

LE MODÈLE DE RÉACTEUR EPR-2

1. LIMINAIRE

L'EPR- est un modèle de réacteur nucléaire de 3^{ème} génération, de conception française, destiné à tirer partie du Retour d'Expérience (REX) acquis lors des phases de conception, de construction et d'exploitation du modèle de réacteur EPR. L'EPR fait l'objet de la fiche argumentaire n° 13, qui analyse la genèse et la concrétisation de ce projet. L'EPR-2 est destiné au remplacement de tout ou partie des réacteurs de 2^{ème} génération actuellement en exploitation en France, et dont la fin d'exploitation devrait intervenir dans les années 2030 à 2060, suivant les prolongations d'exploitation accordées par l'ASN ou des considérations économiques de l'exploitant (coûts de maintenance).

2. LE REX DE L'EPR

Le projet EPR avait été lancé dans les années 1990 dans un contexte où la relance des programmes nucléaires dans les pays possédant déjà un parc nucléaire conséquent, comme la France, apparaissait éventuellement comme une nécessité à moyen-long terme, mais sans urgence particulière. Les accidents de Tchernobyl en 1986, puis de Fukushima en 2011 ont fait basculer les opinions publiques et les gouvernements des états déjà nucléarisés dans une opposition plus ou moins forte à la production d'électricité d'origine nucléaire. Pour la France, cela a provoqué une absence durable de soutien politique qui a fortement pénalisé ce projet.

Aussi, quand les projets d'EPR à Olkiluoto en Finlande et à Flamanville sont rentrés dans une phase active de construction, respectivement en 2003 et 2007, la filière industrielle française avait été déjà fortement fragilisée. Ceci a conduit à des retards et des surcoûts dont l'ampleur et les causes sont analysées dans la [fiche argumentaire N° 13](#).

Le REX acquis après plusieurs années d'exploitation des 2 EPR de Taishan en Chine (mis en service en 2018 et 2019 respectivement) a également permis d'identifier des points à améliorer, concernant la conception : vibrations de la ligne expansion du pressuriseur, usure prématurée de certains crayons combustibles par exemple.

3. LE CONCEPT DE L'EPR-2

3.1. LA GENÈSE DU PROJET

Dès la fin des années 2000, EDF et Areva ont pris conscience des difficultés majeures rencontrées sur les chantiers EPR de Flamanville (FA3) et d'Olkiluoto (OL3). Ceci a contribué au lancement en 2011 du projet EPR-NM (Nouveau Modèle) visant à optimiser l'EPR, essentiellement pour des aspects de conception et d'organisation industrielle. Celui-ci conserve les caractéristiques principales de l'EPR, mais dans une version à la réalisation industrielle optimisée et supposée moins coûteuse. L'ASN a considéré en 2017 que les modifications proposées dans le dossier d'options de sûreté (DOS) du réacteur EPR-NM par rapport à celui de FA3 étaient de nature à réduire les marges de sûreté. Dès lors il apparaissait indispensable à EDF d'adapter son projet de nouvel EPR.

Dans la même période, le rapport Folz d'octobre 2019 [Réf.1] avait identifié les causes ayant abouti à ce qu'il qualifie de « *fiasco industriel* » pour la construction de FA3. Sans remettre en cause les choix fondamentaux de conception, notamment l'augmentation notable du niveau de sûreté par l'adoption des recommandations internationales concernant la conception des réacteurs dits de « Génération 3 », il pointe les raisons qui, selon lui, ont conduit à cette situation :

- Une sous-estimation initiale des coûts et des délais, notamment compte tenu du REX des derniers réacteurs construits en France (Civaux 2 mis en service en 1999)

- L'inadaptation du management du projet à l'ampleur de la tâche : ainsi pour l'EPR de Flamanville, EDF a voulu assumer simultanément les rôles de maître d'ouvrage et de maître d'œuvre
- Le lancement des opérations de fabrication et de construction alors que les études de détail étaient à peine entamées ce qui a eu pour effet le remplacement de nombreuses pièces et des réparations coûteuses sur site
- Le partage des tâches entre les intervenants et surtout la gestion de la sous-traitance, a conduit à une structure complexe générant des interfaces nombreuses inefficaces et coûteuses
- L'évolution de la réglementation sur les appareils à pression avec l'arrêté ESPN de 2005 alors que les fabrications étaient en cours et que les fournisseurs devaient faire face à des exigences en évolution
- La perte généralisée de compétences sur la gestion de grands projets et la fabrication de matériels nucléaires

