



LES TUNNELS DANS LE NUCLEAIRE





Les tunnels dans le nucléaire

Vincent HOUARD

Responsable produit Ouvrages de prise et de rejet d'eau

Sommaire

1. L'énergie et
le nucléaire en
France

2. Le projet
EPR2

3. Le projet
Hinkley Point C
(UK)

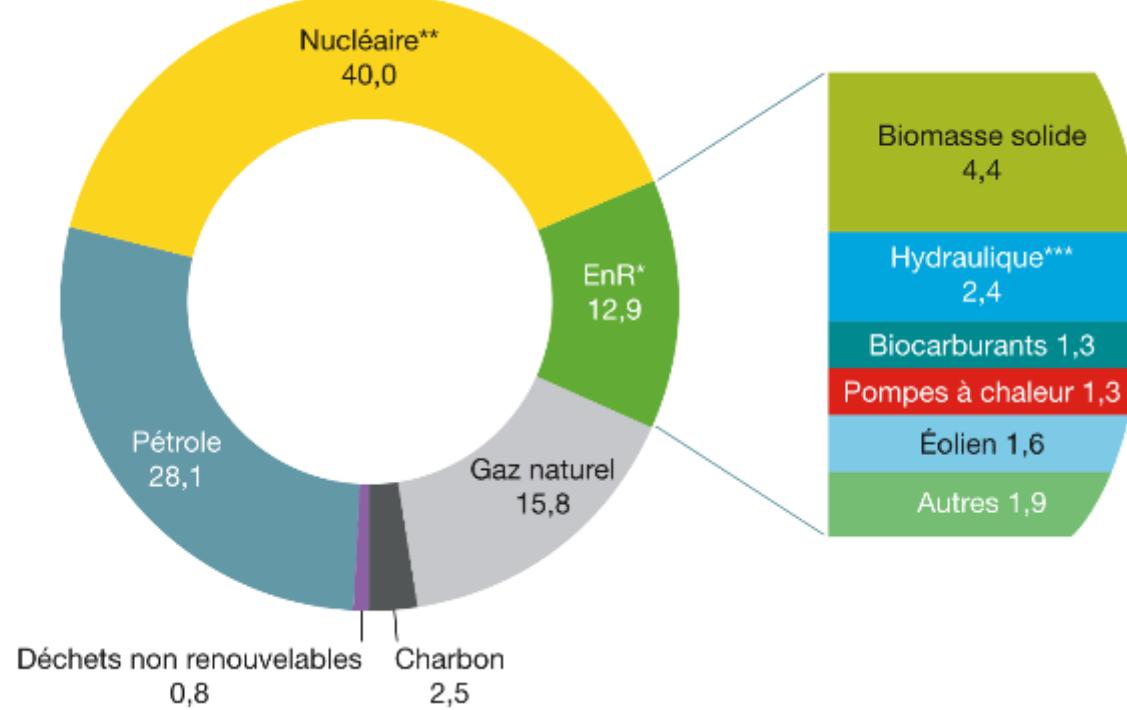
N°1

L'énergie et le nucléaire en France

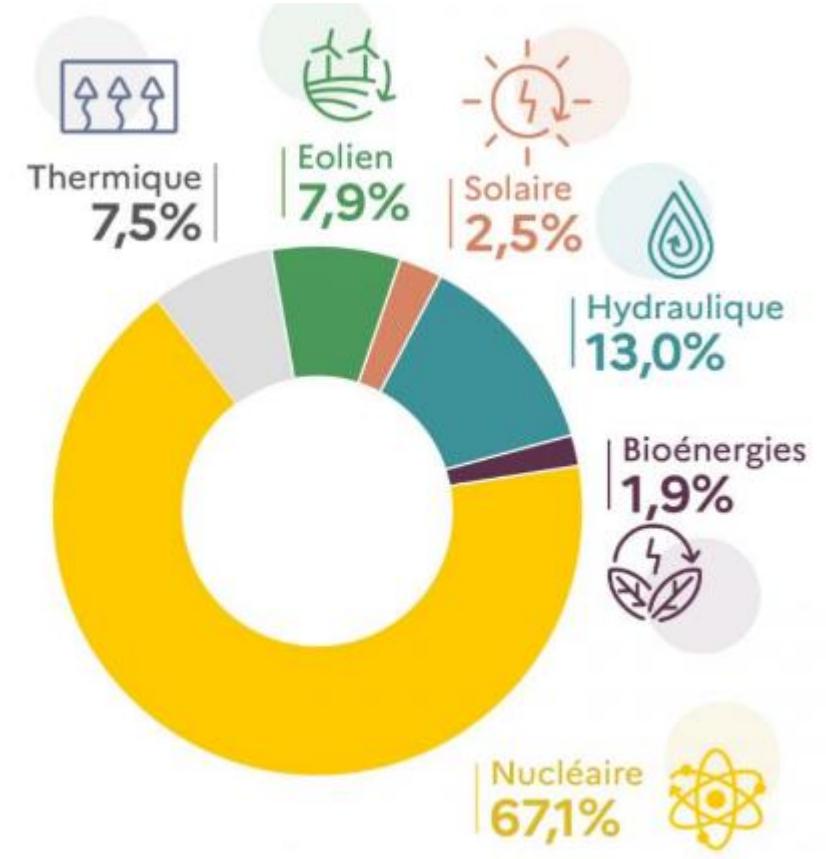
Le mix énergétique français
Le nucléaire en France

Le mix énergétique français

Source : Ministère de la transition écologique - Chiffres clés de l'énergie édition 2021



