



GOUVERNEMENT

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

# Travaux relatifs au nouveau nucléaire

## PPE 2019-2028

Octobre 2021



# 1. Coûts, risques, opportunités et calendriers d'un nouveau modèle de réacteur : l'EPR2

## Synthèse

L'EPR2 est un nouveau modèle de réacteurs développé par EDF à partir de l'EPR, dans la perspective d'en sécuriser les opérations de construction et de maintenance. Sa conception a atteint le stade de basic design, c'est-à-dire une description haut niveau des principales composantes du réacteur. A ce stade, les études doivent se poursuivre pour détailler l'architecture du réacteur, compléter les spécifications industrielles et établir un plan de réalisation, ce qui va nécessiter une montée en puissance de l'ingénierie d'EDF dans les 5 prochaines années.

Certains choix de conception structurants restent à confirmer auprès des autorités de sûreté et de sécurité nucléaires, pour lesquels une décision défavorable entraînerait soit la remise en cause du projet soit d'importants surcoûts et décalages de calendriers. Le concept EPR2 pourra ainsi être complètement confirmé à l'horizon 2025/2027 et sa déclinaison opérationnelle à un niveau de maturité suffisant est attendue à l'horizon 2027/2029.

Sur la base des premières spécifications de l'EPR2 et de son expérience sur le parc en exploitation et sur les chantiers EPR dans le monde, EDF a réalisé un chiffrage et un premier calendrier pour la construction de 3 paires d'EPR2 en France, qui ne représentent toutefois pas un engagement ferme de prix et que l'Etat a audités en 2019 et en 2021. L'analyse des éléments disponibles et des processus d'ingénierie à l'œuvre a révélé que :

- les méthodes de chiffrage d'EDF sont jugées adaptées et usuelles par les cabinets externes ayant conduit les audits. Elles portent sur un niveau de décomposition relativement bien détaillé compte tenu du stade d'avancement du projet. Pour l'estimation des quantitatifs du projet, EDF mobilise un panel large de son expertise interne sur le nucléaire, sous le pilotage d'une équipe projet dédiée depuis plusieurs années ;
- toutefois plusieurs zones d'ombres dans le chiffrage demeurent, notamment une progression de 13% du devis de référence entre début 2020 et mi-2021 qui n'avait pas été anticipée et qui pourrait refléter un biais dans la méthodologie de chiffrage, qui n'ont pu être clarifiés à ce stade. L'accès limité au retour d'expérience des chantiers d'Hinkley Point et de Taishan et à certains sous-jacents de deux des principaux lots en cours de contractualisation - le génie civil et l'îlot nucléaire - limitent également les possibilités d'effectuer un contrôle approfondi des montants envisagés ;
- compte tenu de la maturité du projet, une part encore importante des estimations sur les risques, les calendriers et les effets d'apprentissage restent discrétionnaires, c'est-à-dire fixées par décision managériale dans une logique de vision globale des niveaux de provisions à fixer pour un projet de cet ampleur, bien qu'elles soient structurantes dans les perspectives de coûts et d'effets d'échelle affichées.

A ce stade, le chiffrage du programme ne peut donc pas être considéré comme définitif et reste soumis à la levée de plusieurs incertitudes dont certaines pourraient avoir des effets importants. D'ici fin 2022, EDF devrait avoir franchi une étape importante dans le chiffrage avec la stabilisation de la structure contractuelle des principaux lots d'ingénierie et de fabrication de l'EPR2. Les chantiers EPR de Flamanville et d'Hinkley Point devraient également apporter davantage de retour d'expérience sur les risques encore inhérents à la construction. Entre 2023 et 2025, les principales incertitudes résiduelles sur le concept et l'architecture de l'EPR2 devraient également être levées.

La robustesse des coûts affichés pour les paires 2 et 3 sera également très dépendante du déroulé de la construction de la première, qui devra permettre de confirmer la levée des risques liés à la maîtrise des fabrications, telle que prévue aujourd'hui dans les estimations d'EDF. A ce titre, les pouvoirs publics approfondiront d'ici fin 2022 les enjeux

d'optimisation du calendrier de réalisation de tranches successives et de choix des sites d'implantation. Un troisième audit sera réalisé fin 2022 sur la base des nouveaux éléments disponibles.

L'analyse conduit également à recommander d'augmenter les délais prévus dans les calendriers de mise en service envisagés par EDF et à prévoir d'évaluer les conséquences de certains risques exclus du chiffrage présenté par EDF (conséquences de recours juridiques, détection tardive d'écarts de conformité, mise aux conditions économiques du moment, etc.) ainsi que les coûts d'emprunt à immobiliser au fil des dépenses avant la mise en service, et enfin à considérer des hypothèses plus pessimistes pour le facteur de charge en fonctionnement. Les fourchettes de coûts et délais qu'il est proposé de retenir restent ainsi larges, traduisant les incertitudes précédemment exposées qui restent à lever :

		Conception	Paire #1	Paire #2	Paire #3
Coût de construction (hors coûts financiers)	Bonne maîtrise industrielle	3,7 à 4,1 Md€ <sub>20</sub>	17 à 18,5 Md€ <sub>20</sub>	15,8 à 17,4 Md€ <sub>20</sub>	15,3 à 17 Md€ <sub>20</sub>
	Scénario plus dégradé	4,6 Md€ <sub>20</sub>	21 Md€ <sub>20</sub>	19,5 Md€ <sub>20</sub>	19 Md€ <sub>20</sub>
Perspectives de couplage au réseau des réacteurs	Relative maîtrise industrielle		Tranche 1 : 39/40	Tranche 1 : 43/44	Tranche 1 : 47/48
			Tranche 2 : 40/41	Tranche 2 : 44/45	Tranche 2 : 48/49
	Scénario plus dégradé		Tranche 1 : 42/43	Tranche 1 : 46/47	Tranche 1 : 49/50
			Tranche 2 : 43/44	Tranche 2 : 47/48	Tranche 2 : 50/51

Ces estimations conduisent à un coût d'un programme de 3 paires d'EPR2 compris entre 52 Md€ et 57 Md€ dans un scénario de bonne maîtrise industrielle à 64 Md€ dans un scénario plus dégradé.

