



Génie Civil Nucléaire - 70 ans d'évolution

Des premières centrales aux réacteurs de 4ème génération

Martin Guichard – Romain Ragouin

2 décembre 2025

Conférence SFEN Provence - Campus Arts et Métiers d'Aix-en-Provence



PUBLIC



INTERNAL



RESTRICTED



CONFIDENTIAL

Engineering a carbon-neutral future





We are a global community of passionate experts engineering a carbon-neutral future

ENR
Engineering News-Record
INTERNATIONAL
DESIGN FIRMS
2024

POWER

#9



NUCLEAIRE

#5



EOLIEN

#9



HYDROELECTRICITE

#2



TRANSMISSION &

DISTRIBUTION

#16

COGENERATION

#9





Responsible Designer* du Parc nucléaire Belge

Forte présence historique en France

**Nouvelles constructions
Prolongation exploitation
Démantèlement
SMR**

**Défense
Nouveaux usages du nucléaire
(Médical, Spatial, Décarbonation de
l'industrie)**

*Le rôle de Responsible Designer signifie que la conception, le design et l'ingénierie de toute modification du parc nucléaire belge sont pris en charge et défendus par Tractebel devant l'Autorité de sûreté.



Le groupe ENGIE reste en tête de l'indice boursier français (CAC 40) en matière de représentation des femmes, selon le classement 2025 de *l'IMPORTANTE-ARBA* publié par *Les Échos*.

Cette première place témoigne de progrès concrets et mesurables : les femmes représentent désormais 32 % des cadres du Groupe fin 2024, contre 31 % en 2023 et 30 % en 2022. Objectif : 40 % de femmes cadres d'ici 2030, sur la base de 33 000 cadres dans le monde.

Les progrès de Tractebel

Nous sommes passés de 23,9 % de femmes à des postes de direction en janvier 2024 à **26,1 % en novembre 2025**.

Actions derrière les chiffres

Ces résultats sont notamment dus à des programmes de mentorat, au développement du leadership féminin, à des processus de recrutement plus inclusifs et à un accompagnement de carrière à tous les niveaux du Groupe.



Prêt.e
à réaliser
votre impact
positif ?

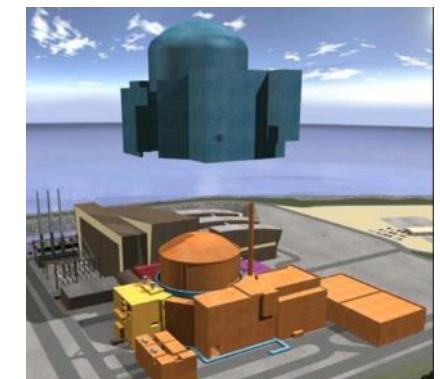
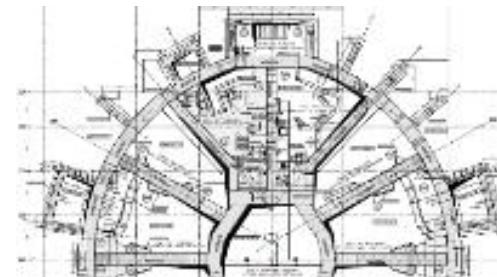
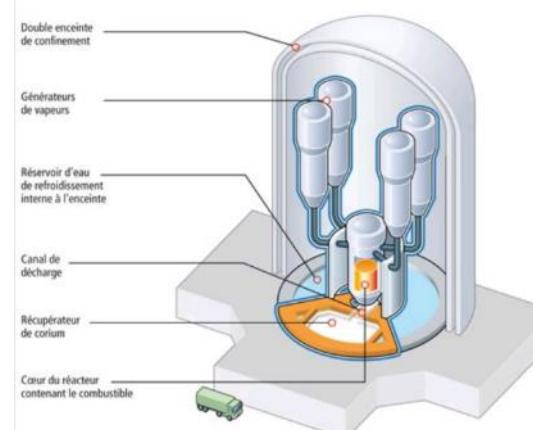
Concevoir un avenir neutre en carbone



SCANNE POUR
REJOINDRE
L'AVENTURE
TRACTEBEL !

Structures nucléaires ?

- Orientées “Process”
 - Aux géométries parfois complexes
 - Supportant des équipements spécifiques
 - Subissant des conditions d'exploitation particulières
- Fortement sollicitées
 - Opérations courantes
 - Agressions internes
 - Agressions externes
- Référentiels normatifs renforcés (sureté nucléaire)
 - Ex : Eurocodes + surcouches AFCEN (ETC-C, RCC-CW), Guide des INB CEA, etc.
 - Ex: ACI 318 -> ACI 349
 - ISO 19443



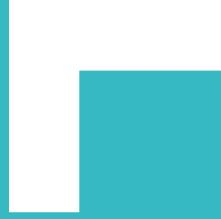
Sommaire

1 Historique de Tractebel (5')

2 Conception (15')

3 Construction / Exécution / Schémas industriels (15')

4 Perspectives d'évolutions (15')



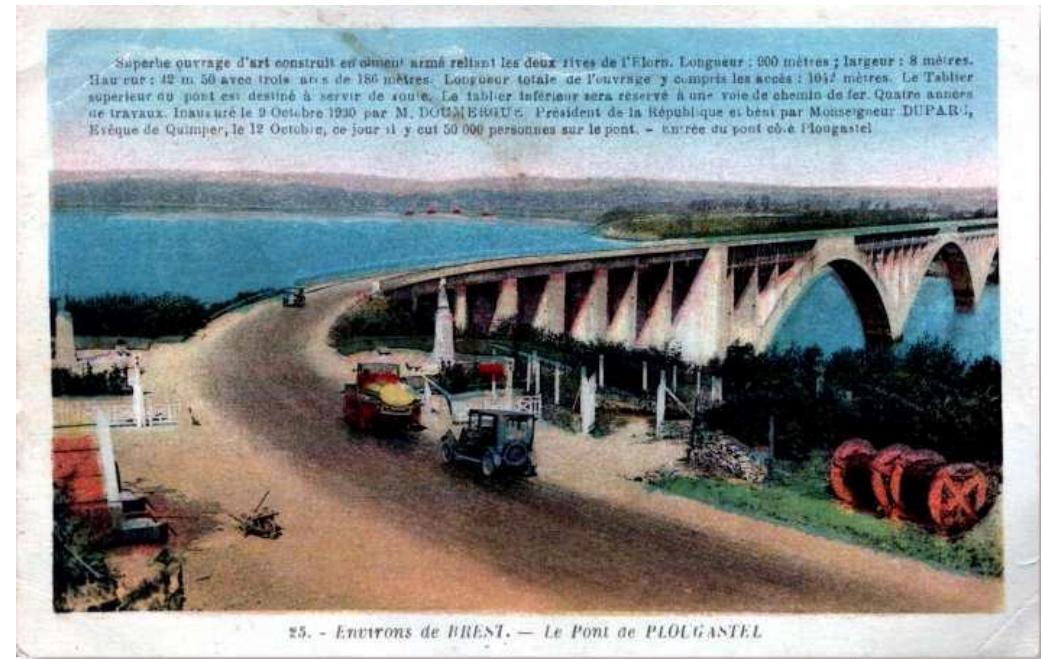
1. Historique de Tractebel



Aux origines de la précontrainte

C'est au cours de la construction du pont de Plougastel (Albert-Louppe) à Brest inauguré en 1930 qu'Eugène Freyssinet :

- a mis au point le principe de la précontrainte (premier brevet octobre 28)
- a étudié les déformations différées du béton.



Aux origines de la précontrainte

André Coyne participa (de 1920 à 1928) avec Eugène Freyssinet à l'élaboration du pont de Plougastel et imagina ensuite une déclinaison de la précontrainte à des ouvrages massifs tels que les barrages.



BREST. — Pont de Plougastel

1947 : Au début de Coyne et Bellier

TRACTEBEL
engie

Murs à échelle - Anchored walls

Barrage du Laurenti (France). Achevé en 1943. Contrairement aux apparences, ce barrage est un barrage en remblai, dont le masque amont est formé par un « mur à échelle », procédé imaginé par A. Coyne en 1927 à Brest (mur de quai). Premier barrage au monde de ce type.

Laurenti dam (France). Completed in 1943. Contrary to appearances, this is an embankment dam, the upstream face of which is formed by a «mur à échelle», a process invented by A. Coyne in 1927 in Brest (dock walls). First dam of this kind in the world.

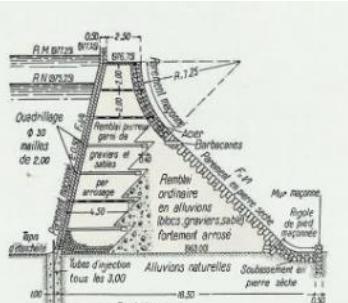
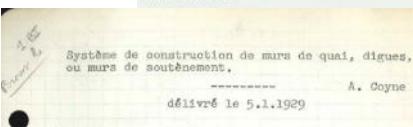
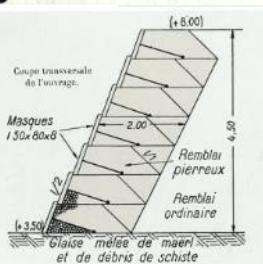


FIG. 20. — Coupe transversale du barrage du Laurent.



delivré le 5.1.1921



Mar de soutènement du terre-plein de la jetée Est à Brest (1928). Coupe transversale.

Précontrainte de grande puissance - *Large prestressing cable*

Dès 1929, A. Coyne imagine d'utiliser la précontrainte de grande puissance pour la construction «d'ouvrages en maçonnerie, béton ou autres», et en particulier celle des barrages. De son vivant et par la suite, des dizaines d'ouvrages ont été ainsi, de par le monde, construits, surélevés ou consolidés.

As of 1929, A. Coyne imagined the use of large prestressing cables for the construction of «masonry, concrete or other works,» especially for dams. During his lifetime and thereafter, dozens of works were built, raised or consolidated in this way throughout the world.

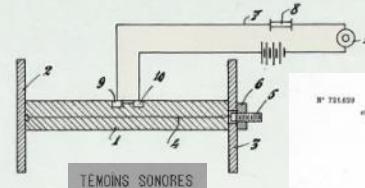


Brevet TIRANTS (A. Coyne)

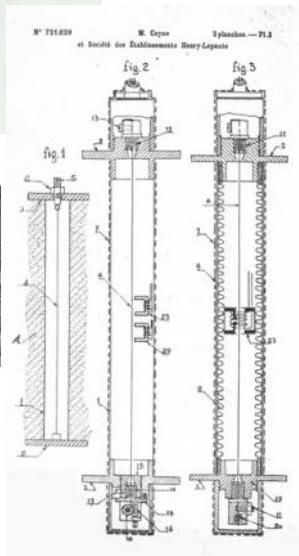
Perfectionnements apportés aux ouvrages de travaux publics, notamment à ceux tels que barrages, comportant des massifs en matériaux de construction

déposé le 14 avril 1930

TEMOINS SONORES



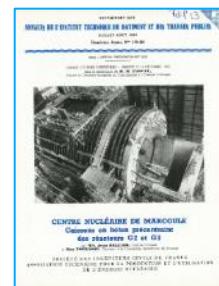
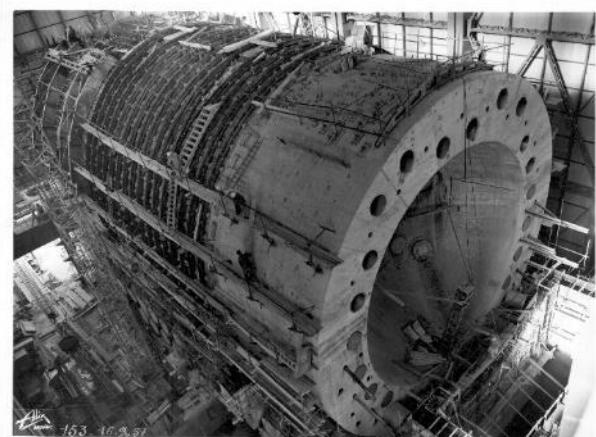
TEMOINS SONORES
(*Système A. Coyne*)



Début dans le Nucléaire

Centrales nucléaires de 1^{ère} génération (1/2)

Marcoule – Caissons G2 & G3 (1954-1960)
Application de la précontrainte



Nouvelle enveloppe en béton précontraint pour pile atomique sous pression.

A. Coyne - J. Bellier - CEA

demandé le 26.9.1958

23 BI

Caisson en béton précontraint.

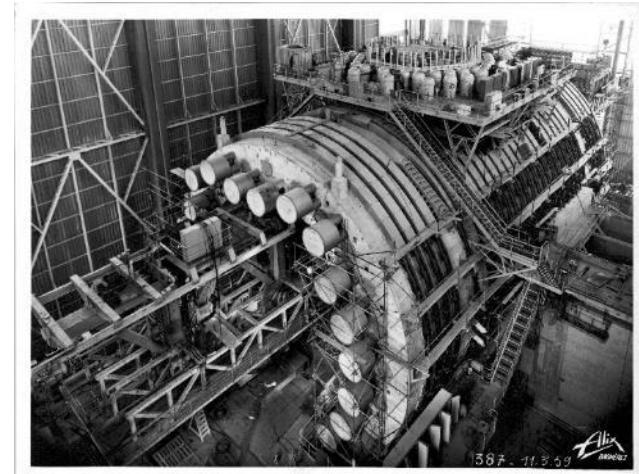
A. Coyne - J. Bellier et CEA



Début dans le Nucléaire

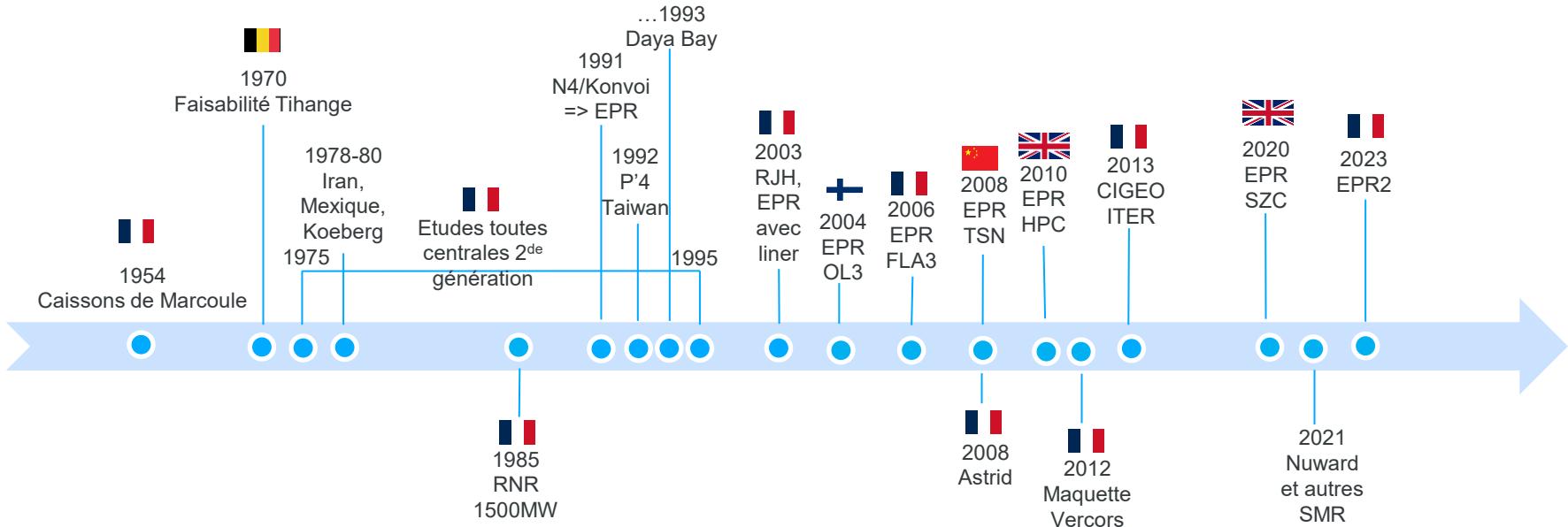
Centrales nucléaires de 1^{ère} génération (2/2)

- La première étude date de 1954 « **concours pour la conception d'un caisson précontraint** » qui débouche sur les études et la réalisation des caissons G2 et G3 de Marcoule (centrale de 250 MW - graphite-gaz), **ancêtre des centrales UNNG de Chinon - St-Laurent – Bugey**.
- Caisson de 14m de diamètre.
- 20m de long résistant et étanche à 30 bars.
- Exécution en 1957 – 1958.
- Interprétation de l'auscultation.