Mix énergétique en 2021



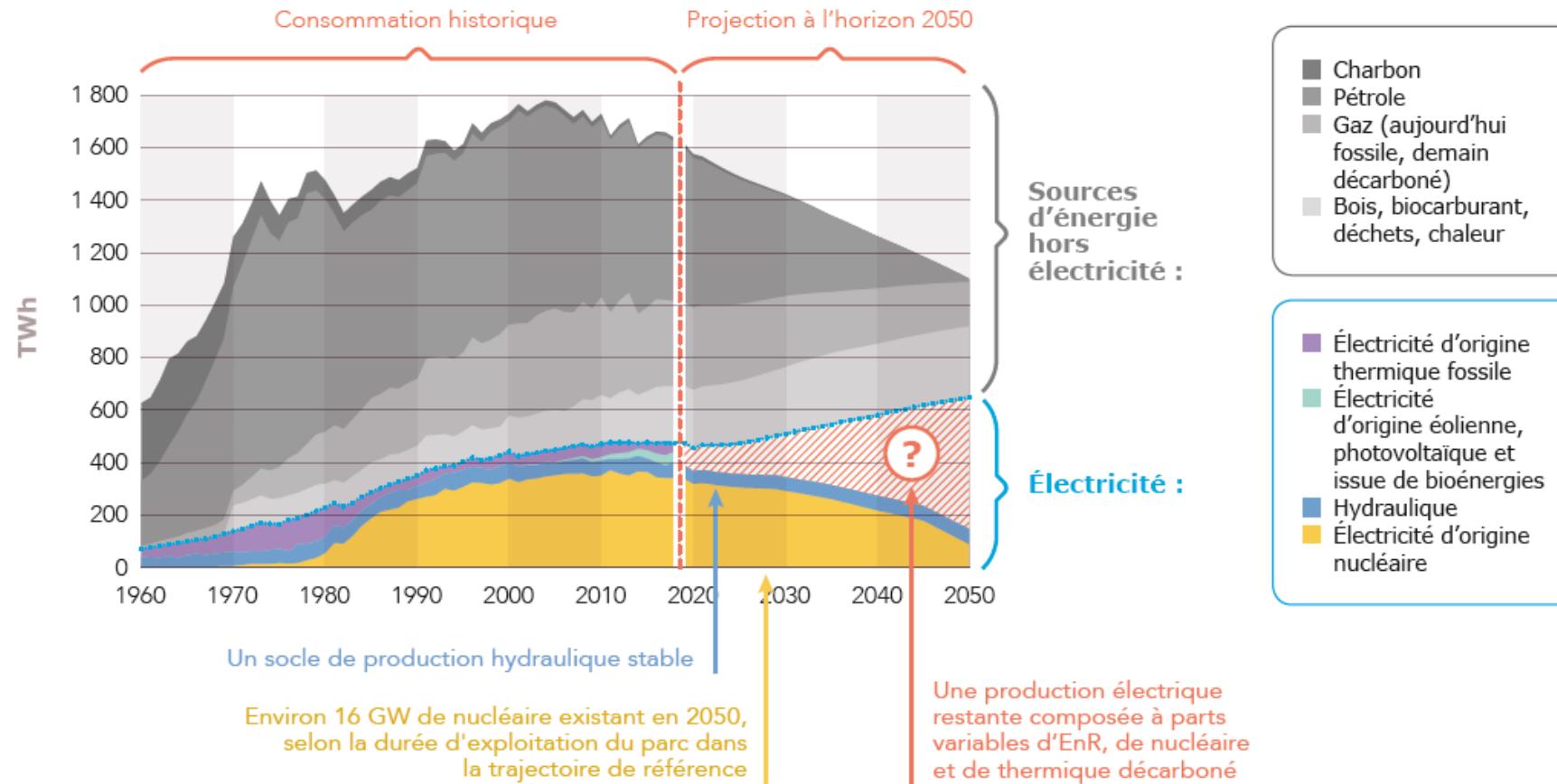
Mix électrique en 2021



Le mix énergétique français

Figure 3

Évolution de la consommation totale d'électricité et de la consommation d'énergie finale pour les autres énergies en France



Extrait du rapport RTE :