Enfin, les audits ont également montré que le coût de revient de l'électricité produite dépendait fortement des conditions de financement et du facteur de charge, conclusions qui doivent être prises en compte dans les travaux relatifs au financement du projet :

**[Afficher quelques coûts de revient avec les sensibilités]**

Sans préjuger du choix qui sera fait par le Gouvernement, pour la construction de réacteurs nucléaires en France à l'horizon 2040, EDF propose de développer un nouveau modèle, l'EPR2, élaboré pour prendre en compte le retour d'expérience des chantiers d'EPR à Flamanville, Olkiluoto, Taishan et Hinkley Point. Cette démarche procède d'une volonté de simplifier la conception de l'EPR, dans le but d'en réduire les difficultés et les risques de construction. Par opposition à une stratégie qui aurait consisté à engager la construction de réacteurs EPR de série en France sur la base de la tête de série de Flamanville 3, EDF privilégie donc le déploiement d'efforts d'ingénierie de conception pour en sécuriser à terme la production en série.

Cette approche comporte des risques et des opportunités, en termes de coûts et de calendriers, que les pouvoirs publics ont souhaité apprécier par la réalisation en 2019 et en 2021 de deux audits successifs portant sur les études d'EDF. Ces audits ont permis de retracer les principales évolutions de conception envisagées par EDF pour l'EPR2 et d'en apprécier le niveau de maturité et le reste à faire avant de disposer d'un modèle de réacteur suffisamment détaillé pour engager des constructions (partie A). Ces audits ont également porté sur les coûts et les calendriers envisageables pour la finalisation du produit EPR2, sa construction et son exploitation (partie B).

Dans un contexte où les chantiers d'EPR ont tous connu des difficultés à tenir les coûts et les calendriers initialement prévus, l'analyse de risques a fait l'objet d'une attention particulière. Le présent chapitre repositionne enfin la compétitivité attendue du réacteur EPR2 face aux autres

technologies de production d'électricité d'origine nucléaire et le coût de revient de l'électricité produite avec de tels réacteurs.

Ces estimations de coûts, risques et calendriers servent d'hypothèses aux travaux conduits par le Gouvernement sur les modalités de financement et de régulation de nouveaux réacteurs en France (chapitre 3) ainsi qu'aux travaux menés par RTE pour son étude « Futurs énergétiques 2050 ».

## A. Les choix de conception de l'EPR2

### 1. Des évolutions visant à simplifier la construction du réacteur tout en maîtrisant l'impact sur l'augmentation des quantitatifs associés

Si la conception de l'EPR2 est en grande partie fondée sur celle du réacteur EPR de Flamanville, elle présente plusieurs évolutions significatives qui ont une incidence structurante sur le *design* et les enjeux de sûreté. Selon EDF, ces évolutions visent à simplifier et dérisquer la construction de l'installation, en particulier concernant le génie civil ; elles sont également le résultat d'une démarche de standardisation et d'arbitrages économiques visant à en réduire les coûts de fabrication.

Le bâtiment réacteur de l'EPR est protégé d'une double enceinte de confinement, l'enceinte intérieure ayant vocation à tenir à la pression interne en cas d'accident et l'enceinte extérieure à protéger l'infrastructure contre des agressions externes telles que la chute d'avion. Pour l'EPR2, EDF a conçu une simple enceinte, renforcée par un revêtement interne métallique, qui doit assurer ces deux fonctions. Cette modification est une simplification majeure pour la réalisation du génie civil de l'ensemble. Avec le même objectif, EDF a supprimé pour l'EPR2 le bâtiment des auxiliaires nucléaires - les systèmes qu'il abrite pour l'EPR sont redistribués dans les autres bâtiments - et agrandi le bâtiment réacteur, le bâtiment des auxiliaires de sauvegarde et le bâtiment combustible.

Pour compenser le surcoût lié à l'augmentation des quantitatifs de génie civil associée, EDF procède également à des simplifications structurelles affectant les atouts de l'EPR pour la maintenance en marche. L'EPR2 n'offrirait plus la possibilité de réaliser des opérations de maintenance dans le bâtiment réacteur pendant son exploitation en puissance (*two-rooms concept* de l'EPR) et le quadruplement des systèmes de sauvegarde, qui permet sur l'EPR d'intervenir sur des opérations de maintenance les concernant sans arrêter le réacteur, serait abandonné pour un simple triplement.

En somme, les quantitatifs de génie civil pour l'EPR2 seraient en légère hausse par rapport à l'EPR, en contrepartie d'un risque moindre sur les opérations de génie civil en phase de construction. Certaines opérations de maintenance seraient également simplifiées, mais elles ne pourraient plus se faire qu'à l'arrêt du réacteur. Cela est susceptible d'allonger les durées d'arrêts de tranche et de réduire la disponibilité moyenne de l'EPR2 comparativement à l'EPR, tout en réduisant le risque d'indisponibilité prolongée.

Au-delà de ces évolutions, EDF a souhaité reconduire plusieurs autres caractéristiques structurantes de l'EPR. La puissance électrique nominale serait comprise entre 1650 MW et 1700 MW, similaire à celle des EPR déployés à Taishan. EDF propose par ailleurs de reconduire l'application de la démarche d'exclusion de rupture au circuit primaire principal et aux tuyauteries principales du circuit d'évacuation de la vapeur des circuits secondaires principaux, qui a été retenue pour l'EPR. Cette démarche consiste à ne pas intégrer dans la démonstration de sûreté nucléaire les conséquences de la rupture d'une tuyauterie parce que cette rupture est rendue extrêmement improbable avec un haut degré de confiance.