11/03/1959 - ©Alix-Bagnères

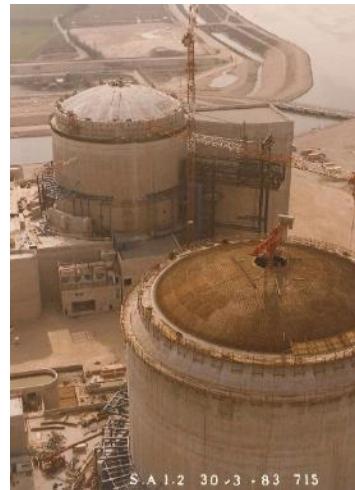
Historique Tractebel



Historique Tractebel 2^{ème} génération



Tricastin



Saint-Alban



Cattenom



Civaux

Historique Tractebel 3^{ème} génération



Olkiluoto (Finlande)



Flamanville (France)

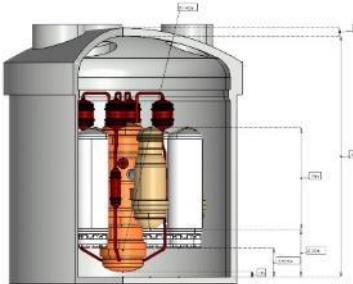


Taishan (Chine)

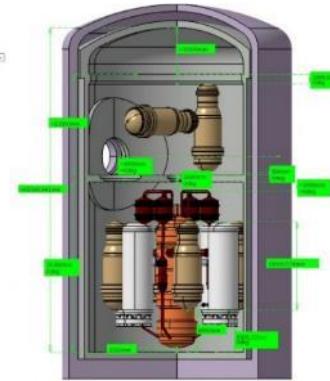


Hinkley Point C (UK)

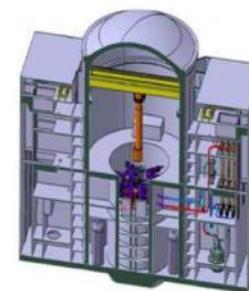
Historique Tractebel 4ème génération



Réacteur GFR
(pour CEA)



Réacteur GTMHR et
PBMR (pour Framatome)



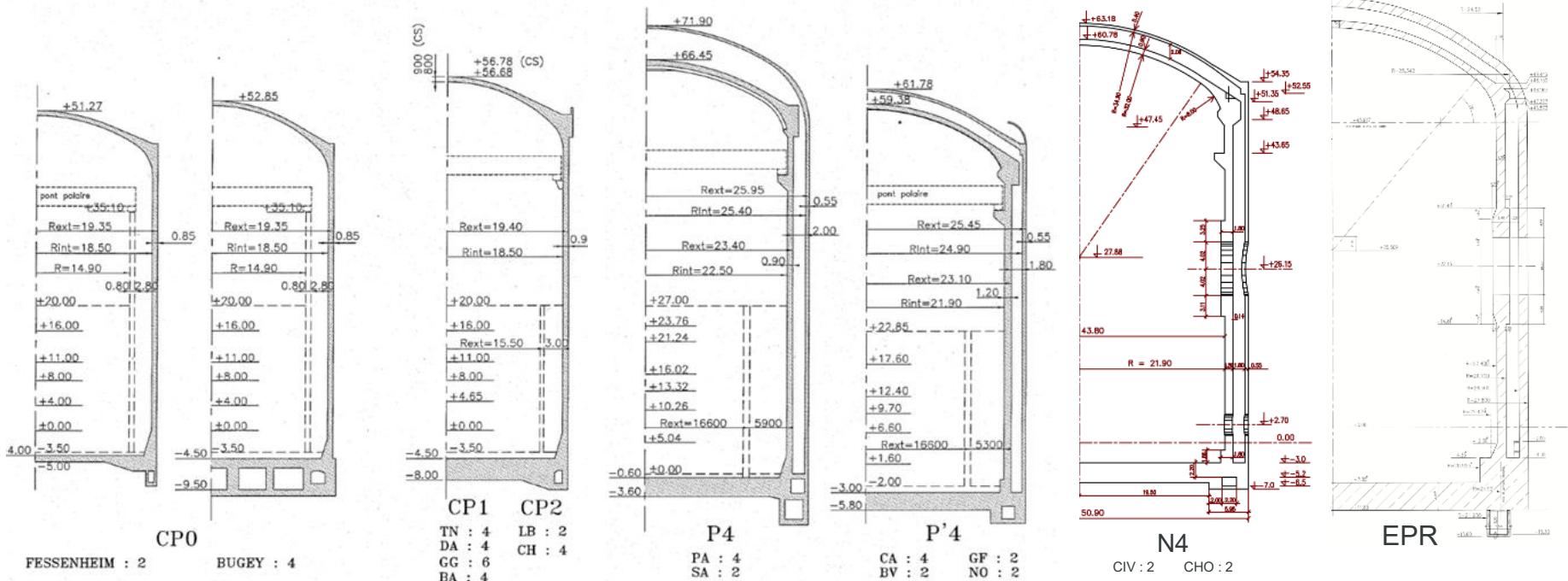
Réacteur SFR (pour
Areva)



Projet Astrid

Historique Tractebel

Dimensionnement des enceintes de confinement du palier CP1 jusqu'aux EPR



2. Conception

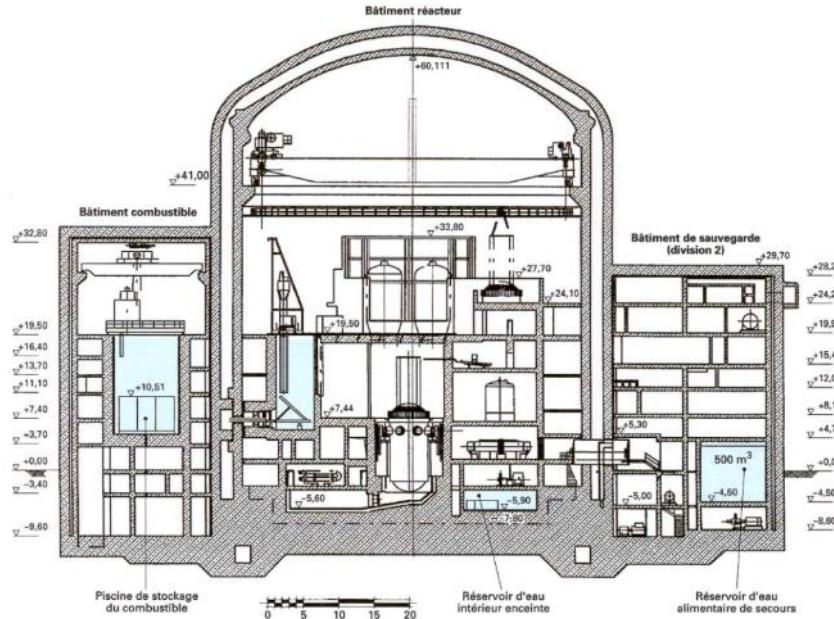
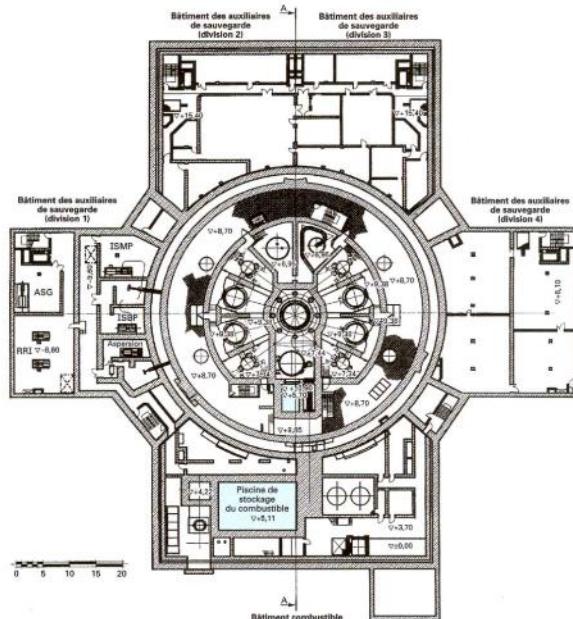
Evolution de l'implantation générale

| Puissance du REP | 900 MW | | | 1 300 MW | | 1 400 MW | | |
|-----------------------|--------|-------------------|-------|----------|-------------------|----------|-----|----|
| | Type | Fessenheim | Bugey | CP1 | CP2 | P4 | P'4 | N4 |
| Implantation générale | | Tranches jumelées | | | Tranches séparées | | | |
| | | | | | | | | |

Extrait Techniques de
l'ingénieur - Réacteurs à eau
sous pression - Régis
DURAND-SMET

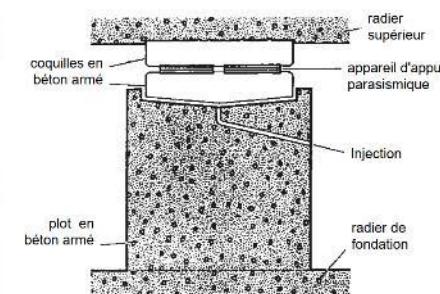
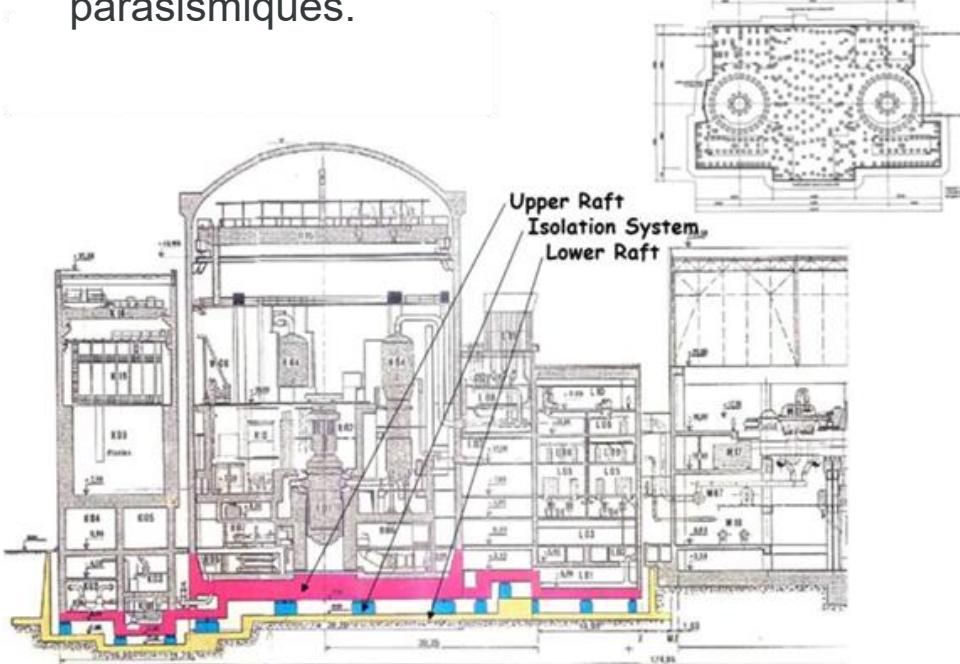
Evolution de l'implantation générale

Evolutions EPR :



Site de Cruas

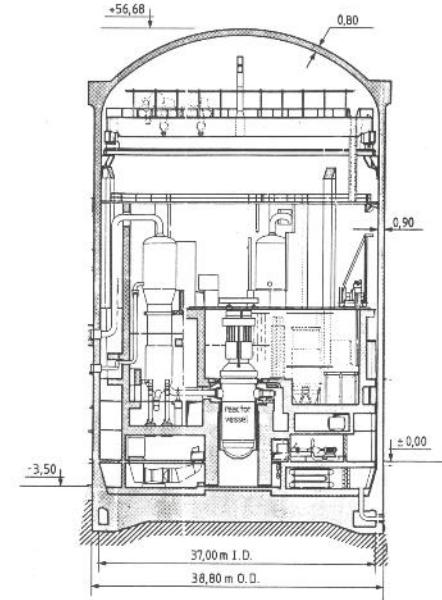
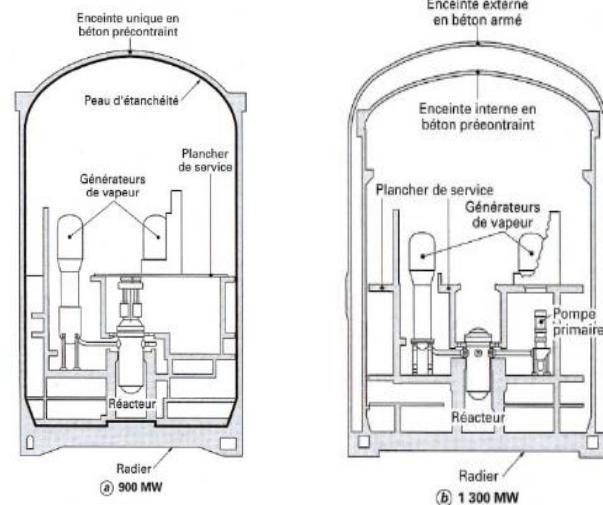
Les bâtiments de l'îlot nucléaire de chaque paire de tranches sont fondés sur un radier commun, nommé "radier supérieur" (ou radier général), reposant sur des appuis parasismiques.

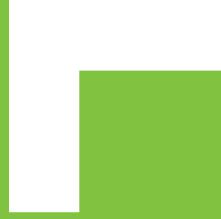


Focus Bâtiment Réacteur

Le Bâtiment Réacteur comprend :

- Une enceinte de confinement qui, pour tous les réacteurs à eau pressurisée actuellement en service en France, consiste à minima en une structure cylindrique en béton précontraint reposant sur un radier en béton épais, surmontée d'un dôme toro-sphérique (3 types d'enceinte au sein du parc nucléaire en France)
- Des Structures internes





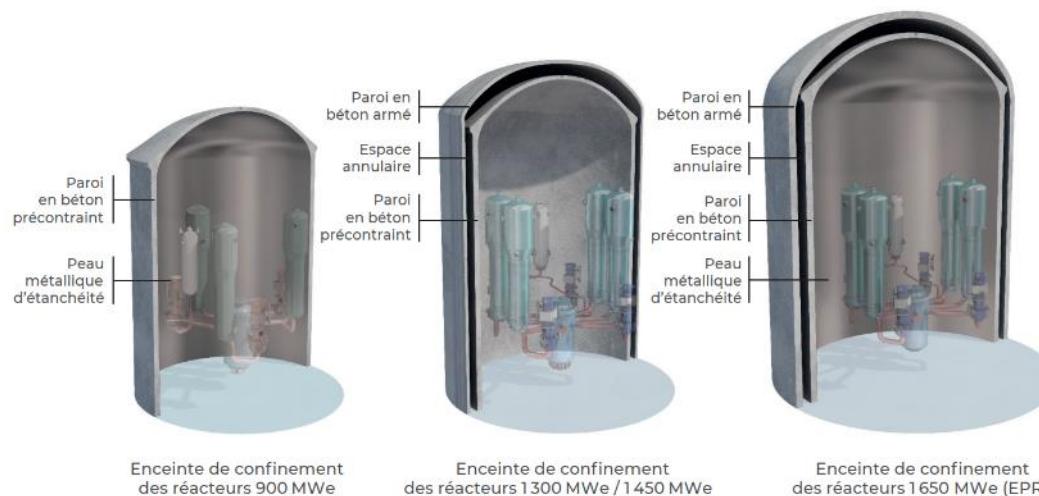
Enceinte de confinement



Enceintes de confinement

Les enceintes de confinement sont de 3 types en France :

- ➔ Type 1 – Enceinte simple avec peau métallique
- ➔ Type 2 – Enceinte double sans peau métallique
- ➔ Type 3 – Enceinte double avec peau métallique



Extrait Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2019

Enceintes de confinement

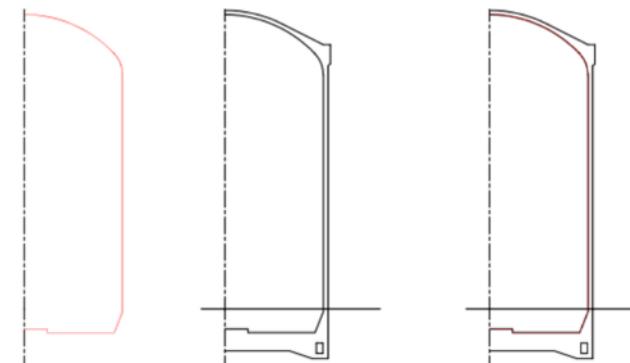
□ Type 1 – Enceinte simple avec peau métallique

Dans ce cas, la face intérieure de l'enceinte de confinement précontrainte est entièrement recouverte par un liner métallique en acier ; la paroi en béton précontraint assure la résistance aux pressions internes en cas d'accident, tandis que le liner assure l'étanchéité de la structure à l'air (ou au mélange air et vapeur).