Futurs énergétiques

2050

Principaux résultats

Octobre 2021



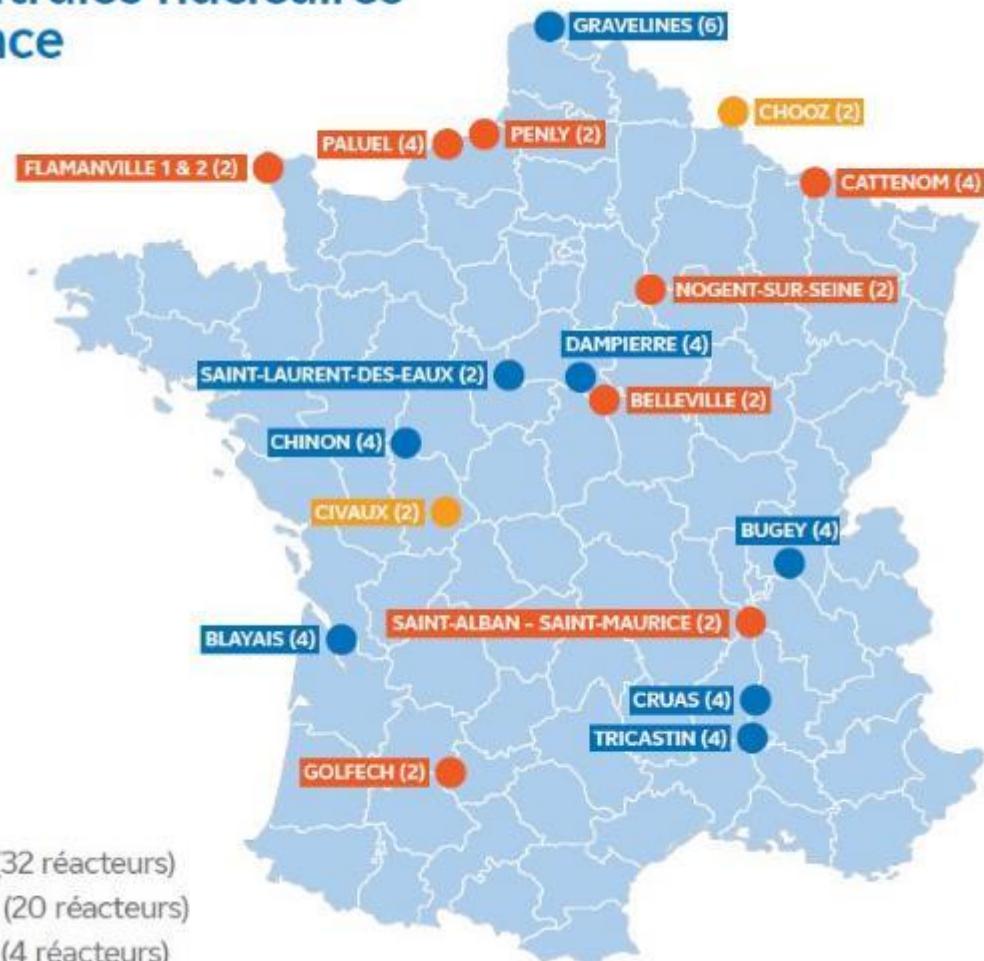
Le nucléaire en France

56 réacteurs en fonctionnement.

En 2018, les États-Unis (841,3 TWh), la France (412,9 TWh) et la Chine (295 TWh) sont les trois principaux pays producteurs d'électricité d'origine nucléaire.



Les centrales nucléaires en France



N°2

Le projet EPR2

Eléments de contexte

Penly, Gravelines...

Eléments de contexte

Conformément à la PPE 2019-2028, EDF a remis à l'Etat, en mai 2021 sa proposition de **construire 3 paires d'EPR2, sur les sites de Penly, Gravelines, et à Bugey ou Tricastin** (Auvergne Rhône-Alpes).

Les déclarations du président de la République

Le 10 février 2022 à Belfort

La mise en œuvre immédiate d'un programme de nouveaux réacteurs nucléaires avec une première mise en service à l'horizon 2035 à travers le lancement :

- du projet de construction de trois paires d'EPR2
- d'études sur la construction de huit EPR2 additionnels

Sur la séquence de concertation :

- **Une « *large concertation du public* » sur l'énergie au 2nd semestre 2022, puis « *des discussions parlementaires en 2023 pour réviser la programmation pluriannuelle de l'énergie* ».**
- **« *Nous allons engager dès les semaines à venir les chantiers préparatoires [...] la saisine de la Commission nationale du débat public* »**



 **EDF construira et exploitera ces nouveaux EPR.** 



L'enjeu du choix des sites

- **Sur un site nucléaire EDF existant**
- **Des critères de choix techniques**

Les critères techniques de foncier et d'urbanisme notamment, mais aussi de capacités de source froide, de caractéristique des sols, de niveau sismique, de sensibilité environnementale et de capacité de raccordement au réseau national 400kV de RTE ont été pris en compte.

- **Une mobilisation essentielle des territoires**

La mobilisation des territoires pour accueillir une paire d'EPR2 est un élément déterminant dans le choix des sites.

- **Les sites prévus pour le programme**

Il a été retenu de proposer en réponse à la PPE, un programme de trois paires d'EPR2 construites sur les sites de Penly, Gravelines, et Bugey.



*Penly
(Normandie)*



*Gravelines
(Hauts-de-France)*

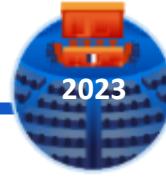


*Bugey
(Auvergne Rhône-Alpes)*

Le planning prévisionnel du programme de 3 paires d'EPR2

Automne 2022

Débat public



2023

Enquête publique

2024

Terrassements & travaux préparatoires

2026

Obtention
du PC

2027

Obtention
du DAC
JO
1^{er} béton de
l'ilot nucléaire

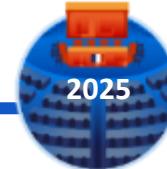
Horizon
2035 - 2037

Mise en service
des 1^{ers} réacteurs
sur Penly

Dépôt des demandes
d'autorisation de création (DAC)
et de permis de construire (PC)

S1 2024

Concertation



2025

Enquête publique

2031

Horizon
2038 - 2039

Mise en service
des réacteurs sur
Gravelines

Dépôt des demandes
de DAC et de PC

Obtention
du PC

Obtention
du DAC

JO
1^{er} béton de
l'ilot nucléaire

S2 2026

Concertation



2028

Enquête publique

2035

Horizon
2042 - 2043

Mise en service
des réacteurs
sur le 3^e site du
programme

Obtention
du PC

Obtention
du DAC

JO
1^{er} béton de
l'ilot nucléaire



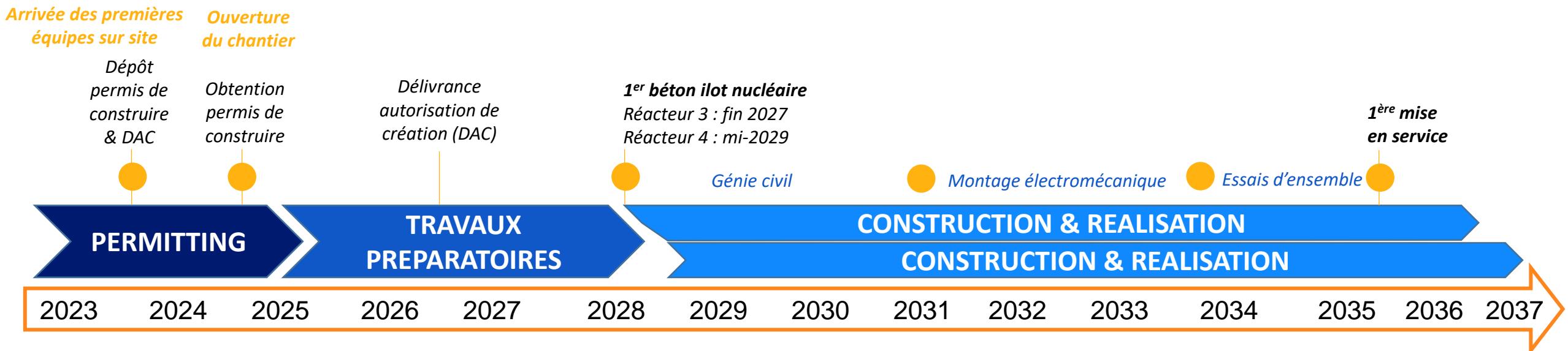
Penly aujourd'hui...