Enfin, l'EPR2 intégrerait également dès sa conception la possibilité de consommer des combustibles MOx, combustible contenant de l'uranium appauvri issu du processus d'enrichissement de l'uranium naturel et du plutonium extrait du processus de retraitement des assemblages usés par l'usine Orano de La Hague. Tout comme l'EPR, l'EPR2 serait ainsi compatible avec la poursuite au-delà de l'horizon 2040 de la stratégie de traitement-recyclage mise en œuvre actuellement en France.

### 2. Des choix de conception à confirmer et des incertitudes à lever pour garantir la constructibilité de l'EPR2

EDF a engagé à partir de 2010 les travaux de remise à plat de la conception de l'EPR afin d'y intégrer les principaux retours d'expérience du chantier en cours de l'EPR de Flamanville, aboutissant fin 2017 au *basic design* d'un réacteur appelé « EPR Nouveau Modèle ». Les échanges conduits en parallèle avec les autorités de sûreté ont conduit EDF à revoir certaines caractéristiques structurantes de ce réacteur

entre 2017-2019 conduisant à la configuration du réacteur EPR2. La conception de l'EPR2 atteint actuellement le stade de *basic design*<sup>1</sup> et plusieurs étapes de conception restent à franchir pour disposer d'un produit pouvant être déployé en France.

### Des choix de conception structurants à confirmer

En premier lieu, deux incertitudes de conception doivent encore être levées, qui sont susceptibles d'avoir une incidence importante sur l'architecture d'une centrale de réacteurs EPR2, ou tout du moins sur ses coûts et délais de réalisation : la définition du cadre d'application du principe d'exclusion de rupture aux tuyauteries principales du circuit d'évacuation de la vapeur des circuits secondaires principaux (CSP) et la démonstration de la capacité d'EDF à le mettre en œuvre ; la démonstration de la tenue de la simple enceinte du bâtiment réacteur à la chute d'avion.

L'application de la démarche d'exclusion de rupture à une partie du CSP présente un double enjeu : l'exploitant doit démontrer les gains en termes de radioprotection et de sûreté d'appliquer la démarche sur le périmètre considéré ; il doit également prouver que les conditions de conception et d'exécution du chantier permettant de garantir le niveau d'exigence associé et que l'exploitant dispose des capacités suffisantes pour assurer leurs déclinaisons opérationnelles par EDF et ses prestataires. Le 15 septembre 2021, l'ASN s'est prononcé positivement sur le recours à la démarche d'exclusion de rupture aux tuyauteries principales des circuits primaires des lignes de vapeur secondaires sur le réacteur EPR2, compte tenu des éléments de justification apportés et des évolutions de design proposées par EDF pour assurer une protection supplémentaire au sein du bâtiment réacteur et des bâtiments des auxiliaires de sauvegarde.

EDF doit encore préciser le référentiel d'application qu'elle envisage, qui devra permettre de garantir le haut niveau de qualité de conception, de fabrication et de suivi adéquat. A ce titre, EDF prévoit de lancer une consultation auprès de ses fournisseurs pour identifier un nouveau matériau d'apport<sup>2</sup> offrant des garanties mécaniques compatibles avec l'application de la démarche d'exclusion de rupture aux soudures des tuyauteries CSP concernées. Ce processus doit durer 2 à 3 ans et se déroule en parallèle des efforts de la filière pour retrouver la maîtrise industrielle.

EDF devra également apporter les justifications de sa capacité à assurer la correcte déclinaison opérationnelle du référentiel. Pour l'ASN, le retour d'expérience du chantier de l'EPR de Flamanville 3 doit encore être complété et les mesures palliatives envisagées par EDF pour renforcer sa maîtrise du chantier devront être éprouvées quant à leur efficacité. L'ASN pourra se prononcer sur ces deux sujets résiduels dans le cadre de l'instruction de la demande d'autorisation de création d'une installation nucléaire de base pour la première paire d'EPR2.

La protection contre les chutes d'avions et d'aéronefs sur le bâtiment réacteur est assurée pour l'EPR par l'enceinte externe de la double coque ; pour l'EPR2, la simple enceinte, plus épaisse, a vocation à apporter la double protection contre les agressions externes et contre les pressions internes. Ce sujet relevant de la sûreté et de la sécurité<sup>3</sup>, l'autorité de sûreté nucléaire et le haut fonctionnaire de défense et sécurité devront se positionner sur la capacité de l'enceinte à jouer ce rôle. A ce stade, les travaux de modélisation réalisés par EDF n'ont pas apporté les éléments de confort suffisants. Ce sujet devra être fermé dans le cadre de l'instruction de la demande d'autorisation de création de l'INB. **Ces deux sujets réglementaires ont donc vocation à être fermés dans le cadre de l'instruction par les autorités de sûreté et de sécurité d'une demande d'autorisation de création ; une décision défavorable pour EDF sur l'un ou l'autre entraînerait soit l'abandon du modèle EPR2 soit une revue de fond du design avec une incidence importante sur les coûts et les plannings.** D'autres éléments de conception font également l'objet d'échanges entre EDF et l'ASN, comme la démonstration des marges de sûreté et de la manœuvrabilité du réacteur EPR2 chargé en combustible MOx, la mise en place d'enceintes géotechniques à la périphérie de l'îlot nucléaire ou les règles utilisées pour les études de situation accidentelles pour la piscine combustible. Ces sujets restent néanmoins moins déterminants sur les coûts et les calendriers de construction envisageables.