L'enceinte de confinement en béton précontraint joue simultanément le rôle d'une structure de protection contre les agressions extérieures, principalement les crashes d'avion.

Sur le parc français, le type 1 est représenté par :

- ✓ Palier CP0
- ✓ Paliers CP1 et CP2
- ✓ Palier EPR2



Enceintes de confinement

□ Type 1 – Enceinte simple avec peau métallique

Palier 900MW – CP1 / CP2



EPR 2 Penly



Enceintes de confinement

□ Type 2 – Enceinte double sans peau métallique

L'enceinte interne en béton précontraint assure la résistance aux pressions internes en cas d'accident et une étanchéité contrôlée à l'air (ou au mélange air et vapeur).

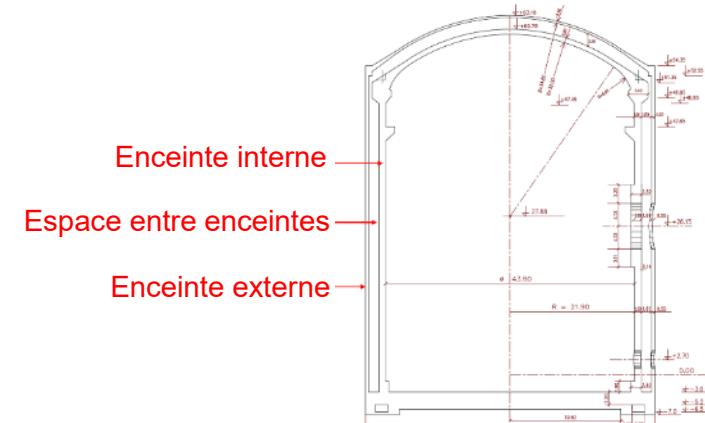
Les fuites résiduelles à travers la paroi de l'enceinte interne de confinement sont collectées dans l'espace interne entre enceintes.

De plus, l'enceinte externe en béton armé joue le rôle de structure de protection contre les agressions externes, principalement les crashes d'avion.

Sur le parc français, le type 2 est représenté par :

- ✓ Palier P4
 - ✓ Palier P'4
 - ✓ Palier N4

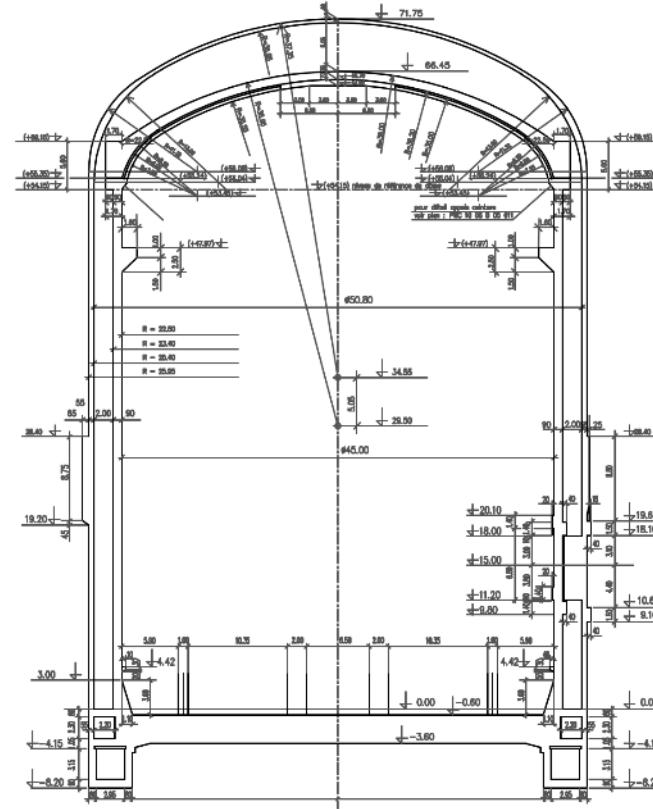
Les enceintes de type 2 n'existent qu'en France.



Enceintes de confinement

Type 2 – Enceinte double sans peau métallique

Palier P4



Enceintes de confinement

□ Type 3 – Enceinte double avec peau métallique

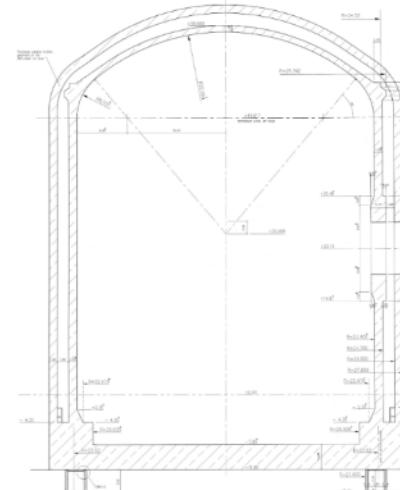
L'enceinte interne en béton précontraint, équipé d'un liner métallique sur sa face intérieure, garantit à la fois la résistance et l'étanchéité en cas d'accident, tandis que l'enceinte externe protège contre les agressions externes provenant notamment d'avions commerciaux et d'avions militaires.

Dans les types 1 et 2 (avant EPR2), seuls les impacts provenant de l'aviation civile devaient être pris en compte.

Sur le parc français, le type 3 est représenté par :

- ✓ EPR Flamanville 3

Ailleurs dans le monde, EPR Olkiluoto 3 (1 unité), Taishan (2 unités), Hinkley-Point C (2 unités), Sizewell C (2 unités).

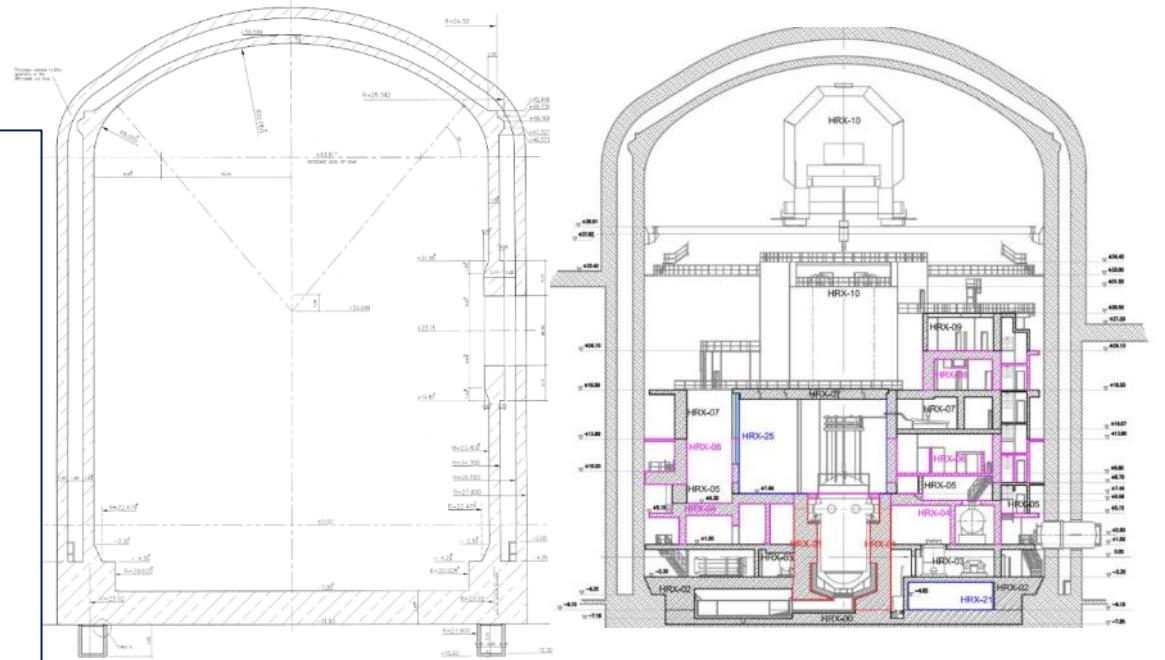


Enceintes de confinement

Type 3 – Enceinte double avec peau métallique

EPR Flamanville 3

TRACTEBEL
engie



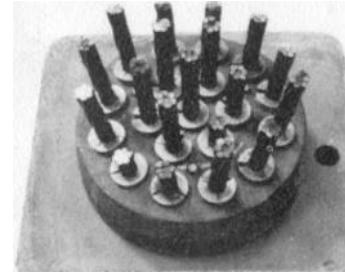
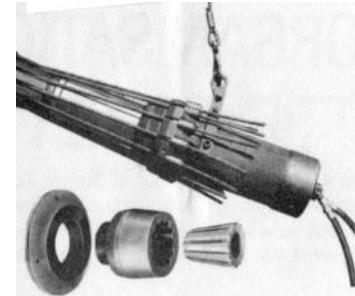
Evolution des enceintes de confinement de CP0 à EPR2

| | CP0 – 900 MWe | | CPY - 900 MWe | | 1300 MWe | 1300 MWe | 1450 MWe | 1650 MWe | 1650 MWe |
|------------------|--|-----------|---------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Fessenheim | Bugey | CP1/2 | Cruas | P4 | P'4 | N4 | EPR | EPR2 |
| Géométrie | Epaisseur partie cylindrique (interne) | | | | | | | | |
| | | (externe) | | | | | | | |
| | Epaisseur dôme (interne) | | | | | | | | |
| | | (externe) | | | | | | | |
| | Diamètre intérieur cylindre (interne) | | | | | | | | |
| | | (externe) | | | | | | | |
| | Volume intérieur libre (m ³) | | | | | | | | |
| | Pression dimensionnement (MPa,rel.) | | | | | | | | |
| Précontrainte | Type câble | | | | | | | | |
| | Classe | | | | | | | | |
| | Limite de rupture garantie (MPa) | | | | | | | | |
| | Nombre de nervures | | | | | | | | |
| | Layout horizontal | | | | | | | | |
| | Layout dôme | | | | | | | | |
| Nombre de câbles | Tonnage précontrainte (t) | | | | | | | | |
| | Horizontaux | | | | | | | | |
| | Verticaux purs | | | | | | | | |
| | Gamma | | | | | | | | |
| | Dôme purs | | | | | | | | |
| Liner métallique | Epaisseur (mm) | | | | | | | | |
| | $f_{y,max}$ (MPa) | | | | | | | | |

TRACTEBEL
engie

Evolution de la précontrainte

- Brevet initial du dispositif d'ancrage par cône Freyssinet datant d'octobre 1939 pour 12 fils de 5 mm avec des cônes en béton
- Câbles Freyssinet (1970) 12T15 (système V)
- Câbles Freyssinet (1980) 19 T 15 ou 37 T 15 (système K)
- Câbles Freyssinet (> 2000) 55T 15 (système C)



Evolution de la précontrainte

Evolution des types de câbles

Mise en tension des
câbles verticaux
37 T15



Mise en tension des
câbles horizontaux
54/55 T15



Evolution de la précontrainte

Définition du câblage de précontrainte

- Section des câbles
- Position des câbles (cylinder et dôme)
- Nombre et position des nervures (pour limiter les pertes par frottement)
- Prise en compte des singularités et des ouvertures



Description de la précontrainte du palier CP0 au palier P'4

| CP0 – 900 MWe | | 900 MWe | | 1300 MWe | 1300 MWe |
|---------------|-------|---------|-------|----------|----------|
| Fessenheim | Bugey | CP1/2 | Cruas | P4 | P'4 |
| | | | | | |

Nombre de nervures

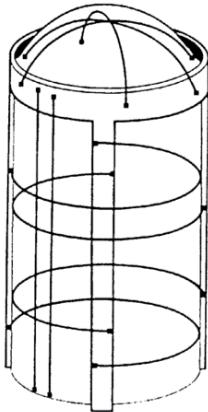
Layout horizontal

Layout dôme

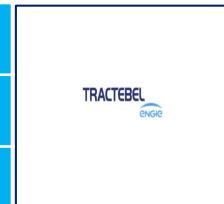
TRACTEBEL
ENGIE

Evolution de la précontrainte

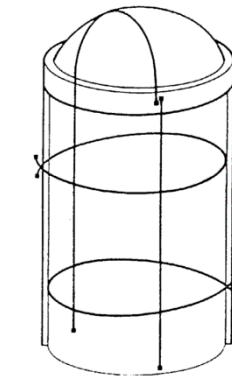
Paliers CP0 / CP1 / CP2



| | |
|---------------------------|--|
| Nombre de nervures | |
| Câbles horizontaux | |
| Câbles dôme | |



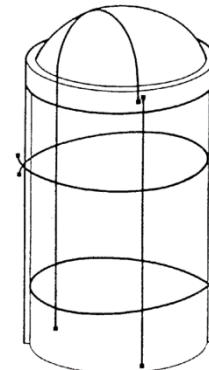
Paliers P'4 et N4



| | |
|---------------------------|--|
| Nombre de nervures | |
| Câbles horizontaux | |
| Câbles dôme | |



Palier P4

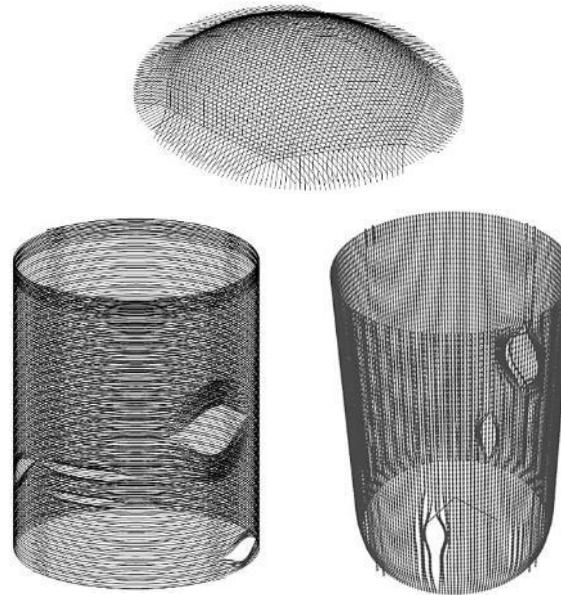


| | |
|---------------------------|--|
| Nombre de nervures | |
| Câbles horizontaux | |
| Câbles dôme | |