Penly demain !

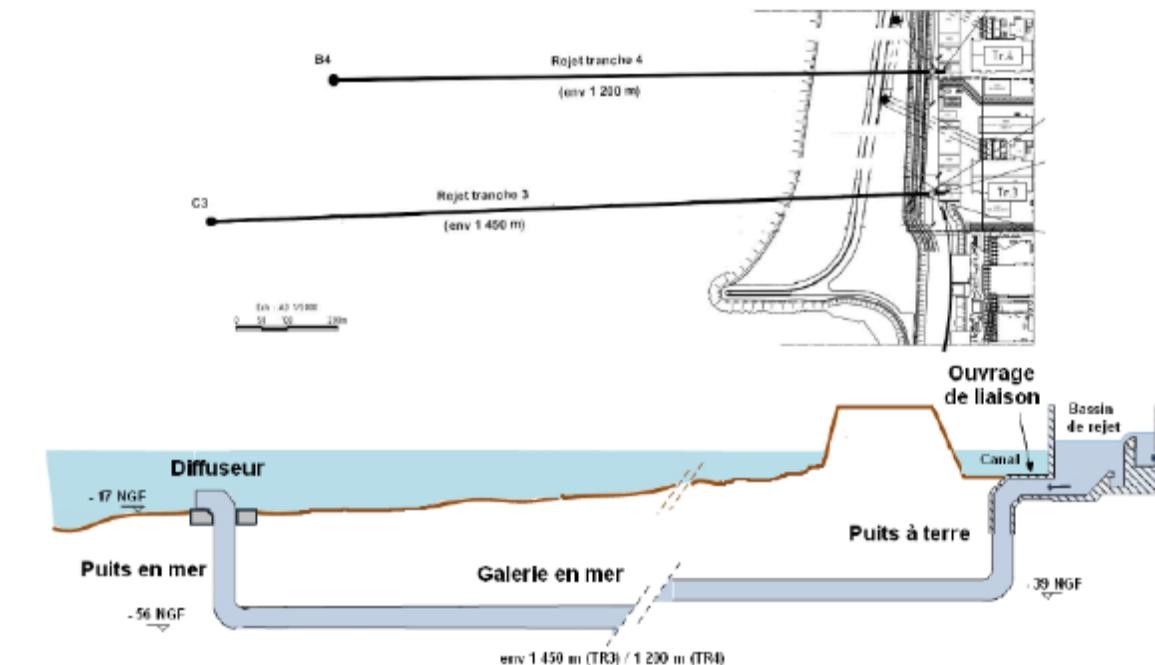
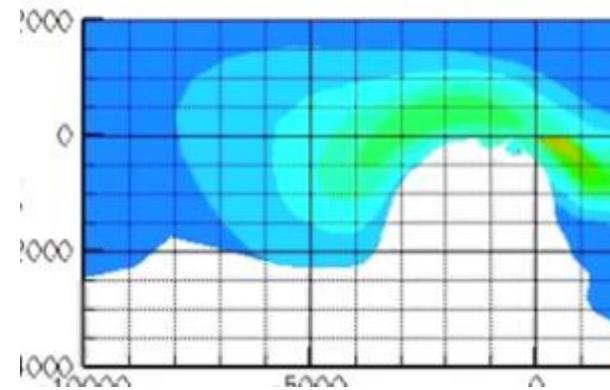


Calendrier prévisionnel de la construction des EPR2 de Penly 3&4



Les tunnels de rejet en mer

- **Une conception particulière qui dépend :**
 - **des conditions géologiques locales**
 - **des études thermiques** (critères d'élévation de température à respecter)
 - **des conditions de fonctionnement** (limitation des pertes de charge dans le circuit)
- **Caractéristiques des tunnels de l'EPR2 de Penly**
 - 2 tunnels de rejet (1 par tranche)
 - Longueur : 1,2 à 1,4 km
 - Horizon géologique : craie (40m sous le fond de la mer)
 - Diamètre intérieur : 5m50
 - Connexion au puits en mer de 40m de profondeur





Gravelines aujourd'hui...



EDF EPR 2 GRAVELINES
vue préliminaire architecturale au 19 07 23 susceptible d'évolutions



Gravelines demain !



