standardiser



5. Digitaliser l'ingénierie nucléaire et optimiser la construction grâce aux maquettes 3D & 4D



7. Tout en conservant le niveau de sûreté de l'EPR, parmi les plus élevés au monde



6. Fonctionner en entreprise étendue et mobiliser le tissu industriel



Projet de réacteur EPR Nouveau Modèle / EPR 2 : l'avis de l'IRSN sur les options de sûreté

18/07/2019



En janvier 2018, l'IRSN a présenté devant le Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires, les conclusions de son expertise relative aux options de sûreté du réacteur de 3e génération EPR Nouveau Modèle (EPR NM). L'IRSN a estimé que les choix de conception retenus par EDF sont de nature à garantir un niveau de sûreté pour l'EPR NM au moins équivalent à celui de l'EPR de Flamanville (Manche). Depuis, EDF a proposé des évolutions de certains choix de conception qui seront prises en compte pour la conception du réacteur, maintenant nommé EPR 2.

Les options de sûreté du réacteur EPR NM tiennent compte du retour d'expérience des réacteurs existants et en construction (comme celui de Flamanville) ainsi que des leçons tirées de l'accident de la centrale de Fukushima-Daiichi. La conception de l'installation est ainsi simplifiée afin d'améliorer sa constructibilité, sécuriser ainsi le planning de réalisation et faciliter l'exploitation du réacteur en toute sûreté. Si l'IRSN n'est pas favorable à l'augmentation de la puissance du réacteur proposée par EDF, les autres choix de conception retenus par EDF, par exemple le passage à une simple enceinte de confinement avec liner ou encore le passage de quatre à trois trains pour les systèmes de sauvegarde n'appellent pas de remarque.

Soulignant l'effort engagé par EDF pour renforcer la robustesse des systèmes supports (sources électriques, source froide) par une meilleure diversification et la recherche d'une meilleure indépendance entre les différents niveaux de la défense en profondeur, l'IRSN a estimé que les options de conception retenues étaient de nature à garantir un niveau de sûreté pour l'EPR NM au moins équivalent à celui de l'EPR de Flamanville. L'Institut a néanmoins incité EDF à examiner les innovations possibles en termes de conception de certains systèmes de sauvegarde tels que le système d'évacuation ultime de la puissance de l'enceinte ou le système de refroidissement de l'eau des piscines.



L'EPR2, UNE VERSION AMÉLIORÉE

UNE ENCEINTE ULTRA RÉSISTANTE

L'enceinte résiste aux agressions extérieures les plus violentes : ouragans, séismes, inondations, crash d'avions...

8 ans de projet (2014-2022)

6 à 7 ans entre le début de la construction et la mise en service

65 à 70 euros par MWh d'objectif de coût de production complet

6 partenaires principaux
EDF, Framatome, Dassault Systèmes, Bouygues, Eiffage et Vinci en consortium

DES COULOIRS ÉLARGIS

Les couloirs seront élargis pour favoriser les déplacements de matériels préassemblés. Certaines structures de génie civil, comme l'alignement des murs des bâtiments, sont simplifiées.

UN RÉCUPÉRATEUR DE CŒUR FONDU

Construit dans l'enceinte de confinement, un récupérateur de cœur fondu (corium) est destiné à recueillir, figer et refroidir le corium grâce à de l'eau froide provenant d'un réseau de stockage interne.