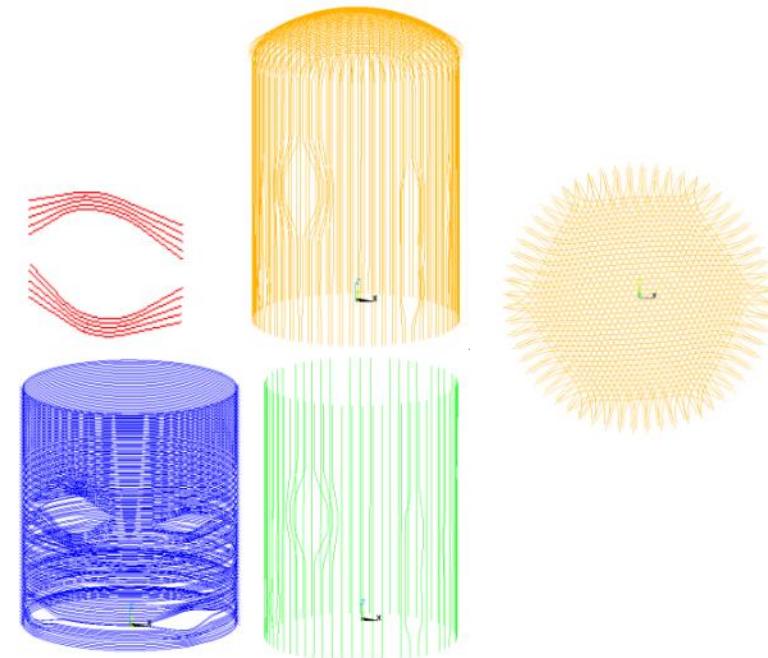


2. Evolution de la précontrainte

Palier CPY

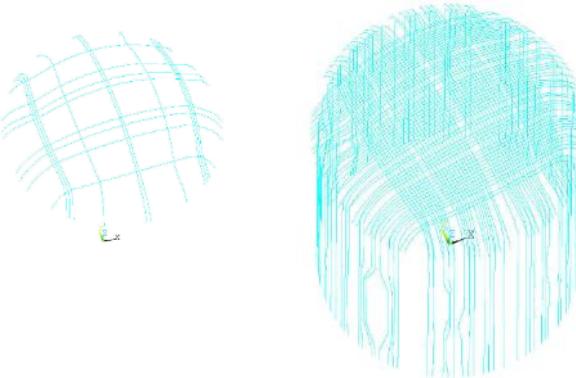


Palier P4

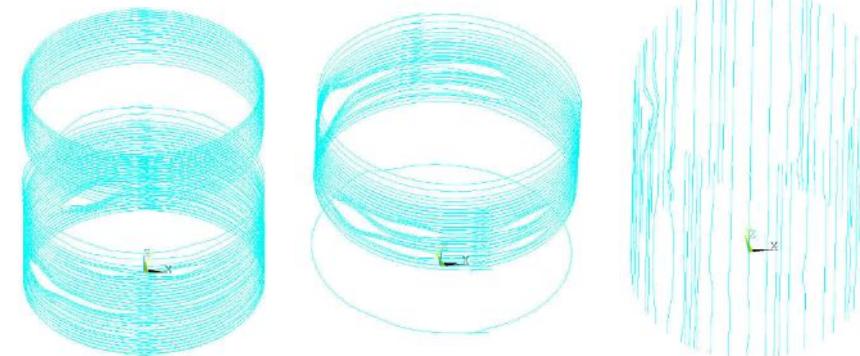
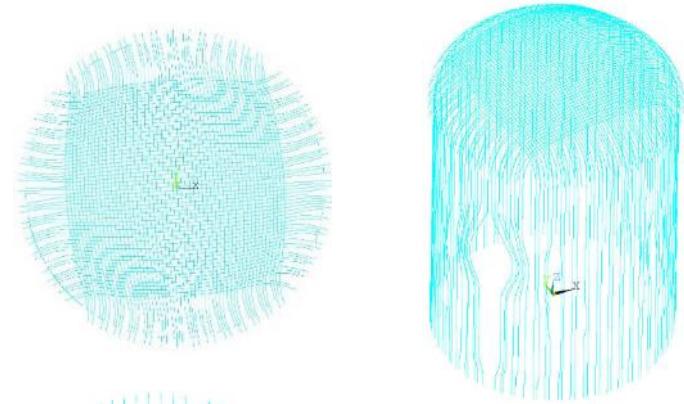


2. Evolution de la précontrainte

Palier P'4 (2 types de câbles horizontaux)

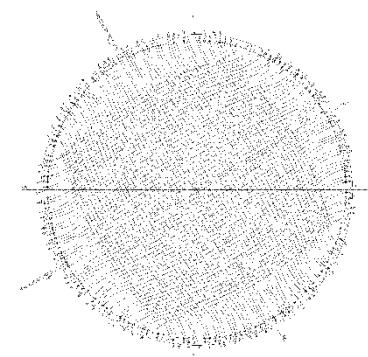
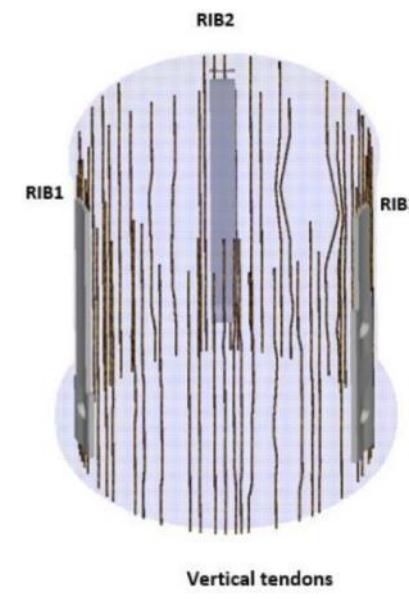
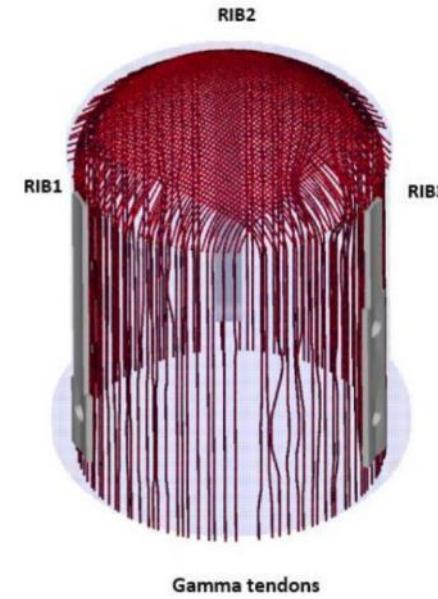
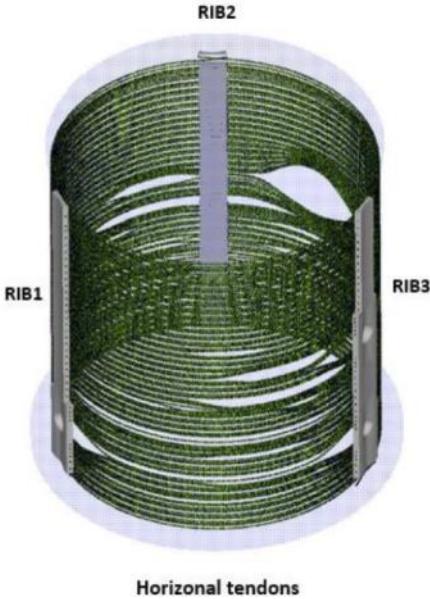


Palier N4



2. Conceptual design

EPR – Vues du câblage



Dans le dôme, 2
nappes à 90°

Evolution du design

Evolution des règles de dimensionnement

✓ CP0/CP1/CP2

- -
 -
 -
- TRACTEBEL
engie

✓ P4/P'4/N4

- -
- TRACTEBEL
engie

✓ EPR

- -
 -
 -
- TRACTEBEL
engie

Evolution du design

| | CP0 | CP1 | | 1300 MWe | 1300 MWe | 1450 MWe | 1650 MWe | |
|---|------------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|-----|
| | Fessenheim | Bugey | CP1/2 | Cruas | P4 | P'4 | N4 | EPR |
| Température accidentelle de design (°C) | | | | | | | | |
| Pression de design (MPa rel.) | | | | | | | | |
| Impact avion | | | | | | | | |
| Règles dimensionnement enceinte | | | | | | | | |
| Classe béton (bars ou MPa) | | | | | | | | |
| Nuance acier (MPa) | | | | | | | | |

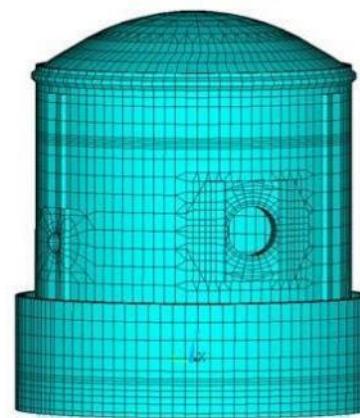


(*) l'application de l'ETC-C 2006 est spécifique à l'EPR FA3 ; pour l'EPR OL3 , un code de conception spécifique avait été préparé par AREVA, nommé PS 4041/FIN 005 Prestressed Containment with Steel Liner (Enceinte de confinement précontrainte avec revêtement en acier) ; l'ETC-C rév. 2010 a été adopté pour d'autres projets EPR en cours tels que l'EPR HPC (avec un guide complémentaire britannique). Pour EPR2, le code utilisé est RCC-CW 2018.

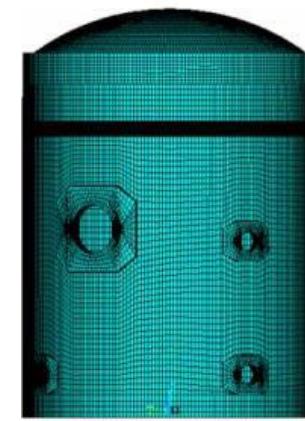
Evolution des modèles EF



Palier P4



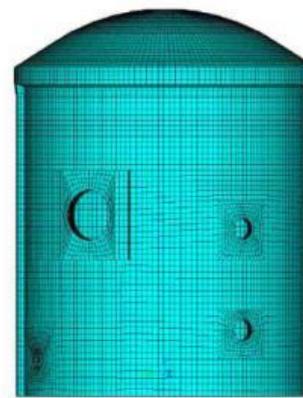
EPR OL3



Modèle P4

210 457 nœuds

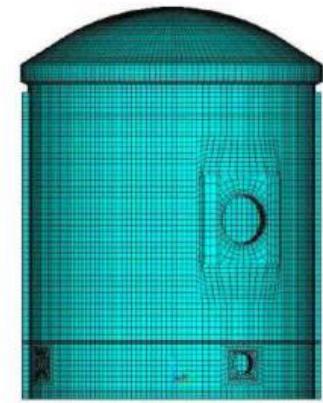
185 881 éléments



Modèle P'4

233 045 nœuds

213 457 éléments



Modèle N4

158 449 nœuds

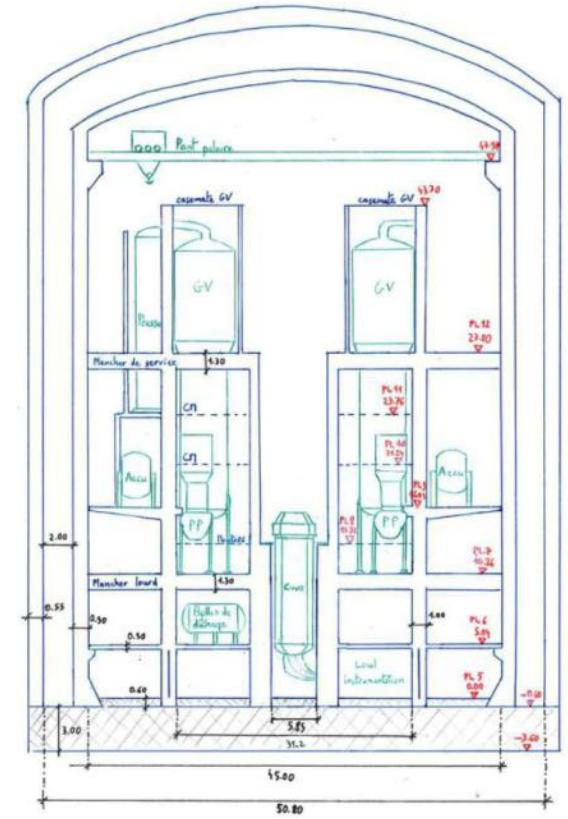
142 808 éléments

Structures Internes

Structures Internes

Les Structures Internes du BR, ouvrage réalisé en béton armé, comprennent :

- Une dalle support en béton
 - Un cylindre de béton s'étendant du fond du bâtiment jusqu'à la sous-face du plancher de service appelé jupe des SI.
 - Un cylindre béton s'étendant du fond du bâtiment jusqu'au fond de la piscine et constituant le puits de cuve, réceptacle de la cuve du réacteur,
 - Un plancher de service,
 - Une piscine permettant la manipulation sous eau du contenu de la cuve du réacteur,
 - Les casemates séparant les gros composants du circuit primaire:
 - Des planchers métalliques

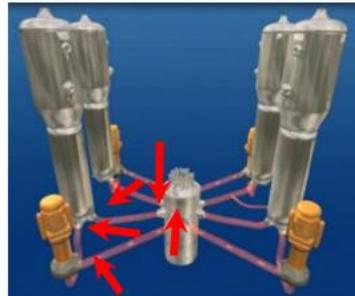


Structures Internes

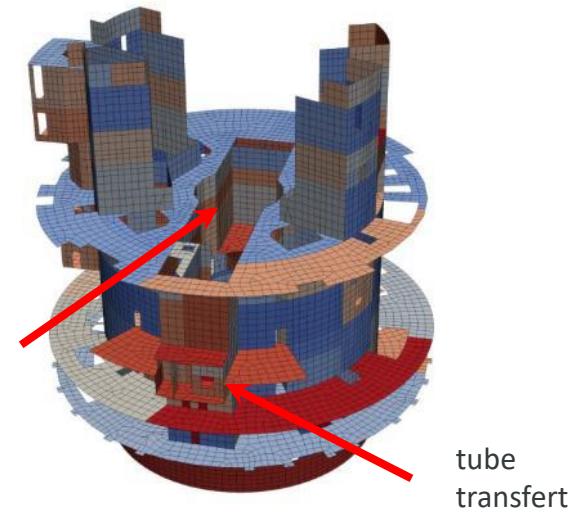
Fonctions de base des Structures Internes des paliers nucléaires français :

- 1) Supportage et stabilité de tous les éléments du process nucléaire
- 2) Manutention des éléments du process nucléaire
- 3) Premier confinement des situations d'accident
- 4) Opérations de chargement et déchargement du réacteur

Ruptures en différents points
d'une boucle primaire

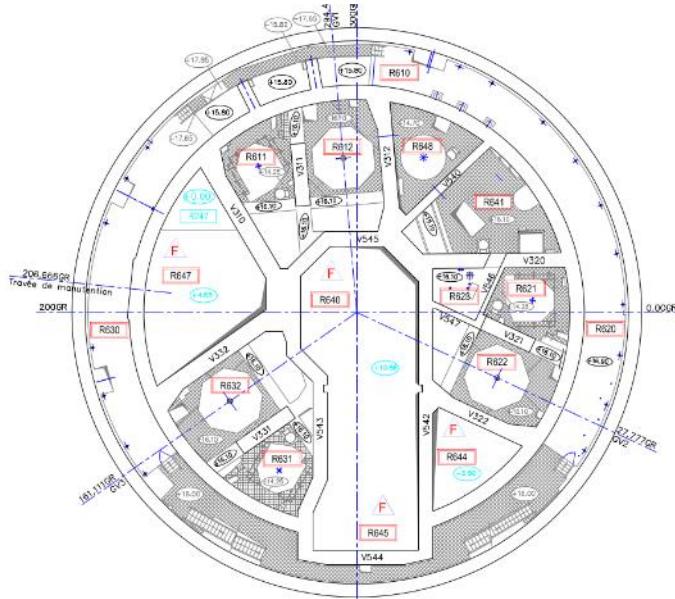


Piscine
au niveau du
plancher de
service
(ex : P4)