### Des études à réaliser pour sécuriser la constructibilité de l'EPR2

Les études de conception doivent se poursuivre pour traduire les principales caractéristiques du concept EPR2 en un produit dont la constructibilité dans les conditions imparties est confirmée. Cela

<sup>1</sup> Etape intermédiaire dans la conception d'un modèle de réacteur, situé entre les études conceptuelles et les études détaillées

<sup>2</sup> Le matériau d'apport est le métal constituant la soudure

<sup>3</sup> Par opposition à la sûreté, le champ d'application de la sécurité nucléaire vise les événements d'origine malveillante.

passer par accroître le niveau de granularité des spécifications architecturales, puis par leur traduction dans un découpage contractuel et dans un catalogue d'équipements standardisé.

EDF estime à plus de 20 millions d'heures d'ingénierie la quantité d'études de conception restantes pour aboutir au stade de *detailed design*, dont moins d'1 million ont été conduites jusqu'à présent. Cette mobilisation importante des ingénieries d'EDF est nécessaire pour confirmer les choix de conception mentionnés et les décliner dans une version constructible, c'est-à-dire pouvant être mise en œuvre opérationnellement, mais également pour affermir les coûts de construction et la faisabilité des plannings de réalisation envisagés par EDF, selon plusieurs séquences :

- d'ici fin 2022, EDF envisage de poursuivre la contractualisation des principaux lots pour la construction d'éventuels nouveaux réacteurs, étape importante pour l'affermissement des délais et des calendriers envisageables ;
- sur la période 2022-2025, EDF obtiendrait successivement le permis de construire puis la délivrance du décret d'autorisation, sur la base notamment de l'examen technique de sûreté et de sécurité nucléaires, étape de validation du concept de réacteur par les autorités de sûreté et de sécurité nucléaires. Cette échéance de 2025 serait vraisemblablement à repousser à 2027 compte tenu du calendrier effectif et des étapes d'ici la prise de décision ;
- sur la période 2022-2027, qui serait vraisemblablement étendue à 2022-2029 par décalage des étapes précédentes, EDF réaliserait environ 70% des études de conception détaillées, de sorte à engager le premier béton d'une première tranche mi-2027, sous réserve que les travaux d'adaptation du 1<sup>er</sup> site d'implantation aient pu démarrer dès 2023.

En somme, si la technologie EPR2 était retenue pour un programme de construction en France, plusieurs étapes jalonnent encore la confirmation de la robustesse de son coût et de son planning d'exécution : la validation du concept EPR2 par l'obtention notamment du décret d'autorisation au titre de la sûreté nucléaire, prévue par EDF à l'horizon 2025/2027 puis sa déclinaison opérationnelle à un niveau de maturité suffisant, prévue par EDF à l'horizon 2027/2029.

## **B. Estimation à date des coûts, plannings et incertitudes pour la construction d'une ou plusieurs paires d'EPR 2**

EDF a réalisé plusieurs estimations successives des coûts et plannings de construction de l'EPR2 depuis 2019, qui ont fait l'objet de deux audits, fin 2019 et mi 2021, commandés par les pouvoirs publics à des cabinets de conseil externes. Sur la base des éléments fournis par EDF pour la construction de 3 paires d'EPR2, l'instruction a visé à apprécier le niveau de maturité du chiffrage, à estimer les incertitudes des coûts et des calendriers de construction affichés et à préciser les principaux facteurs auxquels ils sont sensibles.

### **1. A l'issue des audits, le processus de chiffrage est jugé adapté, mais l'expertise des coûts et des calendriers de réalisation devra être poursuivie**

Les estimations réalisées par EDF portent sur la construction de 3 paires d'EPR2 qui démarrerait à partir de 2027 avec les premiers bétons de deux tranches successives séparés de 18 mois et ceux de deux paires successives séparés de 4 ans. Selon EDF, les paires de réacteurs seraient mises en service en 2036-2037, 2039-2040 et 2043-2044, soit des durées de construction décroissant d'environ 9 ans pour la 1<sup>ère</sup> des 6 tranches à 7,5 ans pour la 6<sup>ème</sup>. Avant 2027, EDF mobiliserait son ingénierie comme exposé précédemment, l'hypothèse retenue par EDF étant une décision d'engagement fin 2022, portant l'ensemble du calendrier de réalisation de la première tranche à environ 13,5 années.

Selon la dernière estimation à date d'EDF, le coût de construction dit « overnight »<sup>4</sup> de ces 3 paires s'élèverait à environ 52Md€, dont près de 4 Md€ restant à engager pour les études de conception, 17Md€ pour la construction d'une première paire et 15Md€ à 16Md€ pour les suivantes. En outre, ces 52Md€ intègrent 8,2Md€ de marges, dispatchés dans le coût des différentes paires avec une part plus importante sur la première, visant à couvrir les incertitudes sur le chiffrage et l'éventualité de matérialisation de certains risques et aléas.

Le chiffrage d'EDF est issu d'un travail de décomposition fine à la fois des systèmes composant le réacteur nucléaire et ses bâtiments connexes, ainsi que des tâches à réaliser en phase de conception puis en phase de construction. La robustesse et la complétude de cette décomposition reposent sur l'expérience d'EDF dans le nucléaire, et en particulier ses expériences récentes sur les chantiers EPR de Flamanville, Taishan et Hinkley Point C. Les estimations quantitatives de chacune des composantes et leurs incertitudes associées relèvent d'un travail itératif d'affermissement réalisé par EDF, sur la base d'une expertise interne, de la formulation des retours d'expérience des chantiers EPR et du parc existant, ainsi que d'échanges avec certains fournisseurs pressentis.