La prise en compte de cette analyse a conduit EDF à définir le projet EPR-2 qui comporte quelques modifications techniques par rapport à l'EPR de Flamanville (pris comme référence), tels que par exemple l'enceinte de confinement du bâtiment réacteur qui redevient à simple paroi béton revêtue d'une peau en acier inoxydable, en lieu et place d'une enceinte double, les circuits de sauvegarde qui comportent trois trains, l'abandon du concept de double salle de commande qui écarte définitivement la maintenance du circuit primaire en fonctionnement. Toutefois l'évolution la plus notable concerne en la mise en place d'une organisation industrielle plus efficace, décrite dans le paragraphe suivant.

3.2. L'ORGANISATION DU PROJET EPR-2

La prise en compte du REX industriel de l'exploitation des EPR déjà en service en Chine mais surtout de ceux en construction en Europe (FA3, OL3 et plus récemment Hinkley Point C en Grande Bretagne), ont conduit EDF à profondément modifier l'organisation industrielle mise en place, notamment sur les points suivants :

- Un schéma industriel clarifié qui définit EDF comme le maître d'ouvrage et l'exploitant, et les fabricants comme les responsables de la conception et de la réalisation des équipements
- Un processus de sélection, d'organisation et de contrôle de la sous-traitance ainsi que des équipementiers
- La mise en place du programme Excell destiné à retrouver le niveau de rigueur, de qualité et d'excellence, avec notamment un volet « gestion des compétences » ambitieux
- Le concept du « bon du premier coup » exigeant de ne lancer les fabrications que lorsque la validation et la qualification des processus technologiques sont acquises
- La simplification des procédures d'approvisionnement et des processus d'intégration des équipements en privilégiant la fabrication en usine d'éléments pré-assemblés
- Le renforcement des procédures de contrôle et de surveillance en fabrication permettant de mieux maîtriser les risques de fraudes ou d'irrégularités

En pratique, EDF et Framatome (ex Areva NP) ont fondé en mai 2017 la société d'ingénierie Edvance chargée de la conception et de la réalisation de l'îlot nucléaire (chaudière nucléaire incluse) et du contrôle-commande. Les objectifs visés par cette co-entreprise, sont une meilleure coopération, une meilleure cohérence et une meilleure intégration des nombreuses équipes chargées de la réalisation des différents composants de l'îlot nucléaire.

3.3. LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU RÉACTEUR EPR-2

Elles sont similaires à celles de l'EPR, et partagent le même cœur de réacteur et la même instrumentation. Concernant les principales options de conception, les choix d'EDF sont les suivants :

- La conception de l'EPR de Flamanville reste la référence
- Les événements majeurs concernant les procédés de fabrication, qui ont perturbé les fabrications de FA3, tels que le génie civil, les ségrégations carbone dans les gros équipements forgés, les difficultés de soudage et les écarts au référentiel d'exclusion de rupture concernant le CPP et le CSP, ont été pris en compte et ont conduit à des évolutions de conception
- La géométrie de certaines zones a été adaptée pour faciliter ou rendre possible les contrôles non destructifs en fabrication, puis en service
- L'amélioration des marges mécaniques en modifiant la géométrie et les procédés de fabrication.

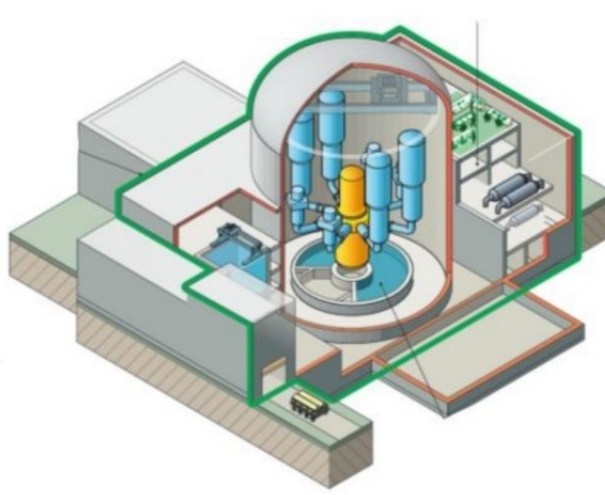
L'accent est porté sur une amélioration de la constructibilité, ainsi qu'une rationalisation et une réduction des catalogues de pièces (valves, pompes, câbles, tuyaux...). Du point de vue du génie civil, certains locaux sont agrandis afin de faciliter leur aménagement à la construction ainsi que leur exploitation.