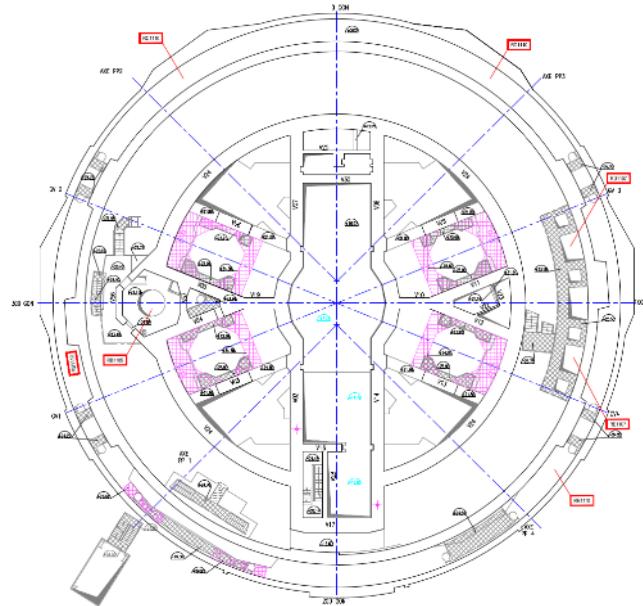


Structures Internes

Passage de 3 à 4 boucles



Palier CPY



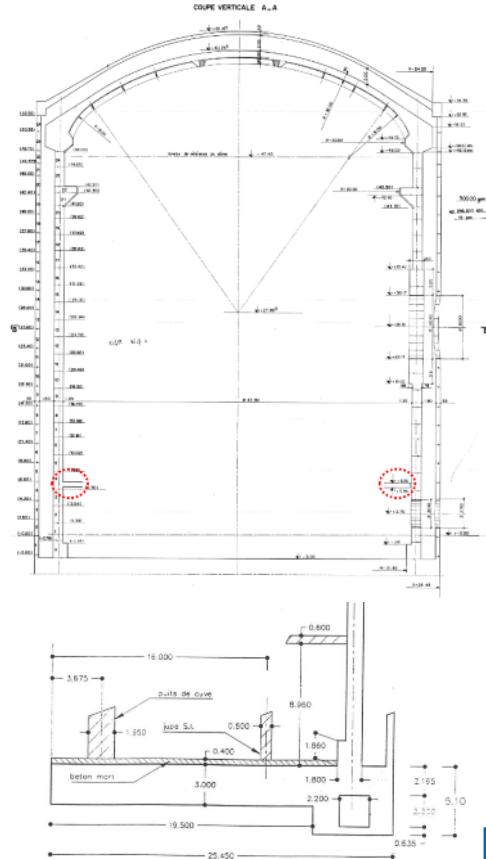
Palier P4

Structures Internes

Pour tous les paliers nucléaires français, de CP0 à EPR, les Structures Internes sont intégralement contenues dans l'Enceinte Interne du Bâtiment Réacteur (BR) et indépendantes de celle-ci à l'exception du palier N4 ; leurs seules connexions directes notables avec les bâtiments voisins de l'ilot nucléaire sont :

- ✓ le tube de transfert qui relie la piscine des SI à la piscine de stockage du BK
- ✓ les tuyauteries du circuit secondaire qui, après être sorties de l'extrémité supérieure des GV_s traversent la paroi des enceintes interne et externe.

Pour le palier N4, une liaison des SI à l'enceinte interne (EI) existe au niveau du plancher à +6,60 m, souple en direction z, rigide en direction horizontale.



Evolution de la conception des SI

Sont identifiées dans le tableau suivant les options principales de conception des SI des paliers nucléaires français de CP0, CP1/2, P4, P'4 et N4.

| Palier | Masse des SI (tonnes) ⁵⁾ | Dalle inférieure des SI | Puits de cuve | Jupe des SI | Principe de liaisons des SI au BR | Reprise efforts sismiques |
|---------|-------------------------------------|-------------------------|---------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------|
| CP0 | | | | | | |
| CP1/CP2 | | | | | | |
| P4 | | | | | | |
| P'4 | | | | | | |
| N4 | | | | | | |

⁵⁾ joint ouvert périphérique (base gousset enceinte)

Evolution du design

- Le passage d'un dimensionnement en contraintes admissibles à celui d'un dimensionnement aux ELU et ELS

| | dimensionnement | | |
|---------|----------------------------|----------------|----------------|
| | En contraintes admissibles | Aux ELU et ELS | Nature du code |
| CP0 | | | |
| CP1/CP2 | | | |
| P4 | | | |
| P'4 | | | |
| N4 | | | |
| EPR | | | |

TRACTEBEL
ENGIE

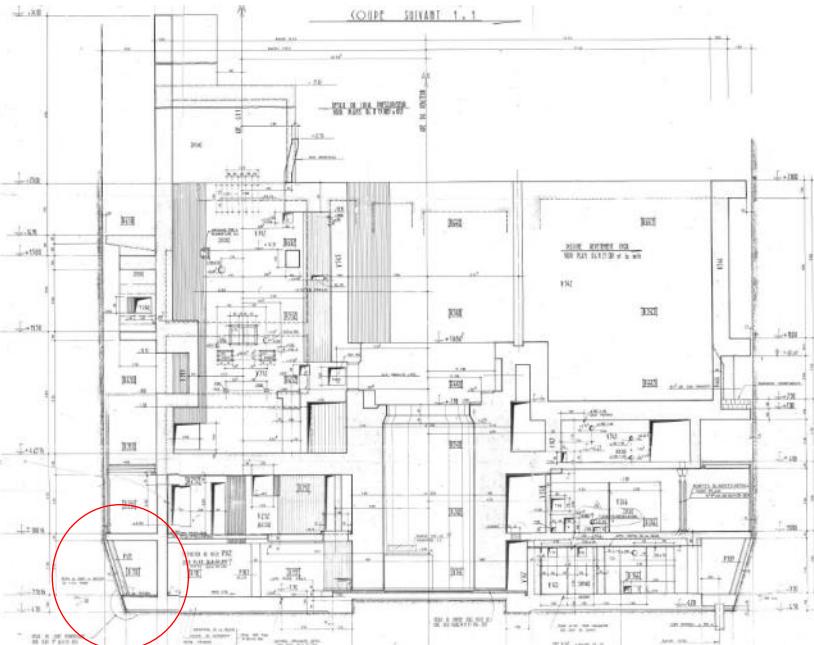
- Un dimensionnement détaillé fondé sur :
 - l'emploi de modèles EF 3D des SI distincts soumis à des déplacements imposés à leurs interfaces avec le BR jusqu'au palier N4,
 - l'emploi de modèles EF 3D des SI inclus dans un modèle d'ensemble des structures de l'ilot nucléaire pour le palier EPR.

Evolution du design

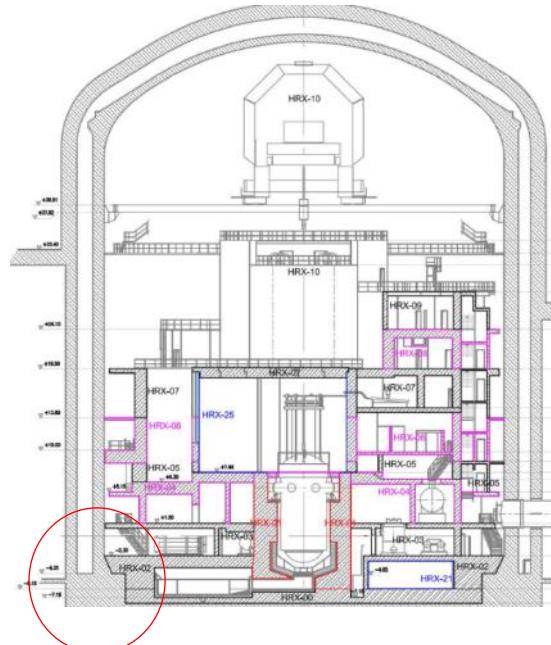
Parmi les points notables caractéristiques du dimensionnement des SI des paliers nucléaires français on pourra citer :

- Une révision sensible des efforts de rupture à prendre en compte au design (entre P4 et P'4) qui a conduit à une diminution notable des ratios moyens de ferraillage des SI (de 300 kg/m³ à 200 kg/m³ pour P4').
- Un nombre limité de combinaisons de cas de charges pour le dimensionnement des ferraillages (environ 50) jusqu'au palier N4 déclinées ensuite avec les efforts de rupture du circuit primaire.
- L'apparition pour le palier EPR d'un « core catcher » en base des SI et la disparition du joint périphérique entre extrémité de la dalle inférieure des SI et la base de l'enceinte interne qui ont notamment complexifié le design et la justification de cette dalle inférieure et du gousset de l'enceinte interne.

Evolution du design

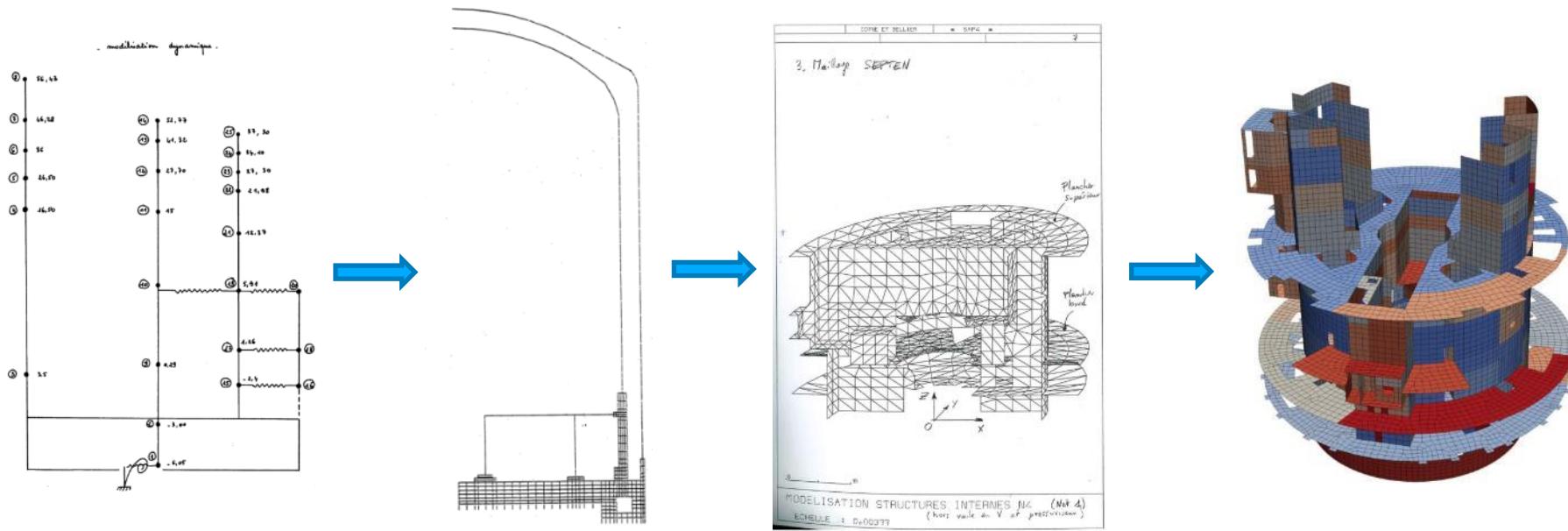


CPY

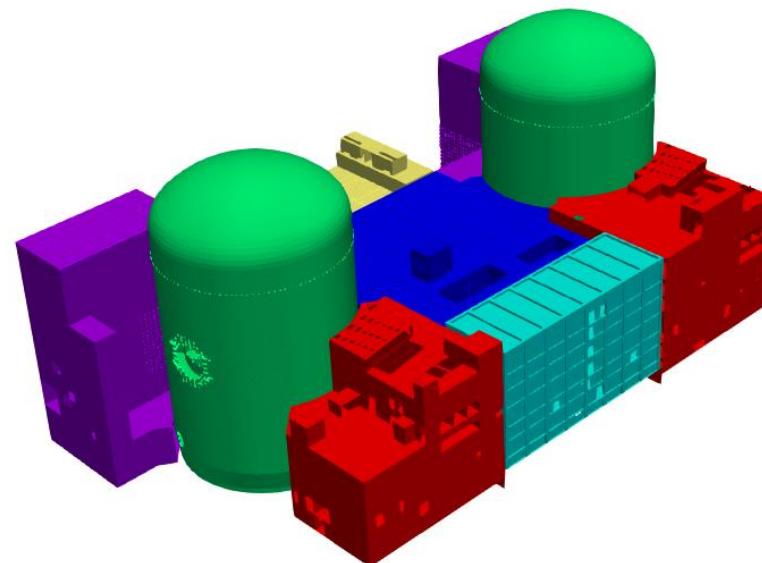
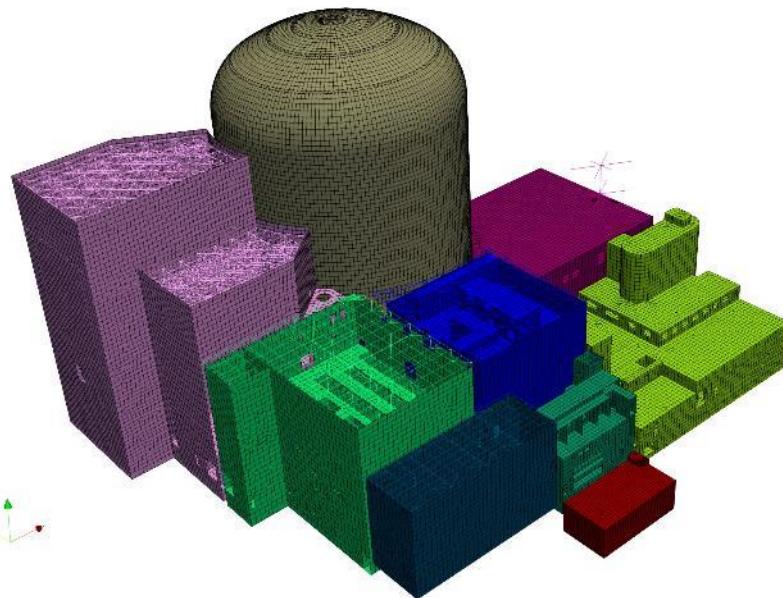


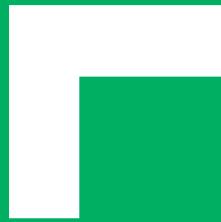
EPR

Evolution des modèles EF

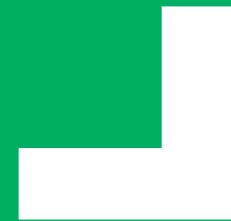


Evolution des modèles EF



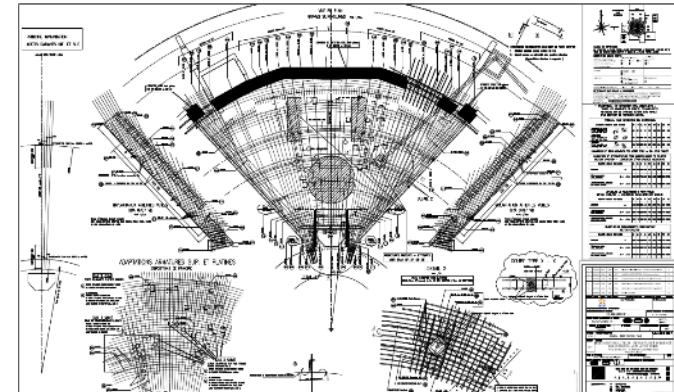
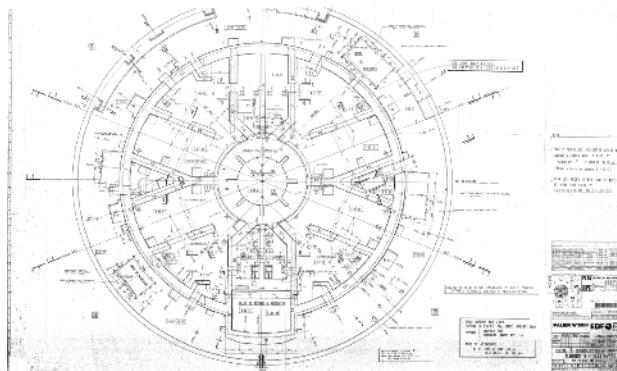


4. Construction / Exécution



Par le passé

- Projets en conception-réalisation pour le palier CP0
 - Fessenheim -> Campénon Bernard
 - Bugey -> Bouygues
 - Quelques contrats d'études pour Coyne & Bellier
- Scission contrats études & réalisation pour les paliers suivants : CP1, CP2, P4, P'4, N4
- Pour EPR Flamanville 3, les études EXE ont été réalisées par Bouygues