DES TUYAUX PLASTIQUES TRÈS RÉSISTANTS

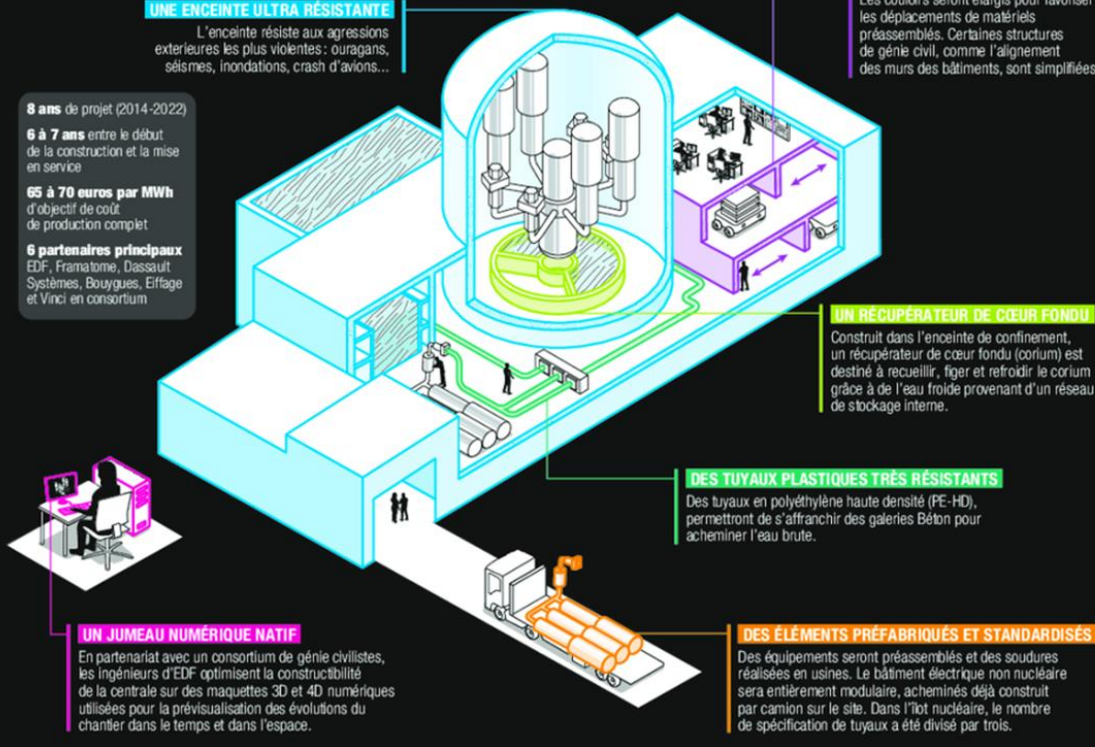
Des tuyaux en polyéthylène haute densité (PE-HD), permettront de s'affranchir des galeries Béton pour acheminer l'eau brute.

DES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS ET STANDARDISÉS

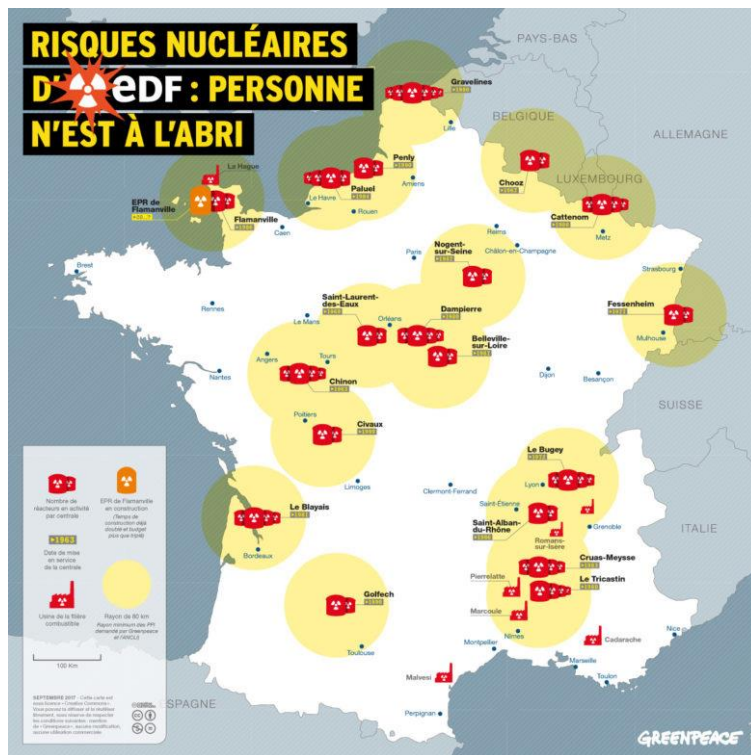
Des équipements seront préassemblés et des soudures réalisées en usines. Le bâtiment électrique non nucléaire sera entièrement modulaire, acheminé déjà construit par camion sur le site. Dans l'îlot nucléaire, le nombre de spécification de tuyaux a été divisé par trois.