N°3

Le projet Hinkley Point C

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

SOMMAIRE

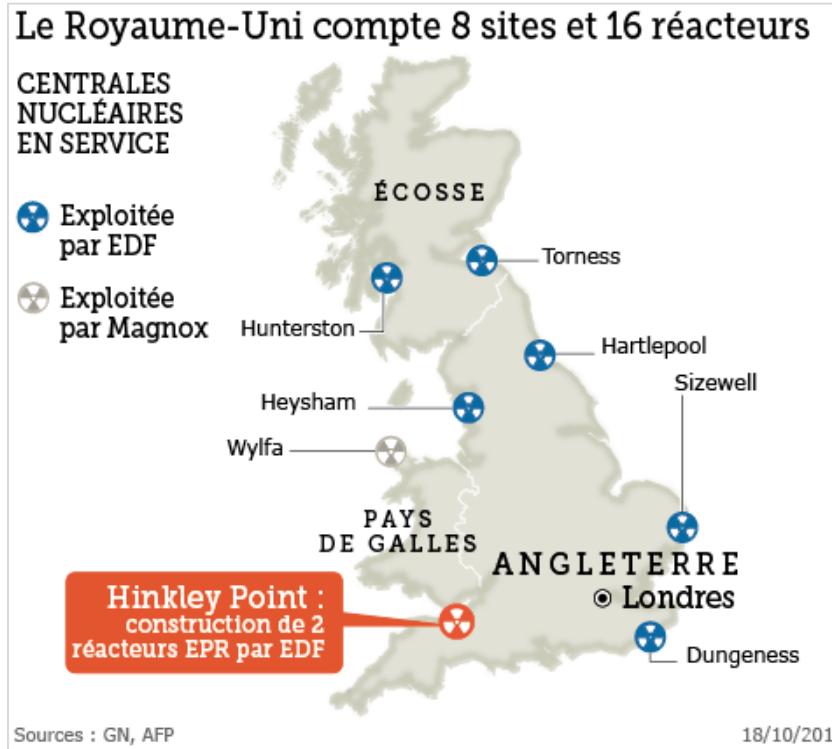
- 1) Présentation générale et de la source froide du projet Hinkley Point C
- 2) Présentation des ouvrages de prise et de rejet d'eau du projet Hinkley Point C
- 3) Spécificités des tunnels hydrauliques pour les centrales nucléaires
- 4) Focus sur les puits en mer verticaux et leurs connexions
- 5) Conclusion

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

1) Présentation générale et de la source froide du projet Hinkley Point C

Construction par EDF (70%) en association avec CGNPC (30%) sous maîtrise d'ouvrage NNB (Nuclear New Build) de 2 EPR d'une capacité de 1650 MW chacun.

L'ingénierie est confiée à EDF.



Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

1) Présentation générale et de la source froide du projet Hinkley Point C

La construction a démarré officiellement en 2018 et devrait se terminer en 2027.



Vue de la cinquantaine de grues sur le chantier



Vue de l'avancement du bâtiment réacteur et des bâtiments avoisinants



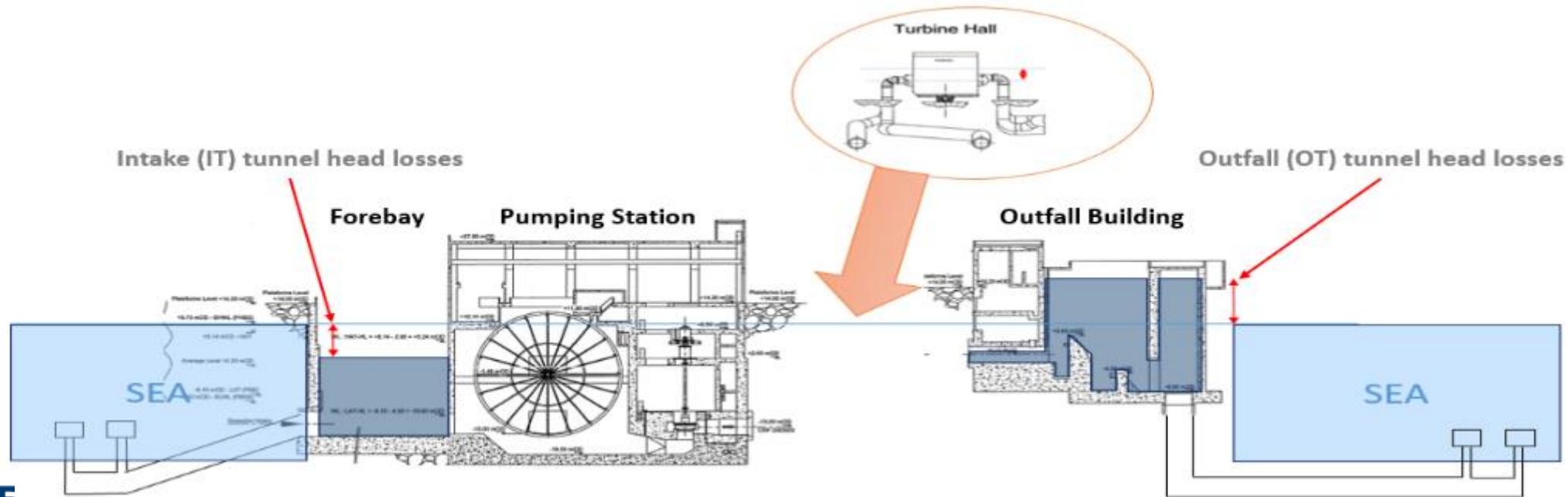
Pose d'un rondeau de liner du bâtiment réacteur à l'aide de Big Carl (plus grosse grue du monde)



Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

1) Présentation générale et de la source froide du projet Hinkley Point C

- La source froide comprend les **circuits de refroidissement, de production et de sûreté**.
- Deux types de circuits de refroidissement existent :
 - o Les circuits ouverts, généralement en mer ;
 - o Les circuits fermés, généralement en rivière avec aéroréfrigérant.
- La source froide de HPC **est un circuit ouvert avec prise et rejet d'eau en mer**. Le débit circulant dans une tranche est de 65 m³/s.