Schémas industriels

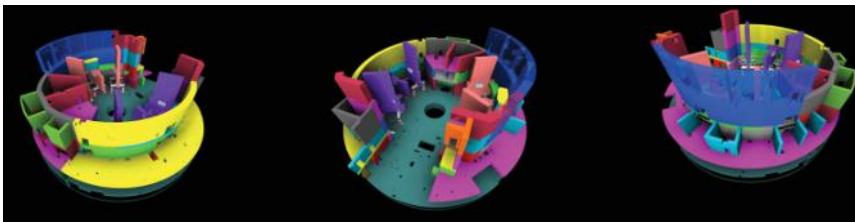
Actuellement

- Pour les EPR suivants et le projet EPR2, les études EXE sont réalisées par les BE (notes, plans 2D et/ou maquettes 3D)

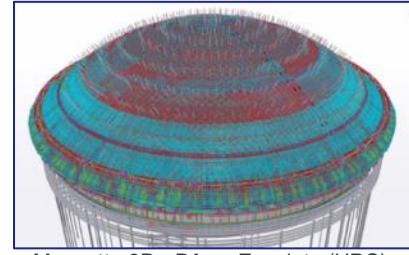
- EPR TSN : Plans 2D
- EPR HPC : Maquettes 3D + Plans 2D
- EPR SZC : Maquettes 3D
- EPR2 : Maquettes 3D

- Mise en place d'instances pour faciliter les échanges BE / constructeurs le plus en amont possible en phase études :

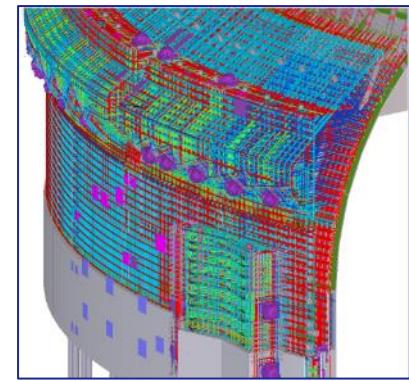
- Prise en compte des méthodes de construction dans le design (préfabrication par exemple)
- Anticipation des zones fortement ferraillées
- Traitement des clashes en phase études
- Propositions d'accélérations du planning de construction (précontrainte enceinte par exemple)
- Etudes de variantes de phasage (Structures Internes par exemple)



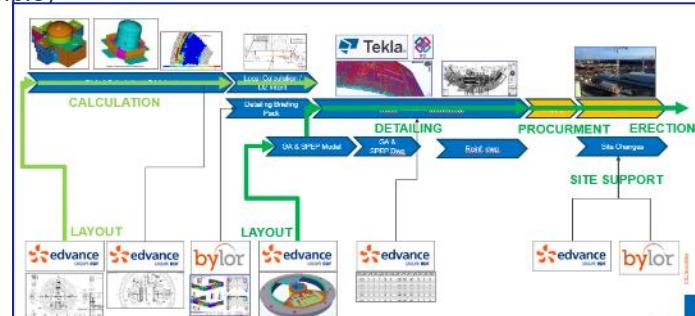
02/12/20 Variante de phasage pour découplage piscine HR PTR (HPC)



Maquette 3D - Dôme Enceinte (HPC)



Maquette 3D - Poutre de couronnement (HPC)



Schémas industriels

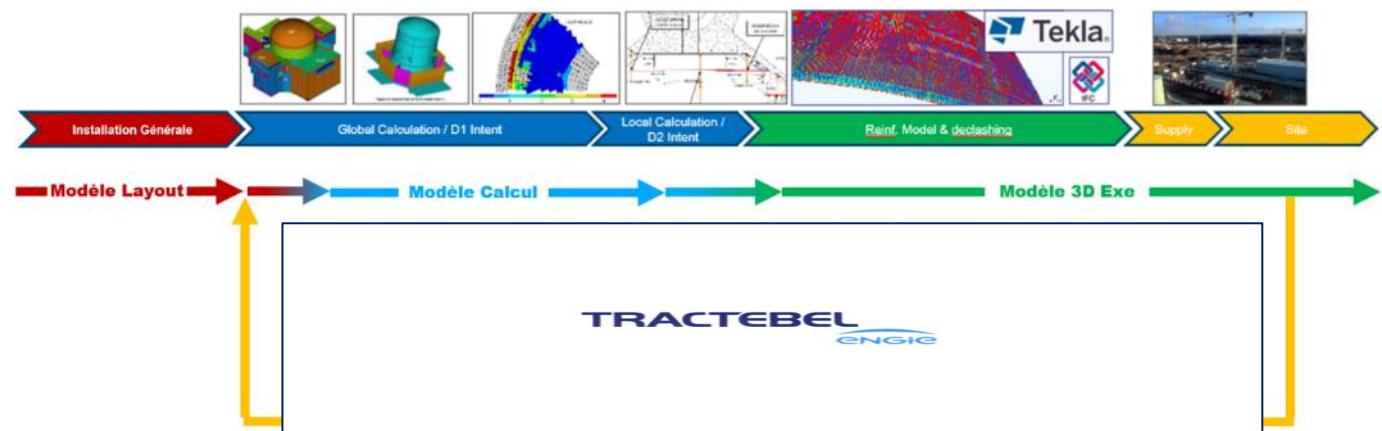
A l'avenir

□ SMR/AMR - Implication des constructeurs dès les phases de Basic Design

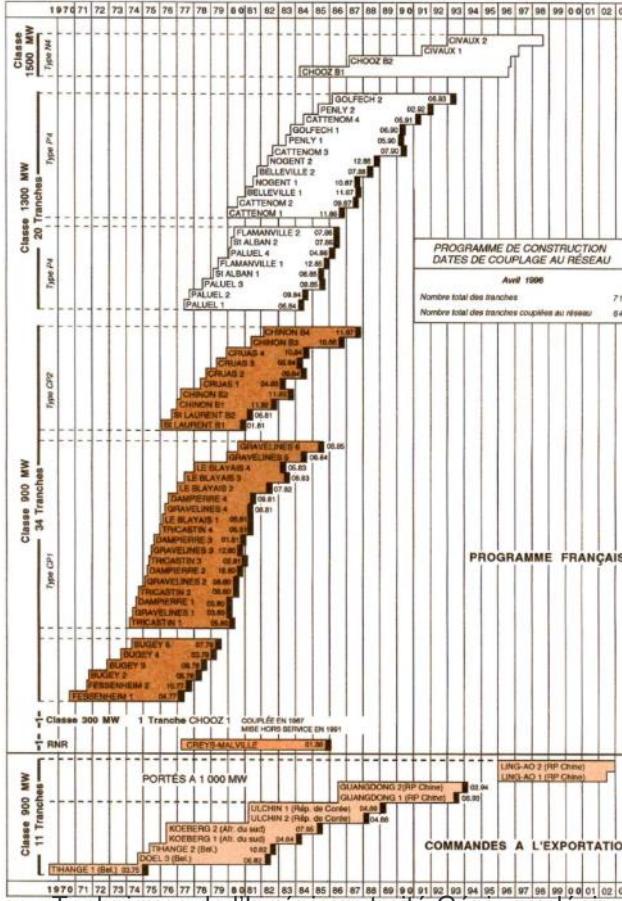
- Coûts / Plannings
- Faisabilité / Constructibilité
- Modularité / Standardisation

□ Complétion de la chaîne digitale

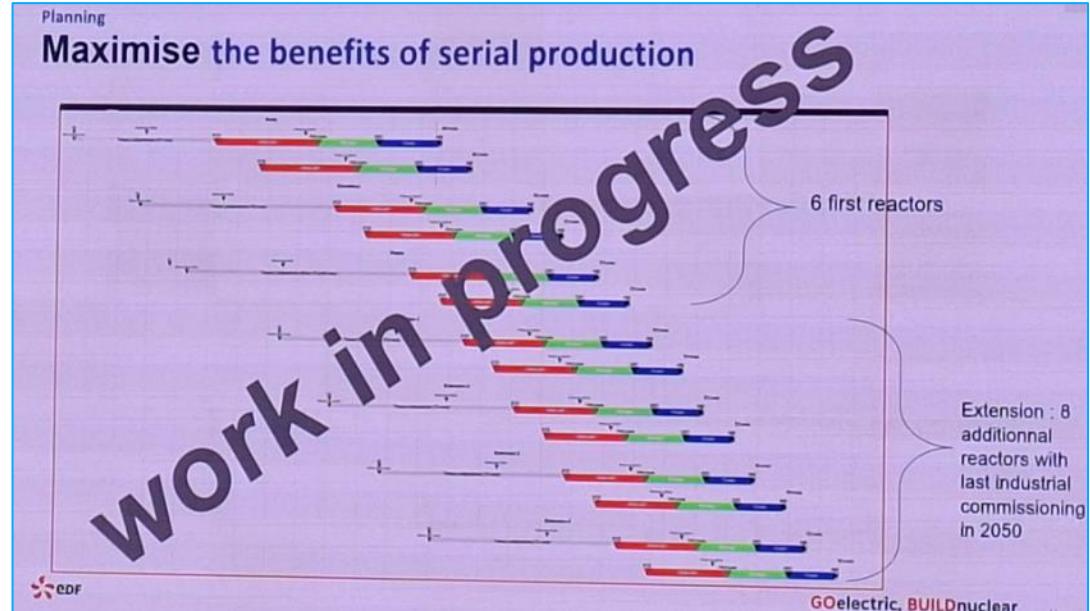
- Continuité Architecture / Conception / Dimensionnement / Detailing / Approvisionnement / Construction / Opération / Réévaluation / Démantèlement
- Standardisation et effets de série



Délais de réalisation



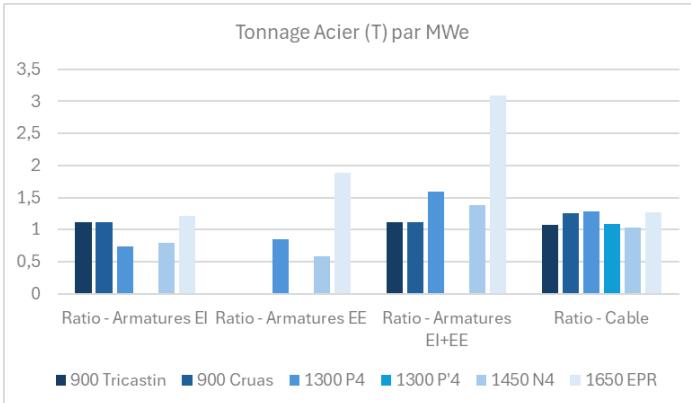
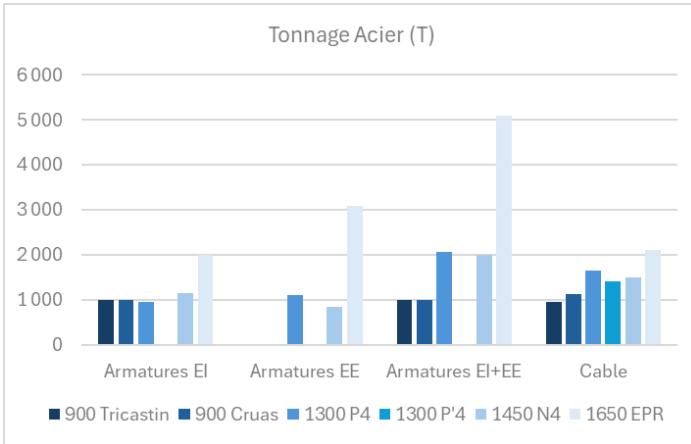
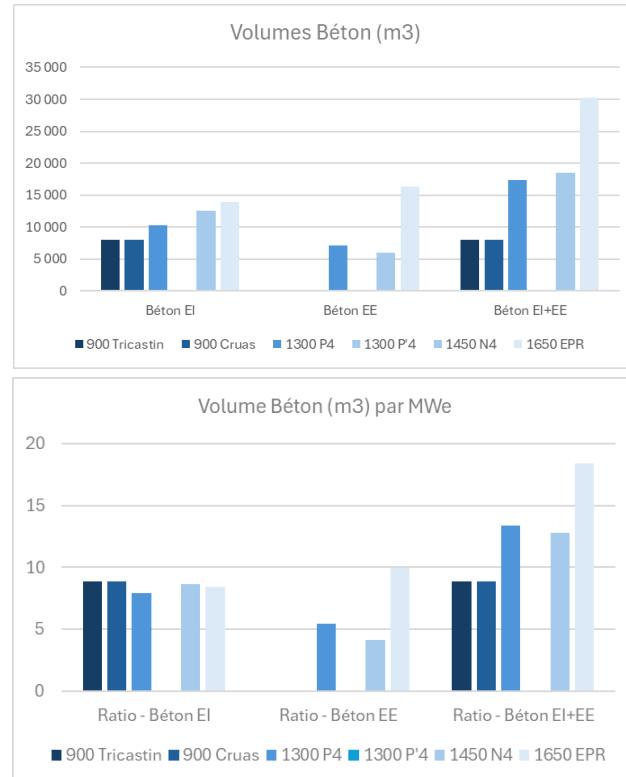
- **Effet palier** très bénéfique sur le parc
- EPR OL3 : **16 ans**
- EPR Flamanville 3 : **16 ans** de travaux
- EPR Taishan 1/2 : **9 ans**
- EPR2 : Task force **70 mois** d'EDF (< **6 ans**)
- Nuward : livraison en **48 mois** (**4 ans**)



Quantités

| Enceinte | Volume béton (m ³) | Armatures (tonnes) | Câbles précontrainte (tonnes) |
|------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Fessenheim | | | |
| Tricastin | | | |
| Cruas | | | |
| P4 | | | |
| P'4 | | | |
| N4 | | | |
| EPR | | | |