UN Jumeau NUMÉRIQUE NATIF

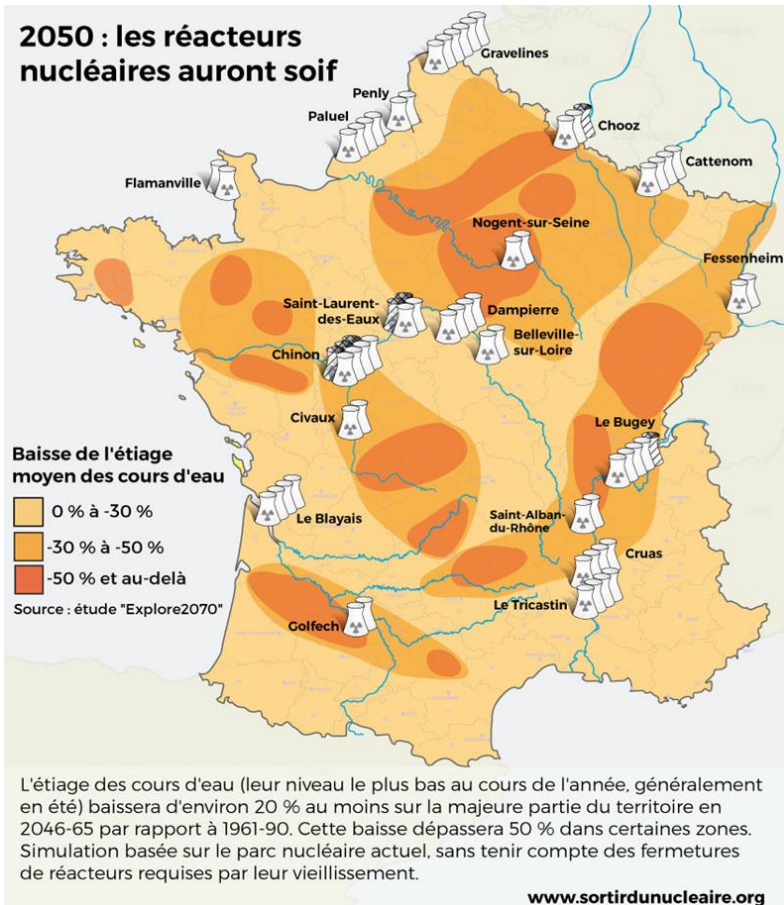
En partenariat avec un consortium de génie civilistes, les ingénieurs d'EDF optimisent la constructibilité de la centrale sur des maquettes 3D et 4D numériques utilisées pour la prévisualisation des évolutions du chantier dans le temps et dans l'espace.



Sans qu'on sache vraiment où les mettre !

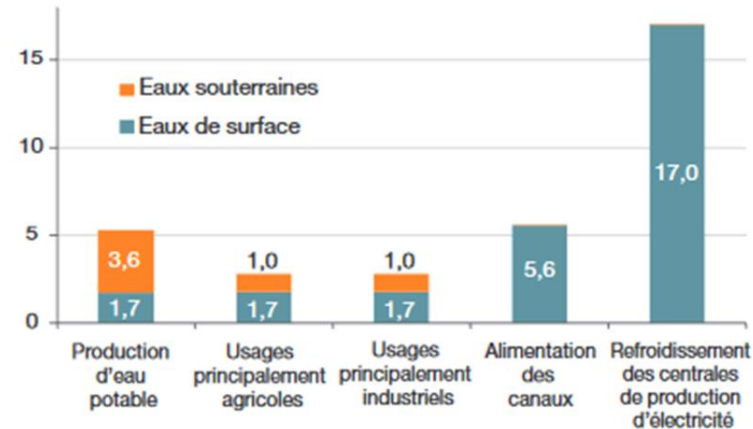


2050 : les réacteurs nucléaires auront soif



L'étiage des cours d'eau (leur niveau le plus bas au cours de l'année, généralement en été) baissera d'environ 20 % au moins sur la majeure partie du territoire en 2046-65 par rapport à 1961-90. Cette baisse dépassera 50 % dans certaines zones. Simulation basée sur le parc nucléaire actuel, sans tenir compte des fermetures de réacteurs requises par leur vieillissement.