Les deux prestataires d'audit auxquels l'administration a eu recours ont jugé ce processus adapté. Ils se sont prononcés sur la robustesse de la méthodologie de chiffrage, mais pas sur les quantitatifs retenus par EDF eux-mêmes, ne disposant pas de l'expertise nécessaire, très spécifique, pour les expertiser. Pour apprécier néanmoins la robustesse du chiffrage, un contrôle de cohérence sera effectué sur ces quantitatifs lorsque les données seront disponibles. Elles sont en effet à ce stade limitées étant issues partiellement du chantier en cours d'Hinkley Point C et du chantier terminé à Taishan, ou en cours de contractualisation par EDF ce qui n'a pas permis un accès complet aux sous-jacents de deux des principaux postes de coûts, le génie civil et l'ilot nucléaire.

## 2. De fortes incertitudes pèsent encore sur la prévision des coûts du programme

**Une part importante des marges a été ajoutée forfaitairement, sans être rattachée à ce stade à des risques identifiés**

Il est courant pour un projet en phase de développement de présenter des incertitudes sur les estimatifs de coûts et de calendrier qui sont amenés à être affermis par la suite. Ces incertitudes sont de deux types : (i) une possible mésestimation des quantitatifs, coûts et calendriers optimisés pour la fabrication du réacteur, en particulier avant la contractualisation des principaux lots constitutifs de la construction ; (ii) l'occurrence de risques (identifiables ou non), notamment en cours de réalisation du chantier, pouvant conduire à des surcoûts et/ou des retards quantifiables. A ce stade relativement amont de conception du projet EPR2, le calibrage de ces incertitudes est un exercice essentiel pour la bonne estimation des coûts et calendriers à terminaison.

Les 8,2Md€ de provisions toutes marges confondues introduites par EDF dans les chiffrages représentent environ 18% du coût non margé, proportion jugée cohérente par les prestataires d'audit au stade de *detailed design* d'un projet de cette ampleur. Néanmoins, parmi ces marges, 5,6Md€ ont vocation à couvrir des risques ou aléas<sup>5</sup>, dont 55% est relié à l'analyse des risques identifiés par EDF et 45% est ajouté forfaitairement.

Cet équilibre traduit une volonté d'EDF de prévoir un montant suffisant de provisions, au niveau usuellement retenu pour ce type de projet, mais la part des marges ajoutée forfaitairement reste inhabituellement élevée et ne garantit pas la bonne identification des risques du projet ou de leurs conséquences sur les coûts et les calendriers de construction.

## **Le chiffrage sur les paires 2 et 3 est majoritairement forfaitaire**

L'estimation des coûts et calendriers des paires 2 et 3 relèvent d'une démarche différente de celle appliquée pour la phase de développement et la construction d'une première paire. A la réserve mentionnée précédemment sur les marges pour aléas, les phases de développement et de construction de cette première paire ont fait l'objet par EDF d'une analyse spécifique et détaillée, y compris sur l'analyse des risques pouvant se matérialiser et leurs conséquences possibles sur les coûts et les calendriers. Pour les paires 2 et 3, l'essentiel des coûts, plannings, chroniques de charge d'activité et de dépenses, ainsi que l'analyse de risques affichés consiste en une recopie forfaitisée des analyses réalisées pour la paire 1.

### **L'évolution importante des coûts entre 2019 et 2021, qui n'avait pas été anticipée lors du premier audit, met en évidence que les incertitudes sur les chiffrages restent élevées à ce stade**

Entre début 2020 (date de remise des conclusions du premier audit commandé) et mars 2021, EDF a revu le coût de conception et de réalisation de 3 paires d'EPR2 à la hausse : de 46Md€<sub>20</sub> à 52Md€<sub>20</sub>, soit +13%. EDF impute cette évolution notamment au prix de deux contrats d'importance, le génie civil et la réalisation de l'îlot nucléaire, ainsi qu'à l'ampleur des travaux de préparation de site. EDF a également procédé à une réallocation de certains coûts d'ingénierie, auparavant affectés à la phase de construction, désormais considérés dans les coûts de développement du réacteur, renchérissant l'enveloppe des études de conception de près de 40%.

S'il est attendu que les coûts s'affermissent et puissent augmenter au fil des études, ces évolutions devraient par construction être absorbées pour l'essentiel par les marges introduites dans les phases précédentes pour tenir compte d'éventuelles mésestimation des quantitatifs de coûts. Dans l'estimation de début 2020, le montant de 46Md€<sub>20</sub> intégrait de telles marges et le surcoût de 6Md€<sub>20</sub> observé depuis correspondait à un scénario déjà fortement dégradé (probabilité inférieure à 20%) sur la réalisation d'un chantier de 6 paires. Le premier audit avait pourtant conclu à la robustesse du devis et de la méthodologie de chiffrage retenue. Le second audit commandé par l'administration mi-2021 n'a pas permis de clarifier les raisons pour lesquelles le chiffrage de 2019 ne couvrait pas correctement ces évolutions. S'il est vrai que les estimations de la première offre n'étaient basées qu'à hauteur de 30 % sur des devis spécifiques à l'EPR2, les marges pour incertitudes prévues dans le chiffrage de 2019 n'avaient pas intégré les surcoûts constatés sur l'offre de 2021.

Compte tenu de la maturité du projet à date, des incertitudes restent à lever sur la méthodologie d'évaluation des quantitatifs et le dimensionnement des provisions et il est nécessaire de poursuivre les études afin d'affermir les devis. Il sera nécessaire de conduire un nouvel audit lorsque l'offre sera prête pour un engagement ferme. La mise à jour du planning directeur du projet pour tenir compte du calendrier de la décision devra également être effectuée compte tenu des impacts qu'elle aura sur les coûts du programme. La réallocation des coûts de certaines études qui renchérissent l'enveloppe totale des études de conception n'a pas non plus été expliquée à ce stade.