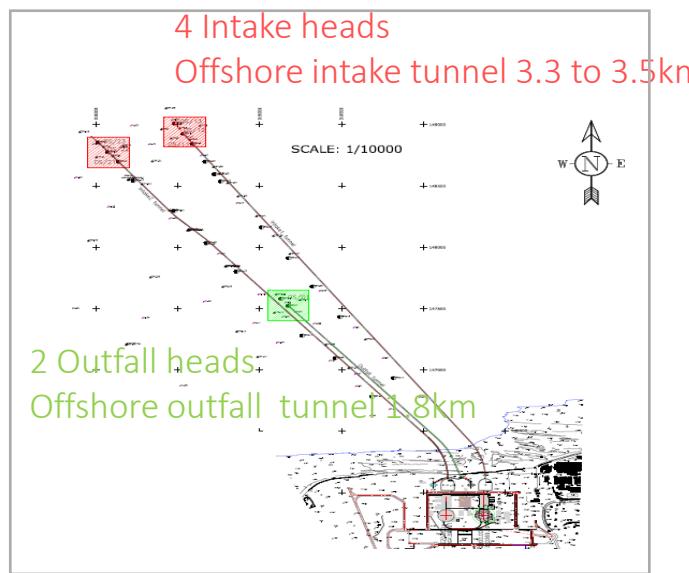
Coupe type d'un système de refroidissement ouvert d'une centrale nucléaire

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

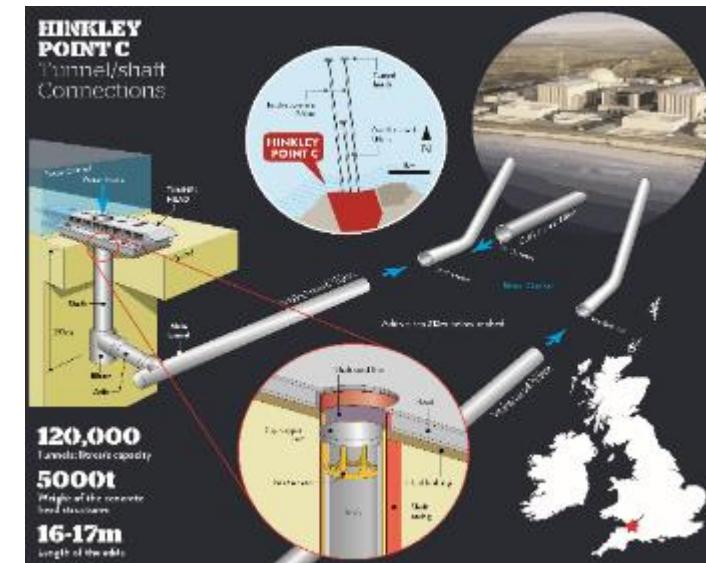
2) Présentation des ouvrages de prise et de rejet d'eau du projet Hinkley Point C

Caractéristiques des ouvrages :

- 2 tunnels d'amenée de longueur 3,45 km environ et de diamètre intérieur 6 mètres et un tunnel de rejet commun de longueur 1840 m et de diamètre intérieur 7 mètres creusés au tunnelier à pression de terre,
- Un ensemble de puits en mer (6 unités - diamètre intérieur 4,2 m) réalisés par la méthode du shaft-drilling depuis des plates-formes en mer. Ces puits permettent de connecter les tunnels aux têtes posées sur le fond de la mer,
- 4 têtes de prise et 2 têtes de rejet préfabriquées à terre puis immergées en position définitive



Vue en plan des tunnels de prise et de rejet d'eau



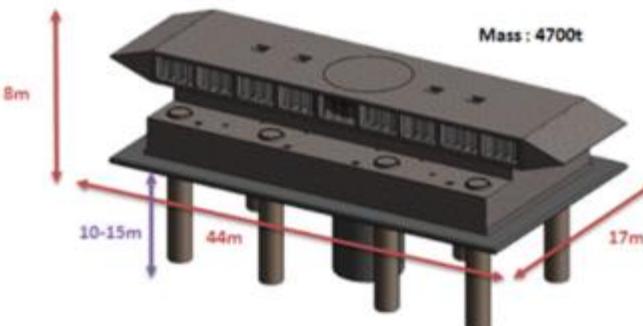
Vue en 3D du système de prise d'eau

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

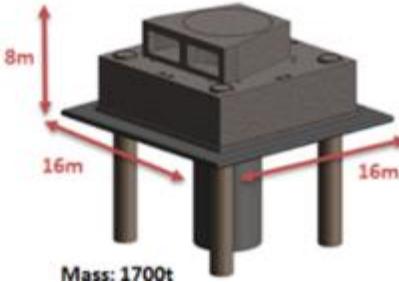
2) Présentation des ouvrages de prise et de rejet d'eau du projet Hinkley Point C

Les ouvrages maritimes :

- **Intake heads (4 no.)**



- **Outfall heads (2 no.)**



Caractéristiques des 4 têtes de prise d'eau
et des 2 têtes de rejet



Vue d'une tête de prise d'eau



Aire de préfabrication des têtes



Transport et pose
d'une tête de prise d'eau

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

2) Présentation des ouvrages de prise et de rejet d'eau du projet Hinkley Point C

Tunnels :

Contexte géologique et géotechnique :

Les ouvrages à terre et en mer se situent essentiellement dans un bassin sédimentaire du Lias constitué des faciès suivants :

- Blue Lias : marnes calcaires intercalées avec des bancs fins de calcaires
- Lower Lias présentant un pôle plutôt argileux constitué d'argilites et de marnes d'assez mauvaise qualité mécanique et un pôle un peu plus carbonaté avec une succession de marnes et de marnes calcaires.

L'ensemble est localement surmonté de sédiments quaternaires d'épaisseur pluri-métrique.

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

2) Présentation des ouvrages de prise et de rejet d'eau du projet Hinkley Point C

Caractéristiques :

Les tunnels de prise ont un diamètre fini de 6 m et celui de rejet de 7 m. La couverture moyenne est de l'ordre de 30 m. Le creusement a mobilisé 3 tunneliers à pression de terre (fourniture Herrenknecht) lancés depuis les futures fosses d'alimentation des stations de pompage à terre.

L'ensemble représente environ 500 000 m³ de matériaux excavés et 38 000 voussoirs en béton armé.

Les délais de creusement ont été les suivants :

- Tunnelier de prise d'eau n°1 : Lancement en septembre 2019 pour un creusement terminé en décembre 2020 (Moyenne de 14 ml par jour),
- Tunnelier de prise d'eau n° 2 : Lancement pleine vitesse en juin 2021 pour un creusement terminé en octobre 2021 (Moyenne de 18 ml par jour soit presque 30% plus vite que les autres tunneliers),
- Tunnelier de rejet : Lancement pleine vitesse en mars 2021 pour un creusement terminé en juillet 2021.