Un recours accru est fait à la préfabrication de composants, voire de bâtiments complets de l'îlot conventionnel (partie non nucléaire du réacteur), comme les bâtiments électriques. Le moindre compartimentage du bâtiment

réacteur et la simple enceinte au lieu de la double enceinte de l'EPR permettent aussi une simplification du génie civil.

Les tableaux 1 et 2 ci-après résument les caractéristiques essentielles du réacteur EPR-2 et ses évolutions par rapport à l'EPR.

Caractéristiques principales de l'EPR-2	
Durée de fonctionnement de conception	60 ans
Puissance thermique	4590 MWth
Puissance électrique brute	1750 MWe
Puissance électrique finale nette	1670 MWe
Rendement	36,3 %
Taux de disponibilité les 20 premières années	> 90 %
Combustible	241 assemblages
	Uranium enrichi à 5 % Combustible MOX en proportions variable, jusqu'à 30 %
Gestion fusion du cœur (corium)	Récupérateur externe, refroidissement actif
Durée du cycle	18 mois (renouvellement par tiers du combustible)



Vue en éclatée de l'EPR-2 : document EDF-Edvance

◀ **Tableau 1 : Caractéristiques principales de l'EPR-2**

Le principe d'exclusion de rupture pour la conception des tuyauteries primaires principales et des lignes de vapeurs du circuit secondaire, déjà appliqué pour FA3 mais qui avait été la source de nombreuses difficultés de fabrication, a été reprise, mais avec des garanties renforcées. Ce principe consiste à ne pas étudier intégralement les conséquences d'une rupture de ces équipements, car jugée extrêmement improbable. Cela permet de simplifier la conception, d'améliorer l'accessibilité de ces équipements pour leur maintenance et leur inspection en service, et donc de la diminution de la dosimétrie reçue lors de ces interventions. Le tracé de lignes auxiliaires est aussi plus simple, ce qui diminue les contraintes mécaniques et *in fine* améliore la sécurité.

En contrepartie, ce principe ne peut être appliqué que pour des circuits se trouvant dans l'enceinte de confinement du réacteur. Sa mise en œuvre implique des normes particulièrement exigeantes de conception, de fabrication, de soudure et de suivi en service de ces tuyauteries. Enfin, EDF renforce les mesures de protection si une telle rupture devait malgré tout se produire : étude de la résistance de l'enceinte de confinement à l'élévation de pression et de température induite, réalisation de séparations en béton entre certaines tuyauteries, dispositifs anti-fouettement et événements d'évacuation de la vapeur.

	EPR	EPR-2
	Récupérateur de corium	Conservé, avec modifications
	Maintenance possible du réacteur en fonctionnement	Abandonné
Îlot nucléaire	Soupape du pressuriseur de modèle identique à celui des réacteurs allemands KWU	Soupape du pressuriseur commune au reste du parc français
	Quatre trains de sauvegarde : chaque circuit permet à lui seul, par injection d'eau dans le circuit primaire, de refroidir le cœur en cas de panne sur les autres moyens habituels	Trois trains de sauvegarde (du fait de l'abandon de la maintenance en fonctionnement)
	Enceinte du bâtiment réacteur à double parois de 1,3 m chacune, avec <i>liner</i> métallique sur la paroi interne	Enceinte du bâtiment réacteur à simple paroi épaisse en béton précontraint, avec <i>liner</i> métallique
	Bâtiment des auxiliaires nucléaires (BAN)	Abandonné, fonctions transférées dans d'autres bâtiments
	Bâtiment électrique non modulaire	Bâtiment électrique modulaire

Îlot conventionnel (partie non nucléaire)	Pompage de la source d'eau froide non diversifiée	Pompage de la source d'eau froide diversifiée
--	---	---

Tableau 2 : Principales évolutions de l'EPR-2 par rapport à l'EPR

Pour les futurs EPR- 2 situés en bord de mer, la solution retenue pour la station de pompage de l'eau de mer, qui constitue la source froide du réacteur, répond aux mêmes exigences de sûreté que l'EPR, mais repose sur trois bâtiments « non bunkerisés » (alors que cette fonction correspond à un bâtiment unique – bunkerisé – pour l'EPR), séparés entre eux et répartis sur deux emplacements distincts. Deux stations de pompes assurent l'alimentation en eau de mer du circuit de refroidissement et des systèmes de sûreté (refroidissement par l'eau). Un bâtiment doté d'aéroréfrigérants permet le refroidissement des circuits et l'appoint d'eau en cas d'accident (refroidissement par l'air). Cette organisation permet un refroidissement diversifié par l'eau en fonctionnement normal, et par l'air ou l'eau en situation accidentelle. La suppression de la « bunkérisation » facilite également la construction.