### **3. Le chiffrage d'EDF intègre certains risques auxquels la filière nucléaire est exposée, mais pas l'ensemble des surcoûts possibles**

EDF a réalisé une analyse de risques comportant une trentaine de macro-risques caractérisés sur les phases de conception et de réalisation d'une première paire d'EPR2, pour certains également sur les paires suivantes. Cette analyse couvre plusieurs familles d'événements, dont ceux qui ont été préjudiciables au chantier de l'EPR de Flamanville : mauvaise organisation du projet, schéma industriel défaillant, défaut de ressources humaines, aléas sur le chantier de construction, difficultés d'intégration au sein de la filière des évolutions de méthode et d'outil portées par EDF.

Certains risques identifiables ne sont toutefois pas intégrés dans le chiffrage d'EDF, qui anticipe ainsi la mise en place d'un cadre de régulation qui répartirait les risques entre l'entreprise et l'Etat ou bien estime que la situation ne se produira pas. C'est le cas notamment des risques suivants :

- les conséquences de recours juridiques ou de troubles à l'ordre public perturbant la réalisation des chantiers ou retardant leur enclenchement. Une année de retard sur une tranche coûterait de l'ordre de 100M€ avant l'enclenchement du chantier puis 600M€ en phase de réalisation ;



- les situations où des écarts sur les fabrications ne sont pas détectés rapidement mais au bout de plusieurs années. Sur le chantier de l'EPR de Flamanville, cette situation a conduit à l'immobilisation depuis 2019 du chantier pour définir et engager des reprises de soudures sur le circuit secondaire principal et de trois piquages sur le circuit primaire dont les écarts de fabrication remontent au début de la décennie 2010 ;
- des événements climatiques et météorologiques très perturbants (inondations, intempéries, canicules, vagues de froid) ainsi que le risque pandémique, qui peuvent être particulièrement préjudiciable à un chantier nucléaire en raison du haut niveau de co-activité sur site ;
- le chiffrage de 52Md€ est valable aux conditions économiques de 2020, c'est-à-dire dans l'hypothèse notamment où le coût du travail, l'inflation et le coût des matières premières seraient pendant toute la durée du chantier identiques ceux de l'année 2020. Néanmoins, la crise sanitaire de 2020 et le rebond économique en cours, qui ont conduit à une moindre disponibilité et une hausse de coûts de nombreuses matières premières, montrent qu'une telle stabilité est illusoire. A ce stade, les éléments mis à disposition n'ont pas permis d'établir la sensibilité du coût de réalisation d'EPR2 à ces conditions susceptibles de renchérir le devis dans les prochaines années ;

Pour les risques identifiés, EDF suppose que pour les seconde et troisième paires de réacteur, les problèmes de nature organisationnelle et industrielle qui se seraient matérialisés sur le chantier de la première paire seraient en grande partie résolus sans que cela n'ait d'incidence importante ni sur les coûts ni sur les calendriers de réalisation des deux paires suivantes. La validité de cette hypothèse n'a pas été étayée pour le cas où les chantiers des paires successives se dérouleraient en partie en parallèle.

Dans l'ensemble, les montants considérés pour les effets des risques sur les coûts et les calendriers supposent une reprise en main efficace par EDF de la maîtrise des fabrications, du pilotage du chantier et plus largement que tous les écueils observés sur les chantiers EPR aient été résolus.

A titre illustratif, le chiffrage d'EDF comporte un risque lié au manque de maîtrise des processus applicables aux équipements sous pression nucléaires (ESPN), c'est-à-dire la possibilité qu'EDF et ses sous-traitants rencontrent des difficultés pour appliquer la réglementation des équipements sous pression nucléaires, appliquée pour la première fois sur le projet EPR. La maîtrise de ce risque est complexe car elle nécessite une maîtrise des compétences ESPN en phase de fabrication chez les sous-traitants et un suivi renforcé chez EDF. Pour autant, dans son analyse de risque, EDF ne retient que 7% de l'impact maximal possible sur le coût en cas de difficulté sur ces aspects. Par ailleurs, les études menées pour jauger l'état de préparation de la filière montrent qu'il existe des risques que cette dernière ne puisse assumer le plan de charge prévu, faisant ainsi peser des risques supplémentaires sur les plannings (cf. chapitre 2).

Plus largement, l'appréciation de la robustesse des hypothèses retenues par EDF pour les risques liés à la maîtrise industrielle nécessitera de vérifier l'effectivité et les résultats de la mise en œuvre des plans d'actions engagés par EDF et la filière nucléaire (Cf. chapitre 2).

#### **4. L'engagement d'un programme de plusieurs paires permet des effets de série liés essentiellement à la mutualisation des études de conception mais crée des risques supplémentaires à maîtriser**

L'engagement dans la construction d'un programme de plusieurs paires de réacteurs permet des économies d'échelle. Le principal effet tient à la mutualisation des coûts de conception qui restent à engager pour finaliser l'architecture de modèle EPR2 et l'organisation opérationnelle d'un chantier de construction. Cet effet dit « palier » n'est pas une réduction intrinsèque du coût de construction mais diminue le coût moyen de conception et de construction d'une série de réacteurs : de 9% en mutualisant sur 2 paires de réacteurs et de 12% en mutualisant sur 3 paires. Il serait toutefois amoindri, dans des proportions non estimées à date, si des études complémentaires devaient être engagées en cours de chantier du fait d'évolutions du référentiel de sûreté ou de sécurité, ce qui reste vraisemblable d'ici le démarrage du chantier d'une troisième paire au plus tôt à l'horizon 2035.