TRACTEBEL
ENGIE



Construction / exécution

Tricastin



Civaux



Construction / exécution

EPR Flamanville 3



EPR HPC



Test injection câbles

EPR Flamanville 3



Test injection câbles

EPR HPC



gamma

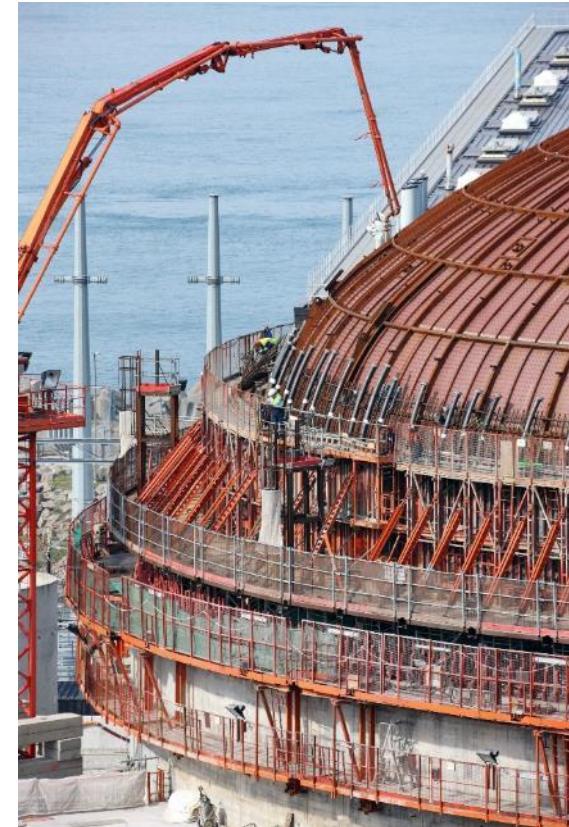
horizontal

horizontal

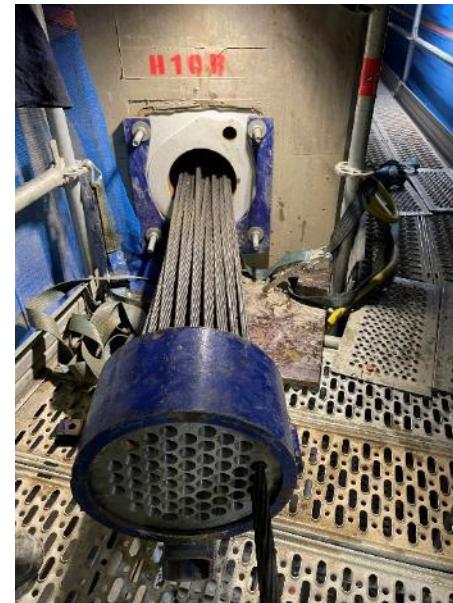
vertical

Contrôle par section du
câble

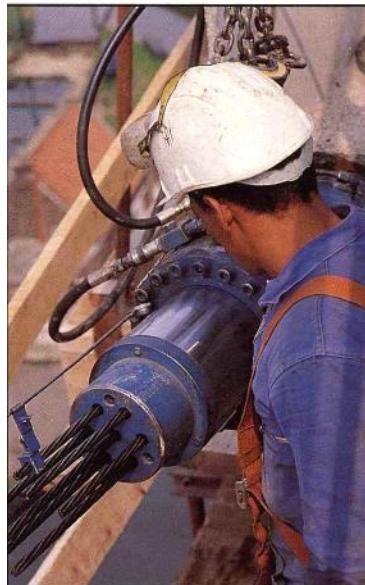
Installation gaines et tubes



Enfilage des torons



Mise en tension câbles



Liner Enceinte

TRACTEBEL
ENGIE

Palier CPY



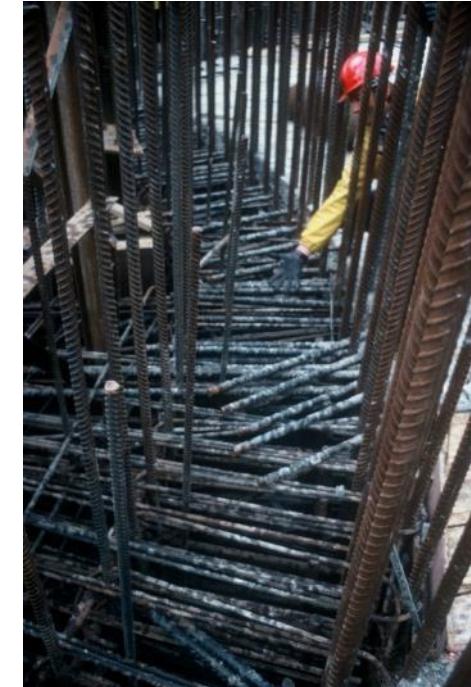
Liner Enceinte

TRACTEBEL
ENGIE

EPR HPC



Installation des armatures

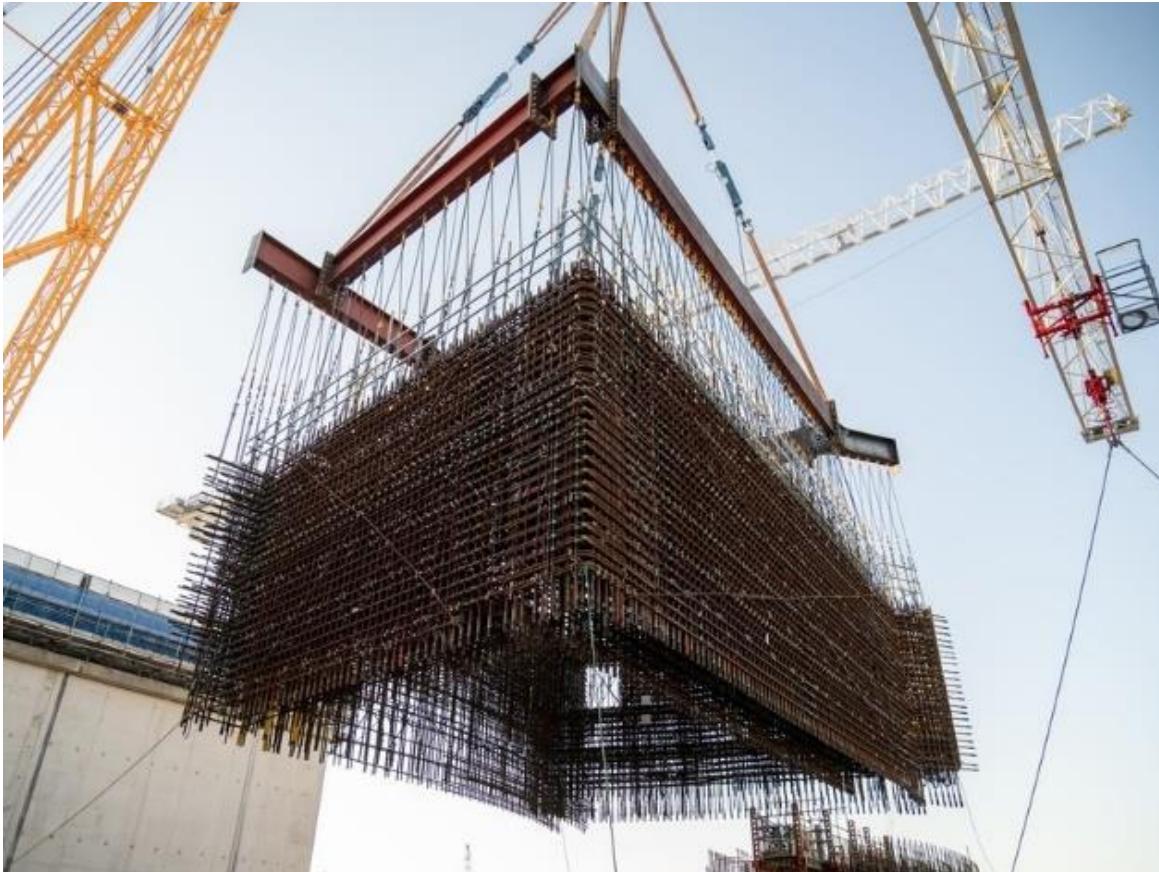


Préfabrication cages armatures



Préfabrication cages armatures

TRACTEBEL
ENGIE

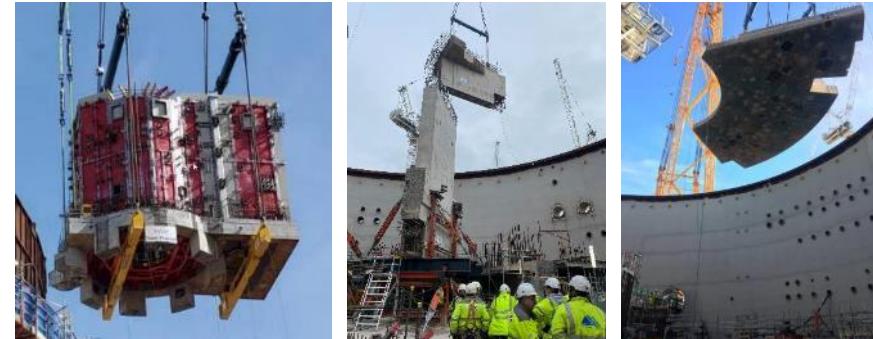
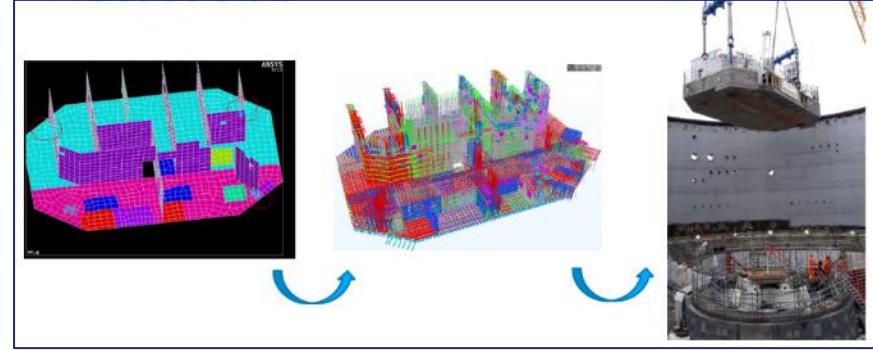


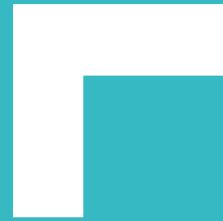
Préfabrication lourde

EPR Taishan (in-situ)

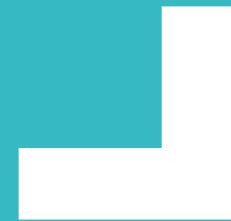


EPR HPC (Heavy Precast)





5. Perspectives d'évolutions



Nouveaux enjeux – BE Génie Civil

1. Applications filière - Panorama

| | Large Scale Reactor New Build | Large Scale Reactor Extension | Decom & Dism | Fuel & Radwaste | Defence | SMR / AMR |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|-----------------|---------|-----------|
| Sites | | | | | | |
| Design | | | | | | |
| Réalisation - Méthodes | | | | | | |
| Réalisation - Temps | | | | | | |
| Défis GC & Thématiques clés | | | | | | |

TRACTEBEL
engie

Nouveaux enjeux – BE Génie Civil

1. Applications filière - Illustration Modularité

Key take aways

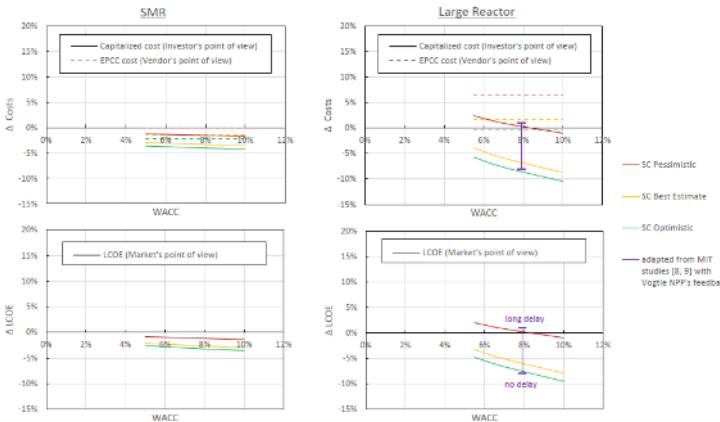


FIG. 7. Effect of steel-concrete (SC) vs. reinforced concrete (RC) on the EPCC cost, the capitalized cost, and the cost of electricity generation (application of methodology Fig. 3)

STEEL-CONCRETE MODULAR CONSTRUCTION. ECONOMIC IMPACT ON THE LEVELIZED COST OF ELECTRICITY FOR LARGE REACTORS OR SMR

PM. ALLIARD, J. NIEPCERON, G. CROZET, V. MAUPU

Nuward Edf

Lyon, France

Email: pierre-marie.alliard@nuward.com



FIG. 4. Steel-Concrete modules
(SCHEDULE mock-up at the site of EDF R&D in Les Renardières)

| Reference case : Reinforced Concrete | Large Reactor | SMR |
|---|---------------|--------------------------|
| Power range | >1000 MW | 200-400 |
| Pre-construction cost | 0.60% | 2% |
| Design cost | 10% | 13% |
| Direct construction cost | DIR | 62% |
| (Ind. civil works N) | (28%) | (9%) |
| (Ind. civil works C) | (8%) | (5%) |
| (Ind. civil works BnP) | (6%) | (4%) |
| Indirect services cost | INDIR | 10% |
| Owner's costs | OWN | 5% |
| Overnight Construction Cost | OCC | 5000 \$/kWe $\times 1.7$ |
| Weighted Average Cost of Capital | WACC | 9% |
| Construction duration (FOAK) | Tc | 7 yrs |
| Construction duration (NOAK) | | 5 yrs |
| (Ind. FOAK civil works entails path since 1st concrete) | | (20%) |
| Financial cost (FOAK) | IDC | +30% |
| Contingencies | | +23% |
| Lifetime | | 60 yrs |
| Payback | T | 35 yrs |
| Average capacity factor | | 0.92 |
| Capital annuity payment | CRF_KC | 77 \$/MWh $\times 1.4$ |
| Operation and Maintenance | O&M | 13 \$/MWh $\times 1.8$ |
| Fuel cycle | F | 9.5 \$/MWh $\times 1.5$ |
| Decommissioning and Dismantling | DD&D | 1.5 \$/MWh $\times 4.0$ |
| Levelized cost of electricity | LCOE | 100 \$/MWh $\times 1.5$ |
| | | [EXERCISE PURPOSE ONLY] |

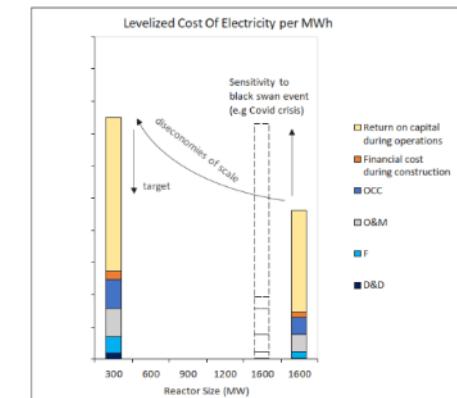
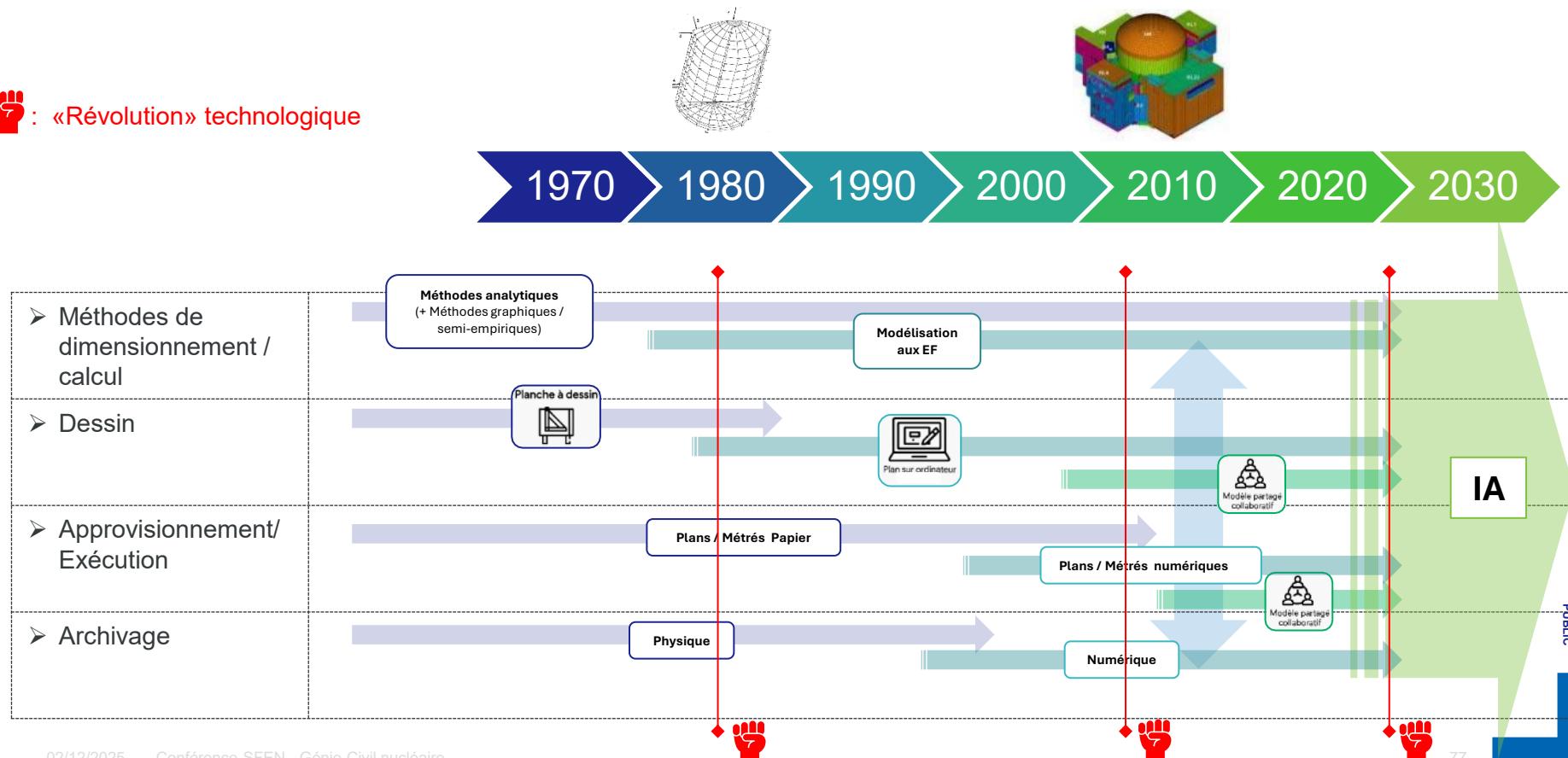