En milliards de m³

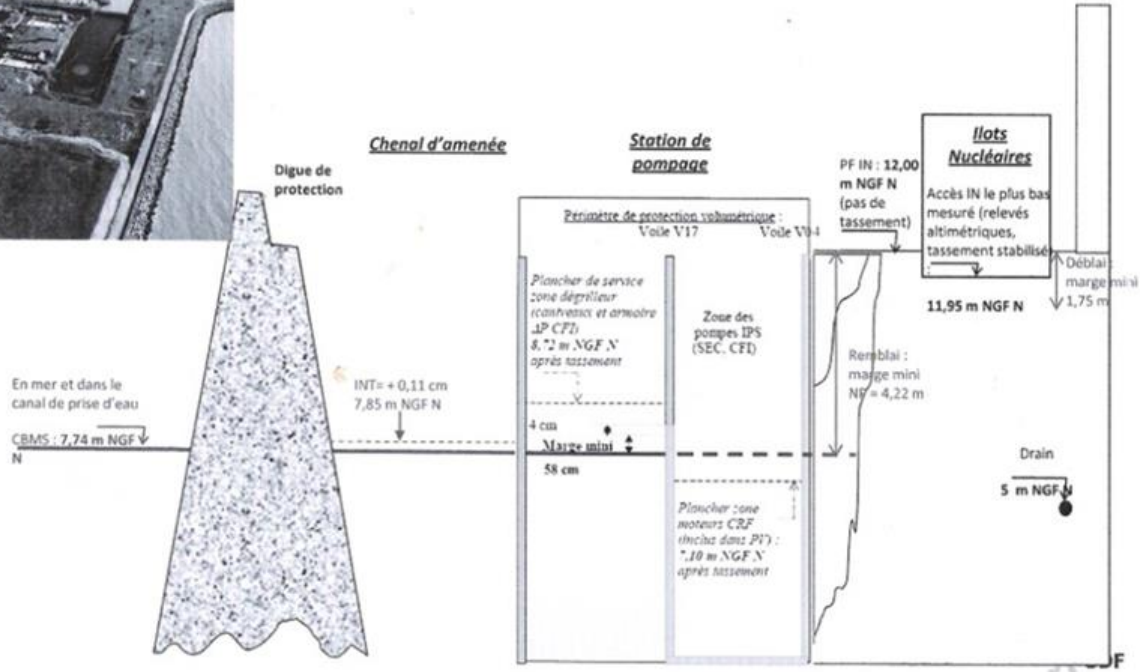


Source : Onema, Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE).
Traitements : SOeS, 2016





Site de PENLY



SITE DE GRAVELINES

Côtes exprimées en NGF-N

Définition de la CBMS :