Il est également attendu que la réplication du chantier de construction du même modèle de réacteur permette d'accroître la maîtrise industrielle et la qualité des fabrications, ce qui se traduit à ce stade du projet par de moindres marges pour risques dans le chiffrage des paires 2 et 3. Ainsi, EDF considère que le coût moyen de construction d'une paire diminue de 3,5% pour une série de 2 paires et de 5,5% pour une série de 3 paires par rapport à la réalisation d'une unique paire d'EPR2. Toutefois, comme indiqué dans la partie A.1, une partie significative des effets de dérisquage ne reposent pas à ce stade sur une analyse de risque mais est appliquée forfaitairement par EDF.

Plus marginalement, un engagement sur 3 paires d'EPR2 permet de réaliser des économies du fait de plus gros volumes d'achats. Cet effet reste limité à certains lots spécifiques et EDF estime à 300M€ les économies qui seraient ainsi réalisées pour les paires 2 et 3.

EDF indique enfin que l'engagement d'une série de 3 réacteurs est une condition pour mobiliser le tissu industriel sur de nouvelles constructions de réacteurs. Les travaux à poursuivre sur le sujet de la capacité de la filière devront permettre d'objectiver et de quantifier cet effet.

Un tel engagement présente également des risques, qui n'ont pas été quantifiés à ce stade. En premier lieu, un recouvrement entre les chantiers des paires successives peut conduire à ce qu'un défaut de fabrication qui ne serait pas détecté rapidement ait un impact multiplié d'autant qu'il y a de réacteurs commandés. EDF propose de séparer les démarrages des chantiers de deux paires successives de quatre années, résultat d'un arbitrage entre le temps nécessaire pour intégrer le retour d'expérience des premières années du chantier précédent et l'intérêt d'assurer une continuité à ses sous-traitants. Pour autant, une analyse détaillée pourra être conduite par les pouvoirs publics d'ici mi-2022 pour détailler les enjeux de ce rythme de déploiement.

Par ailleurs, la structure contractuelle mise en place par EDF avant les premières réalisations devra prendre en compte qu'en cas de difficultés sur les premières années de chantier, des ajustements d'allotissement ou de pilotage importants pourraient être nécessaires. Outre les enjeux de maîtrise industrielle, les référentiels de sûreté et de sécurité sont par exemple susceptibles d'évoluer d'ici au démarrage du chantier d'une troisième paire, auquel cas certaines études de conception devront être reprises et pourront entraîner des modifications sur la réalisation des réacteurs suivants. L'intégration de ce besoin de flexibilité dans la stratégie d'achat d'EDF limitera vraisemblablement les économies d'échelle envisageables.

#### **5. Les perspectives de date de mise en service d'un premier EPR2 restent incertaines, le couplage au réseau aurait lieu vraisemblablement au plus tôt à l'horizon 2040**

Dans sa proposition formulée au Gouvernement au printemps, EDF envisage la mise en service d'un premier EPR2 en septembre 2036, estimant à 5 ans (60 mois) la durée de conception entre la décision d'engagement et le premier béton et à 105 mois la durée de construction à partir d'un premier béton réalisé début 2028. Les audits commandés par les pouvoirs publics ont permis de clarifier les sous-jacents de ce calendrier, qui apparaît devoir être révisé à plusieurs titres :

- **L'initialisation de la séquence amenant à la décision d'investissement d'EDF prévue par EDF doit être reportée d'au moins 8 mois dans un scénario optimiste.** Le premier jalon critique à franchir consiste à saisir la Commission nationale du débat public en application de l'article L. 121-8 du code de l'énergie pour que celle-ci définisse les modalités de participation du public au processus de décision pour le projet de réalisation d'une première paire d'EPR2 sur le site qui sera retenu. Dans son chiffrage, EDF positionne cette saisine, qui n'a pas encore eu lieu, en mars 2021.
- **La durée de la phase de conception durerait vraisemblablement plus que cinq ans compte tenu des enjeux de préparation de la filière,** de l'effort d'ingénierie qu'il reste à produire pour détailler l'architecture de l'EPR2 et de la durée de l'instruction du concept détaillé par les autorités de sûreté et de sécurité.
- Dans le cadre d'une décision de construction de plusieurs EPR2, la première tranche constituerait une tête de série à deux égards : première réalisation d'un programme de renouvellement du parc nucléaire ; première réalisation d'un nouveau modèle de réacteur. **Une durée de construction en 105 mois apparaît difficilement accessible** de ce fait, au regard notamment des durées observées :

- o les constructions des deux EPR à Taishan ont duré 110 mois et 113 mois, dans un contexte de constructions nucléaires particulièrement dynamique en Chine ;
- o les derniers réacteurs mis en service en France entre 1996 et 1999 (palier N4) ont été construits en 153 mois pour le premier (le plus long) et 105 pour le quatrième (le plus rapide), l'EPR2 étant un réacteur par ailleurs plus sophistiqué et plus puissant que les réacteurs de 2<sup>ème</sup> génération.

L'instruction par les pouvoirs publics conduit à privilégier un horizon de mise en service possible d'un premier EPR2 en 2039/2040, pour un scénario de relativement bonne maîtrise industrielle. Une fois le réacteur couplé, la montée en charge est progressive sur une durée de deux ans.

Les analyses réalisées permettent également d'établir des perspectives de mise en service dans des scénarios plus pessimistes : dans un scénario dégradé en matière de maîtrise industrielle et où le démarrage des travaux est davantage reculé, la mise en service pourrait intervenir à l'horizon 2042/2043, voire après 2045 dans des scénarios fortement dégradés.