Il s'agit du premier réacteur à intégrer dès sa conception les leçons de l'accident de Fukushima. Ainsi, le site est conçu pour être plus résistant à une agression extérieure, et ses systèmes de secours sont dotés d'une autonomie de 100 heures en cas de perte d'alimentation externe.

3.4. LA CONCRÉTISATION DU PROJET EPR-2

En juillet 2019, le DOS (Dossier d'Options de Sûreté) révisé du projet EPR-2, a été jugé recevable par l'ASN sous la réserve de quelques points qui doivent être approfondis dans le Rapport de Sûreté, notamment l'application du concept d'exclusion de rupture à certains équipements.

En février 2022, lors de son discours à Belfort, le Président de la République définit une politique ambitieuse destinée à redynamiser la filière industrielle nucléaire. Pour cela il préconise la construction d'un ensemble de 3 paires de réacteurs EPR-2 à implanter sur 3 sites existants. Ces sites ont été choisis par EDF en 2022-2023 : il s'agit de Penly, Gravelines et Bugey. La demande de DAC (Décret d'Autorisation de Création) pour le site de Penly sur lequel la première paire d'EPR-2 devrait être implantée a été déposée en 2023.

Parallèlement, la CNDP (Commission Nationale du Débat Public) a organisé entre octobre 2022 et février 2023 un débat public sur le thème du programme des 6 réacteurs EPR-2 et spécifiquement l'implantation de 2 réacteurs à Penly [Réf. 2]. Du point de vue législatif, les fortes contraintes sur le développement du parc nucléaire qui avaient été introduites en 2015 dans la première PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie) : limitation de la puissance installée à 63 GWe, limitation voire réduction du nombre de réacteurs, limitation à 50 % de la part du nucléaire dans le mix énergétique), ont progressivement été éliminées en 2023-2024, ce qui ouvre la voie à un programme de construction d'ampleur pour de nouveaux réacteurs, tout en visant l'augmentation de la durée de fonctionnement pour les réacteurs en exploitation.

Enfin, la loi « accélération du nucléaire » votée en juillet 2023 permet l'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants, ce qui est le cas pour les futurs réacteurs EPR-2.

Les premiers gros marchés industriels pour les 6 premiers EPR-2, tels que la préparation des sites, le génie civil et la forge des ébauches pour les gros équipements du CPP (cuve, GV, pressuriseur) ont été lancés par EDF. Le délai de construction entre deux tranches d'une même paire serait de 18 mois, et de trois à quatre ans entre les trois premières paires. À ce jour le planning affiché prévoit une mise en service des 6 réacteurs étalée entre 2038 et 2043. En janvier 2024, le gouvernement a décidé de lancer les études pour la construction de 8 réacteurs EPR-2 supplémentaires.

Afin de répondre aux appels d'offres portant sur des réacteurs de moyenne puissance, notamment celui publié en mars 2022 par l'électricien tchèque CEZ, EDF développe un réacteur dénommé EPR1200. La conception de ce réacteur est en grande partie fondée sur celle de l'EPR-2, les principales différences portant sur le niveau de puissance (1200 MWe au lieu de 1650 MWe), et le nombre de générateurs de vapeur (trois au lieu de quatre).

4. ASPECTS ÉCONOMIQUES DE L'EPR-2

Le coût total de réalisation des six EPR-2, estimé par le gouvernement [Réf. 3], incluant la construction, le financement, la maintenance, la gestion des déchets, le démantèlement, et une provision pour différents aléas, a été estimé en 2021 à 51,7 milliards €. Toutefois, EDF a réévalué en février 2024 ce coût à 67,4 Md€, soit une augmentation de 30 %, essentiellement du fait de la progression des coûts d'ingénierie d'une part (la décision a été prise de prolonger les études de conception pour garantir la constructibilité des réacteurs « du premier coup »), et à la hausse des coûts de construction, qui résulte des premiers appels d'offres lancés par EDF pour anticiper la fabrication de certaines pièces critiques ou sécuriser des contrats clés.