Tunnels avant finition

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

3) Spécificités des tunnels hydrauliques pour les centrales nucléaires

Classement de sûreté :

Du fait de leur possible contribution à la fonction du refroidissement de l'installation nucléaire dans toutes les situations de fonctionnement, la plupart des ouvrages sont considérés comme des structures classées au sens de la sûreté nucléaire.

Ce classement entraîne un ensemble d'exigences relatives tant à la conception, qu'au contrôle en phase de réalisation ou à la maintenance pendant la durée de vie de l'installation (AFCEN 2010).

Au titre de la sûreté, le dimensionnement structurel des ouvrages intègre de nombreux chargements accidentels.
=> Nombreuses combinaisons de calculs.

Robustesse des solutions

La recherche continue de robustesse passe aussi par le recours à des concepts largement éprouvés par le monde industriel. Ainsi, la conception des ouvrages, qui ne fait pas appel à des méthodes ou technologies récentes ou tout au moins à retour d'expérience limité (telle que le béton fibré pour des structures définitives), peut apparaître comme très classique et assez peu innovante.

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

3) Spécificités des tunnels hydrauliques pour les centrales nucléaires

Pertes de charges :

La perte de charge globale des circuits est un des éléments fondamentaux de la conception de la source froide.

En plus de son aspect fonctionnel évident, les pertes de charge sont en effet contractualisées très tôt à l'interface entre les contrats de génie civil et ceux de fourniture des matériels de pompage.

La limitation des pertes de charge permet de garantir la performance hydraulique de l'installation lors de l'exploitation qui a un impact direct sur la rentabilité.

La maîtrise des pertes de charge en phase réalisation était donc un requis fonctionnel important de l'opération.

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

3) Spécificités des tunnels hydrauliques pour les centrales nucléaires

Pertes de charges :

Les circuits de prise et de rejet sont essentiellement constitués de tunnels revêtus de voussoirs préfabriqués en béton armé.

La rugosité de ce type d'ouvrage est difficile à appréhender. Par exemple, les spécificités des faces internes ou les effets des jonctions entre voussoirs ne sont pas couverts par la littérature.

Dans le cas concret d'Hinkley point C, les faces internes des voussoirs présentent de nombreuses réservations (boulonnage, manutention) dont la participation à la rugosité était méconnue.

L'impact des décalages entre voussoirs (stepping) s'avère difficile à prendre en compte au stade de la conception.



Exemple de décalage entre voussoirs lors de la pose

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

3) Spécificités des tunnels hydrauliques pour les centrales nucléaires

Pertes de charges :

Au vu des enjeux et de la difficulté de déterminer des valeurs fiables avec les relations usuelles, deux actions ont été réalisées :

- Élaboration d'un modèle numérique d'écoulement avec une géométrie exacte des anneaux de voussoirs (joints, stepping, empochements),
- Relevé et analyse statistique des décalages réels entre voussoirs à l'achèvement des tunnels.

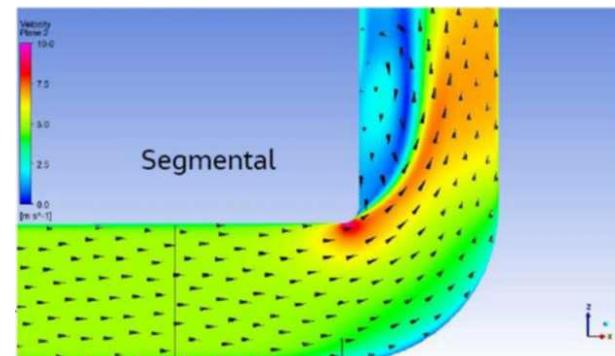
Des pertes de charge par mètres d'ouvrage pour différentes irrégularités géométriques ont été établies.

Associées à l'analyse statistique des relevés, il a été possible d'évaluer la perte de charge finale.

Pour maîtriser la rugosité, il a par ailleurs été décidé de reboucher les plus grosses réservations des voussoirs par du mortier.

L'optimisation de la perte de charge globale du circuit repose aussi sur un design adapté des points singuliers. Les coudes et branchements réalisés en conditions offshore sont souvent très brutaux du fait de la grande difficulté de réaliser de grands volumes d'excavations en méthode traditionnelle.

Des modélisations numériques d'écoulements mettent bien en évidence les contractions de veines fluides ou les survitesses dans les changements de direction.



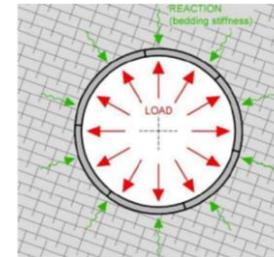
Modélisation CFD des écoulements dans les tunnels

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

3) Spécificités des tunnels hydrauliques pour les centrales nucléaires

Etanchéité des joints entre voussoirs à la pression interne :

Dans le cas d'un tunnel hydraulique dont la charge interne peut dépasser le niveau piézométrique extérieur, les joints longitudinaux vont être soumis à des efforts de traction qui se traduisent par une réduction de la compression pouvant aller jusqu'à un décollement.



Fonctionnement des anneaux en voussoirs sous pression interne

Pour le tunnel de rejet, la différence de pression entre intérieur et extérieur est au maximum de l'ordre de 8 m CE en fonctionnement et d'environ 20 m CE sur les transitoires.

L'évaluation de la déformation de l'anneau sous des combinaisons de chargement comportant la pression interne est donc nécessaire pour évaluer l'étanchéité résiduelle du joint.

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

4) Focus sur les puits verticaux en mer et leurs connexions

Les puits en mer verticaux et leurs connexions sont les ouvrages les plus pointus à réaliser techniquement et les plus risqués.