FIG. 5. Reference plants parameters and LCOE in reinforced concrete before cost & planning reduction by SCS (inspired by literature review, no relationship with any specific project)

Nouveaux enjeux – BE Génie Civil

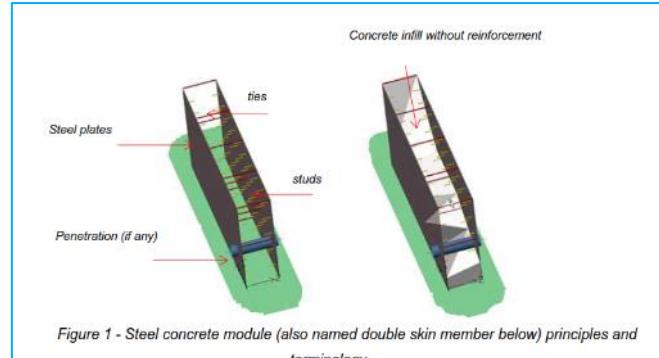
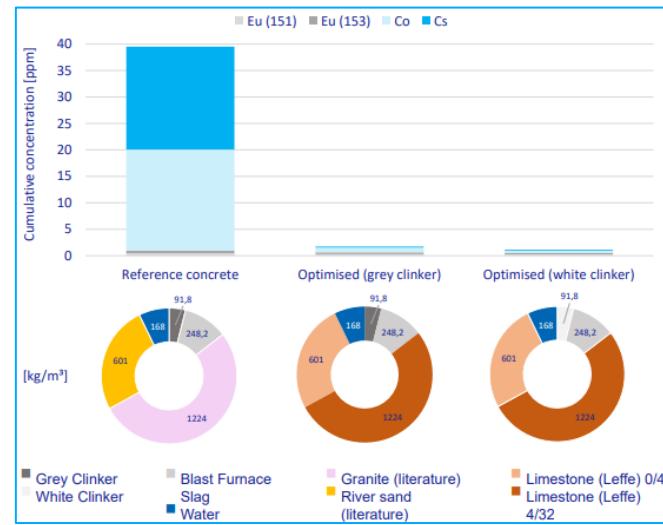
2. Evolution de nos outils, documentation

👉 : «Révolution» technologique



3. Evolution et maîtrise des matériaux de construction

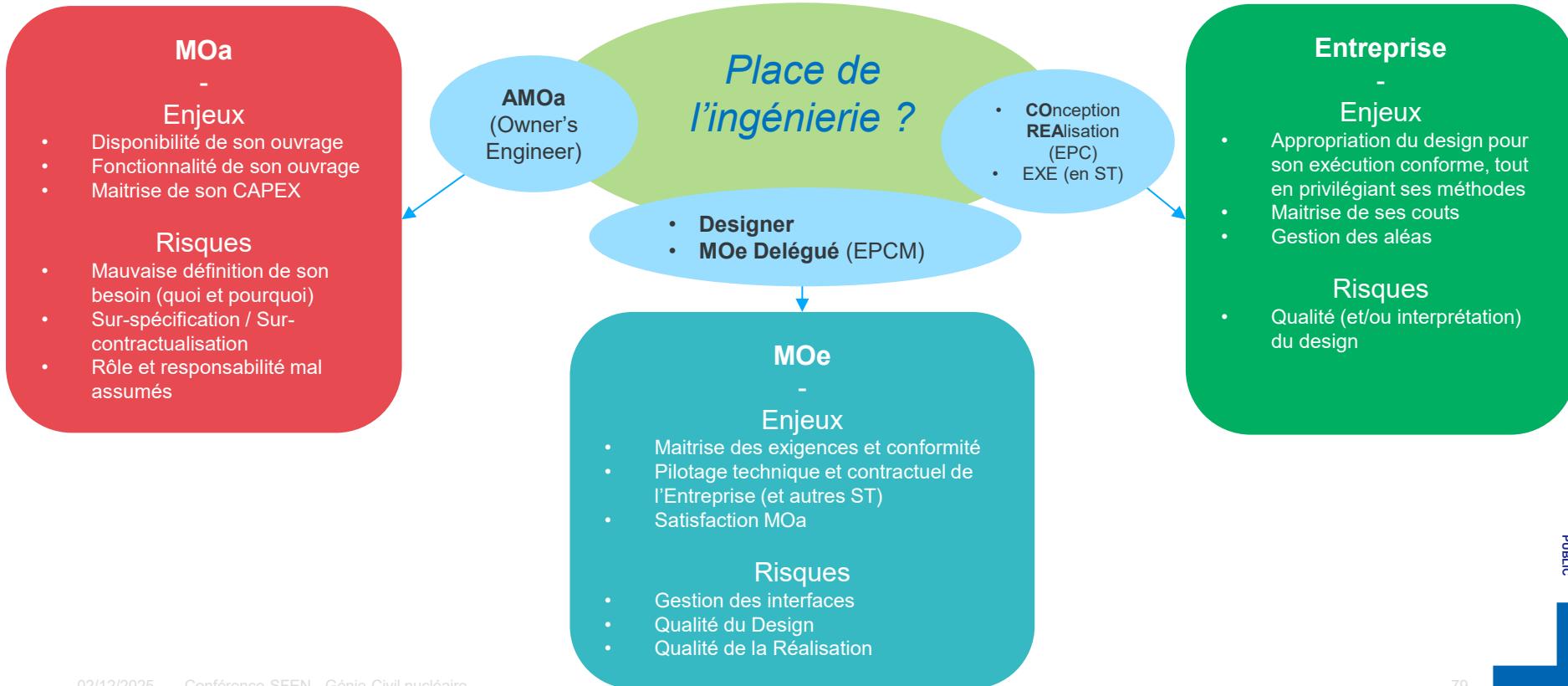
- Béton « bas carbone »
- Béton « faiblement activable »
- Béton « Haute Température »
- Durabilité et maîtrise de la fissuration (« Safety class 1 concrete »)
- Steel-Concrete modules (composant « sandwich »)
- Autres
 - Béton haute résistance (jusqu'à C100/115 dans Eurocode 2 nouvelle génération)
 - Béton fibré (annexe informative dans Eurocode 2 nouvelle génération)
 - Impression 3D
 - Etc.



Nouveaux enjeux – BE Génie Civil

4. Evolution des marchés de la construction 1/2

Contexte FR « Loi MOP »



Nouveaux enjeux – BE Génie Civil

4. Evolution des marchés de la construction 2/2

Evaluation des **Enjeux & Risques & Responsabilités**
(Techniques / Financiers / Juridiques)



Evaluation des **Capacités des intervenants**
(Compétences et Moyens financiers, matériels, humains)

Organisation « Loi MOP »



Exemples de fonctionnement déficient

- Rôles et responsabilités du Moa/MOe mal assumés
- Sur-protection du MOa (sur-spécification, sur-contractualisation)
- Faible gestion des interfaces
- Etc.

Conception Réalisation



Exemples de fonctionnement déficient

- Projet pas assez ou mal défini
- Part de risques embarqués par l'entreprise trop importante = COUTS pour le MOa
- Etc.

- *Responsabilité de la conception*
- *Faisabilité technique globale*
- *Interfaces Etudes / Réalisation*



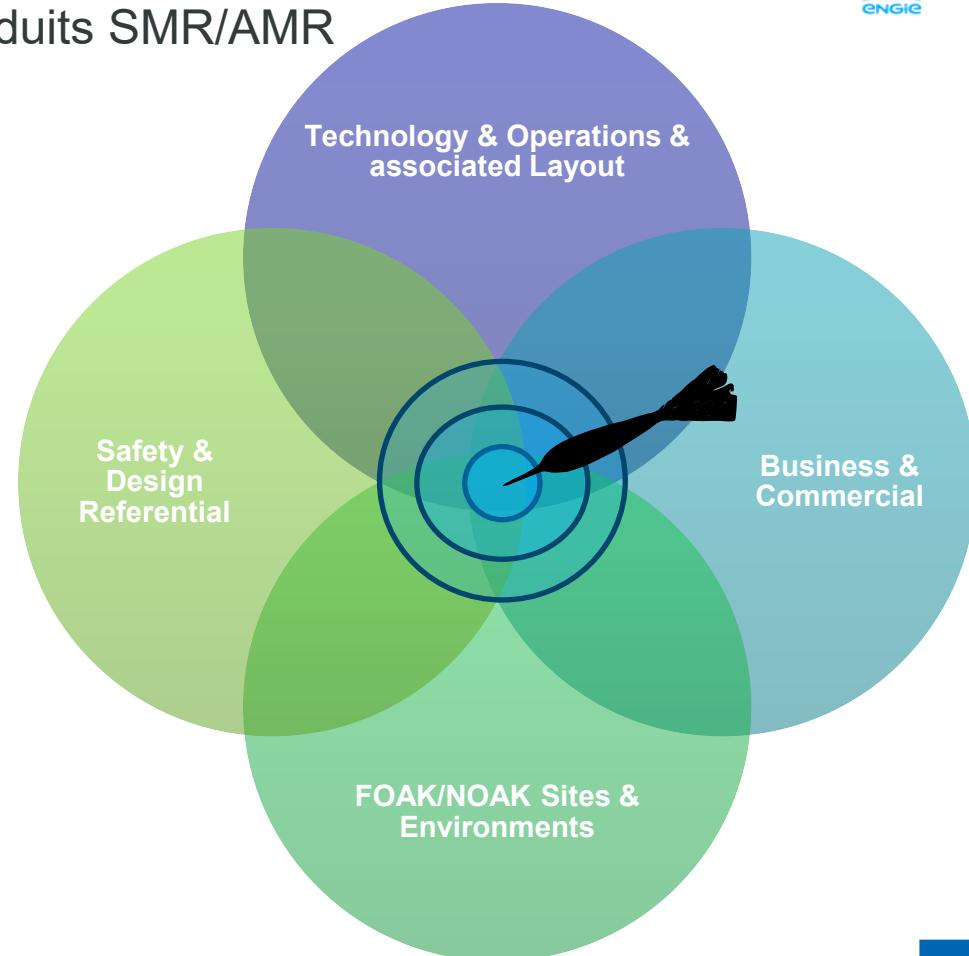
Contrats « collaboratifs »

- Early Contractor Involvement in Design
- NEC Type contract

Nouveaux enjeux – BE Génie Civil

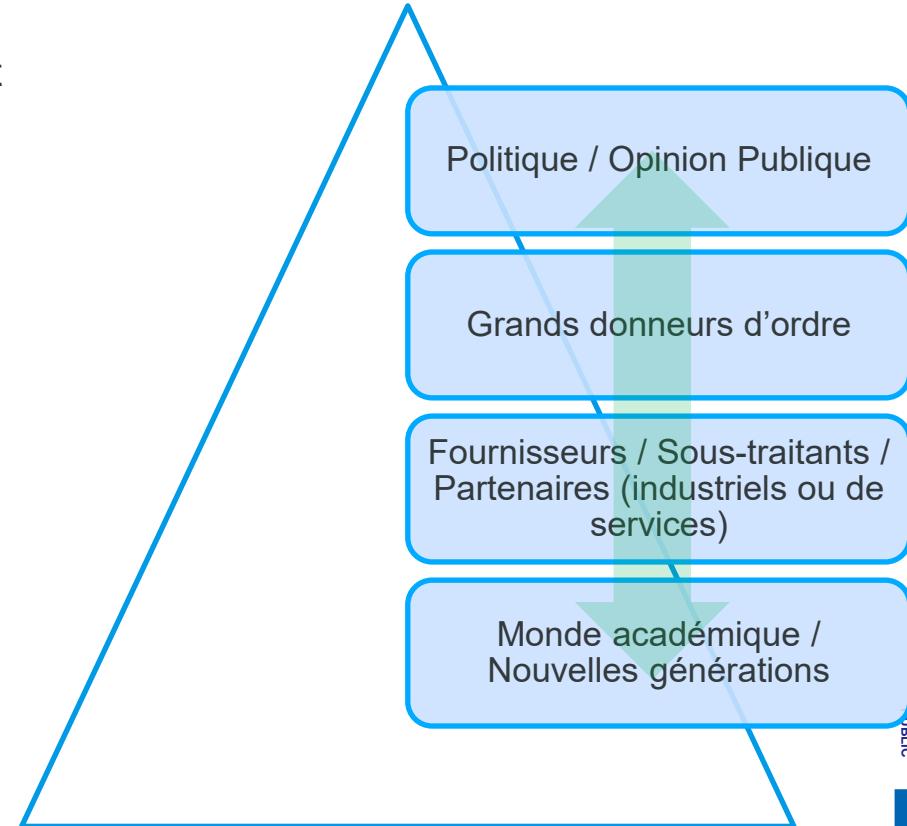
5. Design générique des nouveaux produits SMR/AMR

- Produit générique = Synthèse (+ ou – exhaustive) de fonctions, contraintes et exigences choisies ou imposée
- Enjeux
 - Appuyer les développeurs pour trouver un optimum de standardisation
 - Travailler sur la sécurisation des plannings (marchés ciblés dynamiques et réactifs)



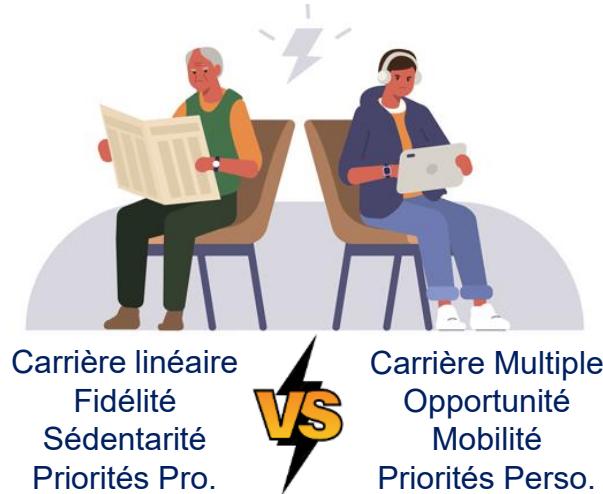
6. Compétence et Organisation de la filière nucléaire

- Plan Excell lancé en 2020 par EDF en partenariat avec le GIFEN – 5 axes fondamentaux
 - Gouvernance
 - Compétences
 - Fabrication & Construction
 - Supply Chain
 - Standardisation & RéPLICATION
- De nombreux groupes de travail pour identifier et **mettre en place des leviers de performance**
- Enjeux
 - Crédibilité, pérennité, continuité de la filière
 - Souveraineté énergétique, sécurité



7. Evolutions sociétales

- 'Globalisation' de nos modèles d'organisation en entreprise
 - Productions « multisites », « multiculturelles »
 - «Off-shorisation» des études
- Attentes et priorités de nos ingénieurs changent
- Conséquence = Adaptation des entreprises
 - Outils et plateformes d'échanges et de communication
 - Somme de mémoires individuelles -> **Organisation à mémoire organisationnelle**
 - Documentation Management
 - Knowledge Management & Trainings
 - Quality Management
 - Well-being at Work
 - Donner du sens à nos stratégies





Merci pour votre attention



Remerciements

- SFEN Provence
- Contributeurs de Tractebel à cette présentation
- EDF et en particulier Frédéric Coppel pour le partage de ses archives

We have solutions to your challenges



Martin GUICHARD

Directeur Métier Génie Civil

Business Area Gas Energy Nuclear

martin.guichard@tractebel.engie.com

Romain RAGOUPIN

Directeur Technique Métier Génie Civil

Business Area Gas Energy Nuclear

romain.ragoupin@tractebel.engie.com



tractebel-engie.com