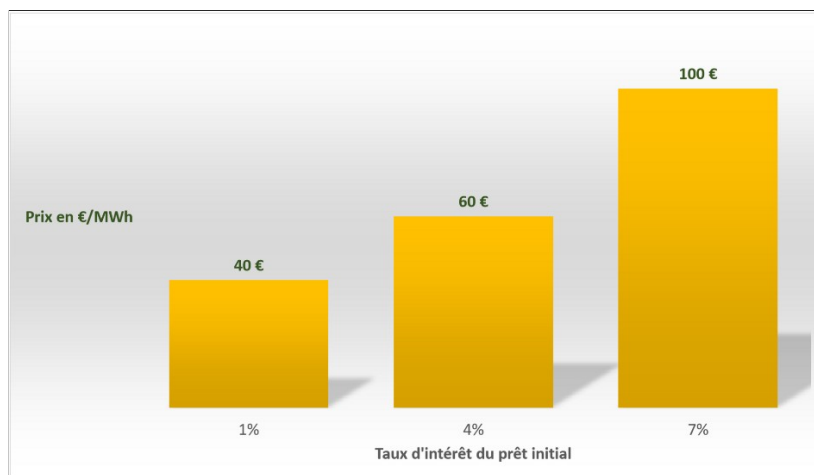
Plusieurs réacteurs sont construits en série, pour bénéficier de l'effet de série, et par paire, afin de bénéficier d'économie d'échelle par la mutualisation des moyens sur un même site (permettant un gain de l'ordre de - 15 % pour la deuxième tranche).

La construction par paire permet aussi une optimisation des délais de construction : un retard ou une anomalie de conception d'un composant du premier réacteur peuvent être compensés par l'utilisation du composant initialement prévu pour le deuxième. *A contrario*, la deuxième tranche bénéficie du retour d'expérience de la première, permettant une optimisation de la construction.

Concernant le coût de production du mégawattheure, le principal déterminant est le coût du capital nécessaire à la construction du réacteur. L'électricité d'origine nucléaire voit son prix de production essentiellement lié au coût de fabrication du réacteur, les coûts fixes (combustible, personnel, loyers, consommable...) comptant pour une part mineure du coût total de production. Le capital initial nécessaire à la construction d'un réacteur s'élevant à plusieurs milliards d'euros engagés sur plusieurs années, le constructeur et exploitant (ici EDF) ne peut uniquement s'autofinancer sur ses capitaux propres ou ses recettes ; il se voit tenu de se financer par un mécanisme de prêt.

La Cour des comptes a estimé en 2022 l'impact du taux d'intérêt du capital emprunté sur le prix de production final de l'électricité [Réf. 3].

Le graphique ci-contre donne l'évolution du taux d'intérêt et le prix de production.



Graphique 3 : Relation entre taux d'intérêt et prix de production

Il apparaît alors primordial pour la compétitivité de l'EPR-2 d'être financé à un taux d'intérêt le plus bas possible. En ce sens, l'inclusion de l'énergie nucléaire à la taxonomie verte européenne en juillet 2022, et le rachat à 100 % d'EDF par l'État français en septembre 2022, apparaissent comme des facteurs favorisant l'obtention d'un financement à faible taux d'intérêt.

Enfin, la mise en place à la fin 2023 de nouveaux mécanismes de rétribution de l'électricité produite par EDF avec son parc nucléaire, avec notamment la disparition du mécanisme de l'ARENH, permet à EDF d'envisager à court terme une amélioration de sa capacité d'autofinancement.

5. RÉFÉRENCES

[Réf. 1] : https://minefi.hosting.augure.com/Augure_Minefi/r/ContenuEnLigne/Download?id=104AF2DA-FA4D-4BED-B666-4D582E2C7A8A&filename=1505%20-Rapport%20Flamanville%20pdf.pdf

[Réf. 2] : <https://www.debatpublic.fr/programme-nouveaux-reacteurs-nucleaires-et-projet-de-deux-reacteurs-epr2-penly-2981>

[Réf. 3] : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2022.02.18_Rapport_nucleaire.pdf

- Documents accessibles sur le site d'EDF-Edvance : <https://www.edvance.fr/>
- Documents accessibles sur le site de l'ASN : <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites>
- Avis et rapports de l'IRSN sur l'EPR2 : <https://www.irsn.fr/avis-et-rapports-epr-2>
- Le nouveau nucléaire, annales des Mines n°113 : https://www.annales.org/re/2024/re_113_janvier_2024.html