Le design des puits en mer, des connexions entre tunnels et les têtes de prise et de rejet a consisté à :

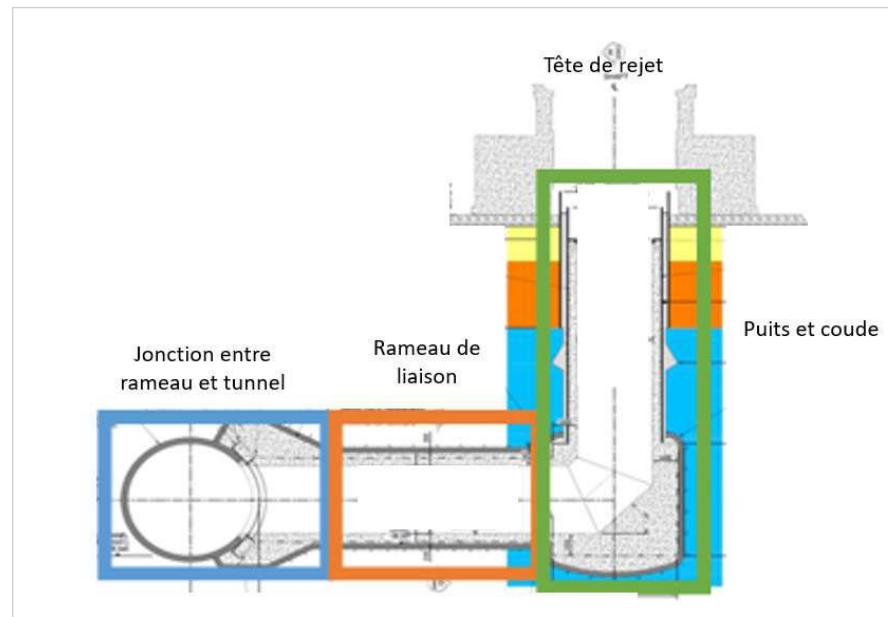
- Définir un profil hydraulique permettant de limiter les pertes de charges des circuits de prise et de rejet. Cette partie du design réalisée à partir de modèles CFD a abouti à la définition de la géométrie interne du circuit ;
- Etudier le comportement de la structure dans le sol pour un chargement statique et sismique ;
- Définir les requis structurels pour assurer la résistance de l'ouvrage (sections d'acier requises, dimensions des parties béton) ;
- De plus le phasage et les méthodes étant assez complexes, il a été nécessaire d'inclure le phasage de construction dans les calculs.

Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

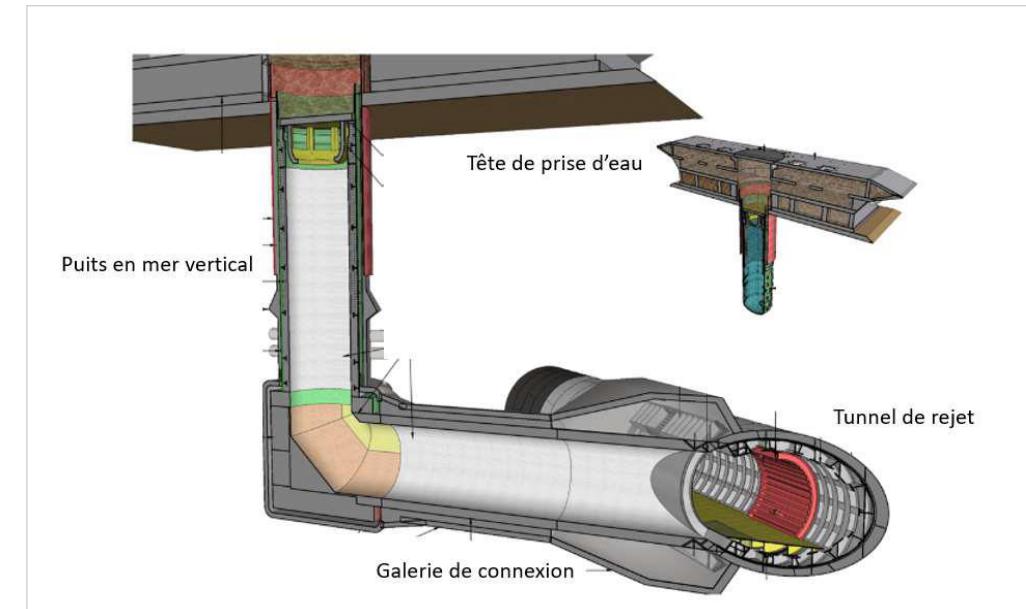
4) Focus sur les puits verticaux en mer et leurs connexions

L'ouvrage comporte trois parties bien distinctes :

- Le puits et le coude, encadré en vert ;
- Le rameau de liaison, encadré en orange ;
- La jonction entre le rameau et le tunnel, encadré en bleu.



Connexion en mer – détail des structures



Conception et réalisation du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire d'Hinkley Point C (UK)

5) Conclusion

Le système de refroidissement des deux réacteurs de type EPR en construction sur le site d'Hinkley Point C (Royaume-Uni) est une première pour EDF.

Les tunnels notamment de prise d'eau sont très longs et classés de sûreté. L'ensemble, têtes, puits en mer et tunnels nécessitent des méthodes de construction et des moyens maritimes pointus et impressionnants.

L'hydraulique de ces tunnels doit être bien appréhendée en amont car elle est la garantie d'un fonctionnement optimum des installations.

Le retour d'expérience est en cours sur les études et travaux de ces ouvrages hors normes. Celui-ci alimentera les futurs projets d'EPR ou d'EPR2 en France et à l'export qui nécessiteront certainement d'être réalisés avec des contextes géotechniques ou maritimes très différents.



Merci

Suivez moi sur LinkedIn pour des informations pertinentes sur l'énergie et le nucléaire :



Newsletter : Le nucléaire expliqué.