- ◊ CMS à 6,12 m

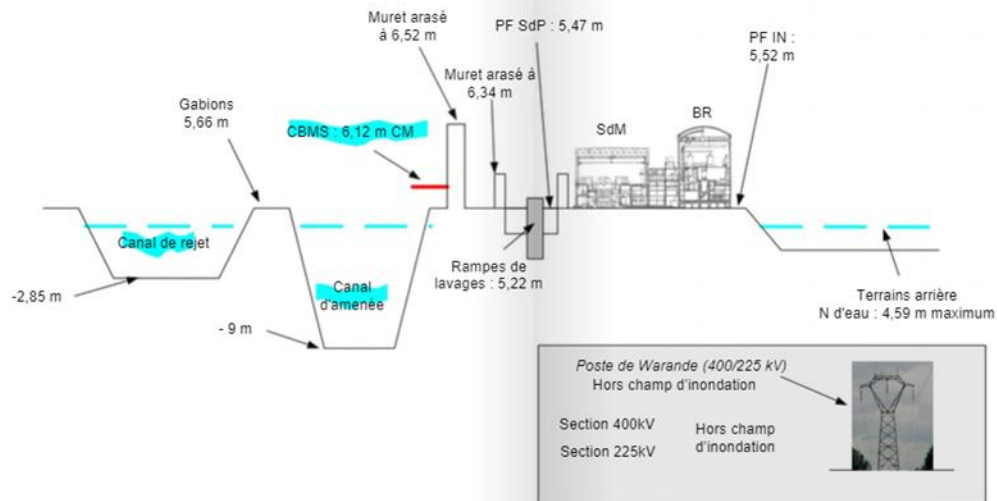


Figure 3.2 : Schématisation des zones délimitées au niveau des canaux

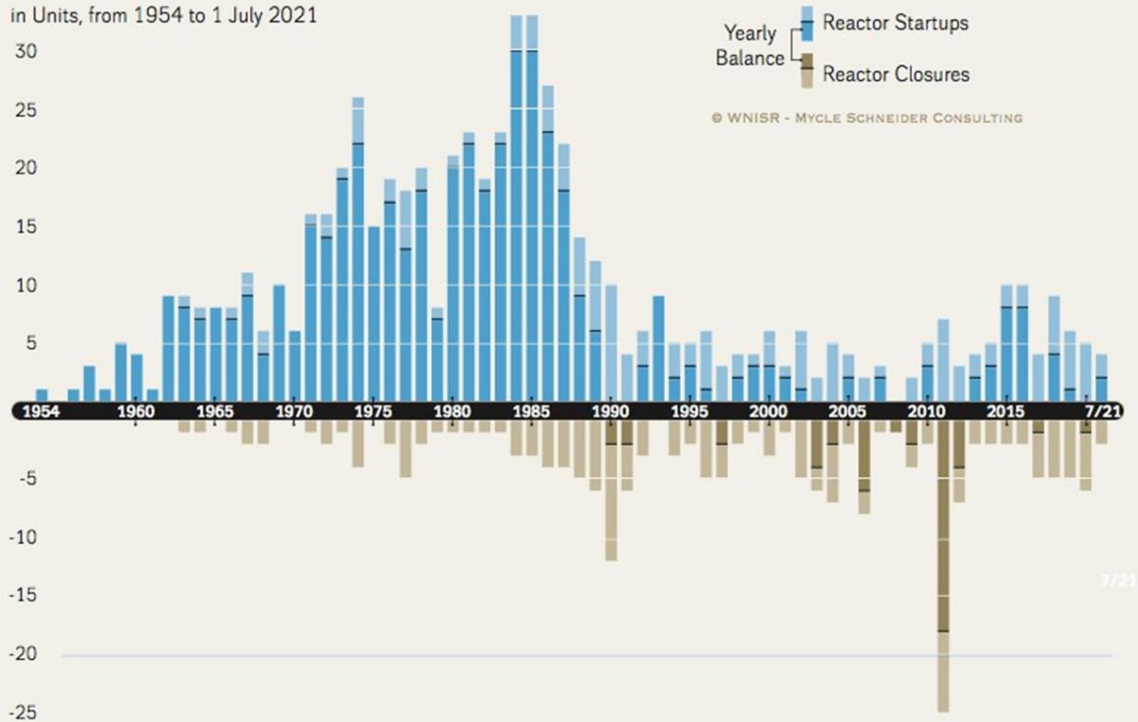
Dès lors on doit admettre que l'ère du nucléaire touche à sa fin



Figure 4 · Nuclear Power Reactor Grid Connections and Closures in the World

Reactor Startups and Closures in the World

in Units, from 1954 to 1 July 2021



Sources: WNISR, with IAEA-PRIS, 2021



Le coût de la filière nucléaire française

Investissements
depuis 1945

170 milliards*

Charges
futures incertaines

79,4 milliards?
dont

96 milliards
Construction
des 58 réacteurs

55 milliards
Recherche

19 milliards
Filière
de retraitement

18,4 milliards
Démantèlement (EDF)

28,4 milliards
Gestion des déchets
à long terme

Autres
4,2 milliards

14,8 milliards
Gestion du combustible usé

* + construction de Superphénix (12 milliards)
et des réacteurs de première génération (6 milliards).