## 6. Des ajustements doivent donc d'ores et déjà être apportés au chiffrage et au calendrier proposé pour la construction de réacteurs EPR2, qui devra être de nouveau audité

A ce stade de l'instruction, les coûts et calendriers les plus vraisemblables pour la réalisation d'EPR2 sont les suivants :

		Conception	Paire #1	Paire #2	Paire #3
Coût de construction (hors coûts financiers)	Bonne maîtrise industrielle	3,7 à 4,1 Md€ <sub>20</sub>	17 à 18,5 Md€ <sub>20</sub>	15,8 à 17,4 Md€ <sub>20</sub>	15,3 à 17 Md€ <sub>20</sub>
	Scénario plus dégradé	4,6 Md€ <sub>20</sub>	21 Md€ <sub>20</sub>	19,5 Md€ <sub>20</sub>	19 Md€ <sub>20</sub>
Perspectives de couplage au réseau des réacteurs	Relative maîtrise industrielle		Tranche 1 : 39/40 Tranche 2 : 40/41	Tranche 1 : 43/44 Tranche 2 : 44/45	Tranche 1 : 47/48 Tranche 2 : 48/49
	Scénario plus dégradé		Tranche 1 : 42/43 Tranche 2 : 43/44	Tranche 1 : 46/47 Tranche 2 : 47/48	Tranche 1 : 49/50 Tranche 2 : 50/51

La dépense d'investissement serait répartie dans le temps de la manière suivante, pour un scénario de bonne maîtrise industrielle : [ ]

Ces éléments ne constituent pas une vision définitive des coûts et calendriers compte tenu des différents champs d'incertitude exposés plus haut. En premier lieu, le second audit commandé par les pouvoirs publics s'étant achevé début octobre, l'analyse des données qu'il contient devra se prolonger jusqu'à début 2022. Le chiffrage d'EDF est par ailleurs en cours d'actualisation et d'ici fin 2022 des éléments plus précis devraient être disponibles avec notamment la progression de l'allotissement contractuel du projet.

Enfin, des estimations complémentaires devront être réalisées pour des risques potentiellement significatifs non pris en compte dans le chiffrage d'EDF, notamment :

- la prise en compte dans les provisions de coûts des conditions économiques (coût du travail, coût des matières premières, inflation) pouvant renchérir les devis ;
- des difficultés de réalisation liées à des perturbations du chantier (conditions météorologiques défavorables, troubles à l'ordre public...) pouvant induire 2 ans de retard en phase de conception et 1 année de retard en phase de réalisation de chaque tranche ;

- des scénarios industriels où les défauts de fabrication ne sont détectés qu'au bout de plusieurs années, conduisant à une reprise des fabrications pour plusieurs chantiers en cours, et à des décalages de mise en service cumulés.

## **C. Estimation du coût complet de l'électricité produite par des EPR2**

### **7. Coûts d'exploitation et facteur de charge des réacteurs EPR2**

#### **Coûts d'exploitation**

Les coûts d'exploitation représentent une part importante et relativement incompressible du coût de revient de l'électricité produite. Ils sont composés :

- des charges fixes d'exploitation (personnel d'exploitation des réacteurs notamment);
- des investissements de maintenance qui sont nécessaires au remplacement de certains composants à l'occasion des visites périodiques et des visites décennales ;
- des coûts de combustible, qui dépendent du taux de fonctionnement des réacteurs, incluant l'extraction des matières premières, leur conversion en assemblage combustible puis leur entreposage et recyclage partiel.
- de la fiscalité locale et les redevances nucléaires.

EDF estime qu'en moyenne ces coûts d'exploitation s'élèvent à 600 M€/paire/an, estimation reposant largement sur le retour d'expérience du parc nucléaire existant. L'audit commandé par les pouvoirs publics en 2021 a toutefois souligné que cette valeur n'est entachée d'aucune incertitude à ce stade ; la robustesse de ce montant devra donc être appréciée à l'aune d'un approfondissement sur ce niveau d'incertitude.

Par ailleurs, le coût du combustible pris en compte n'intègre pas, à ce stade, les besoins d'investissement dans le cycle du combustible, notamment à l'usine de La Hague, pour poursuivre la stratégie de traitement-recyclage au-delà de 2040. De plus, avec la réduction de la part du nucléaire dans le mix électrique français, l'efficacité des investissements dans le cycle sur le coût de revient de production et de retraitement du combustible sera réduit, renchérissant d'autant le coût de revient du combustible nucléaire.

#### **Taux de disponibilité**

Le taux de disponibilité des réacteurs est lié aux arrêts pour rechargement du combustible, aux arrêts pour maintenance et remplacements de gros composants, et aux aléas et fortuits par définition imprévus qui peuvent nécessiter l'arrêt temporaire d'un réacteur. EDF estime que ce taux pourrait être compris entre 85% et 91% pour l'EPR2, alors qu'il est en moyenne de 80% sur le parc nucléaire français existant. Ces meilleures performances seraient apportées par les évolutions de conception depuis le parc existant notamment l'électrification de la robinetterie et une meilleure optimisation des calendriers d'arrêt.

A ce stade, le retour d'expérience des EPR de Taishan, seuls EPR mis en service dans le monde, ne permet pas de conclure quant aux apports effectifs des évolutions de conception sur la disponibilité moyenne de ces réacteurs, notamment la réduction du nombre de fortuits. Par ailleurs, dans un mix électrique présentant une composante nucléaire significative mais largement réduite par rapport aux niveaux actuels, les besoins capacitaires pour assurer la sécurité d'approvisionnement induiront vraisemblablement davantage de contraintes sur le positionnement des arrêts pour chacun des nouveaux réacteurs construits comparativement au cas présent où la stratégie d'économie de combustible et de placement des arrêts est lissée sur 56 réacteurs.

Ces considérations conduisent à tenir compte à ce stade de scénarios prudents, et à retenir pour le taux de disponibilité une fourchette [0,8 ; 0,88].