Dépenses annuelles de maintenance
sur les 58 réacteurs
en euros

584 millions

763 millions

1,1 milliard

1,5 milliard

Accident
de Fukushima

3,7 milliards par an
jusqu'en 2025
(soit une dépense
totale de **55 milliards**)

2003

2005

2007

2009

2011 - 2025

Source : Cour des comptes



120 milliards d'euros en cas d'accident nucléaire grave ⁽¹⁾

Répartition du coût en milliards d'euros



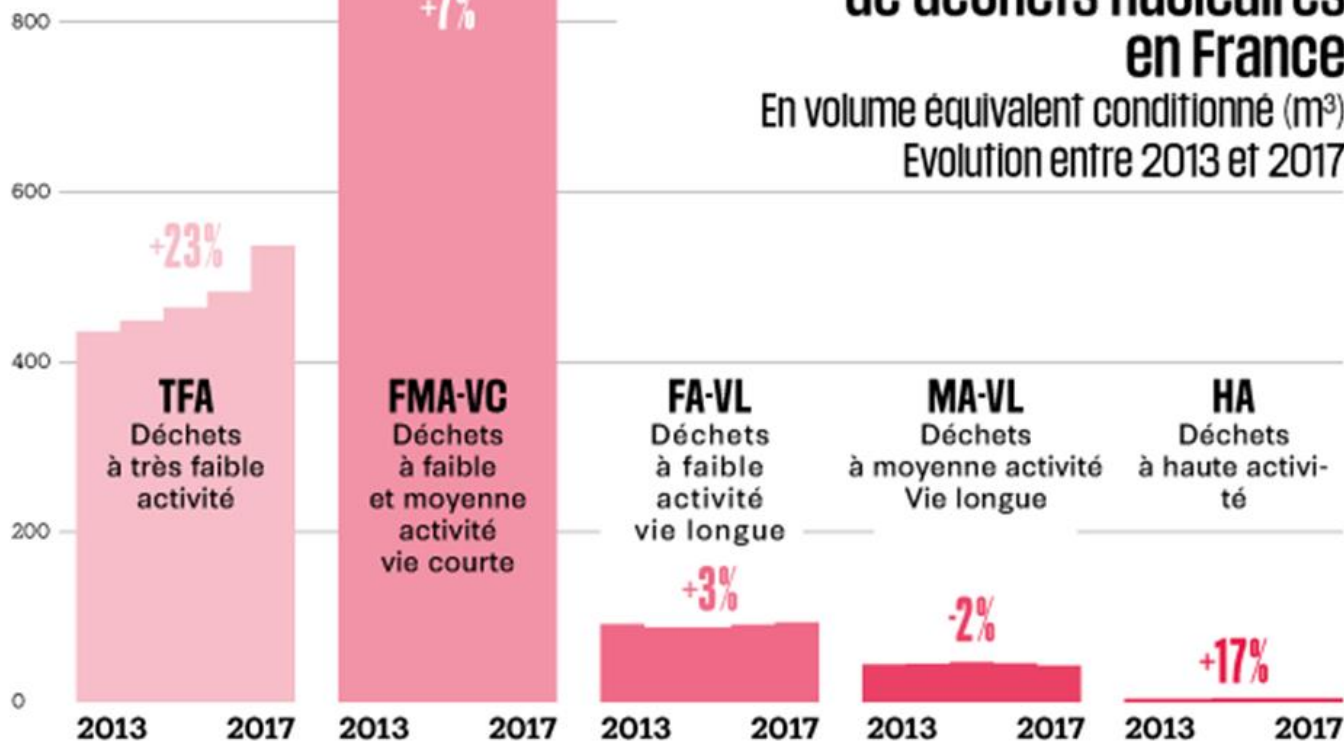
(1) Fusion du cœur d'un réacteur de 900 MWe, avec rejets contrôlés pour l'accident grave et rejets massifs pour l'accident majeur.
(2) Décontamination, démantèlement, électricité non produite. (3) Coût de santé, pertes agricoles.

Hervé Bouilly/IRSN - Source : IRSN



Evolution des stocks de déchets nucléaires en France

En volume équivalent conditionné (m³)
Evolution entre 2013 et 2017



Source : Andra

