



# Un exemple d'application des Eurocodes : Le projet de stockage des déchets radioactifs

## CFMR

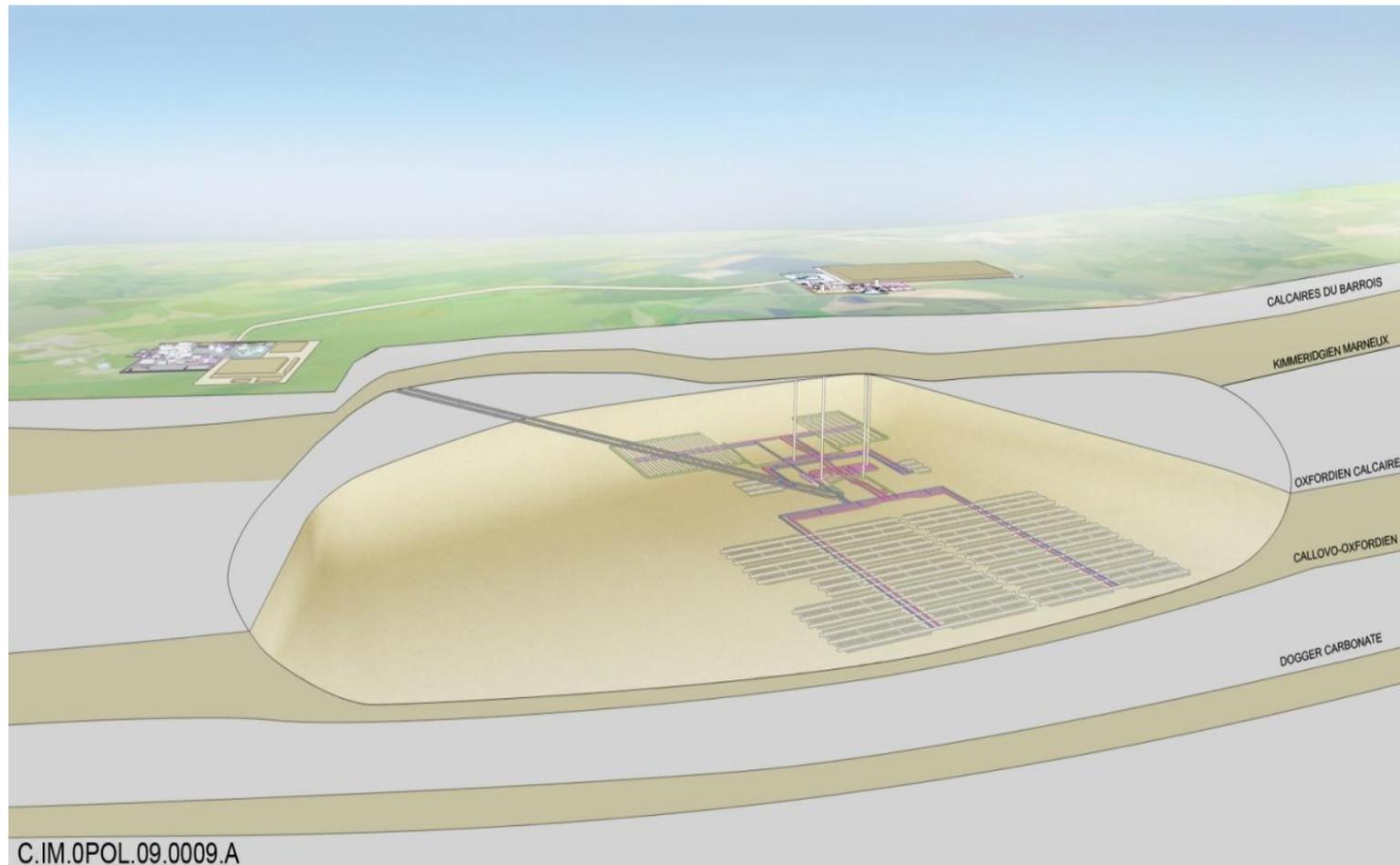
02 décembre 2010

1. Le projet de stockage profond CIGEO
2. Utilisation des Eurocodes

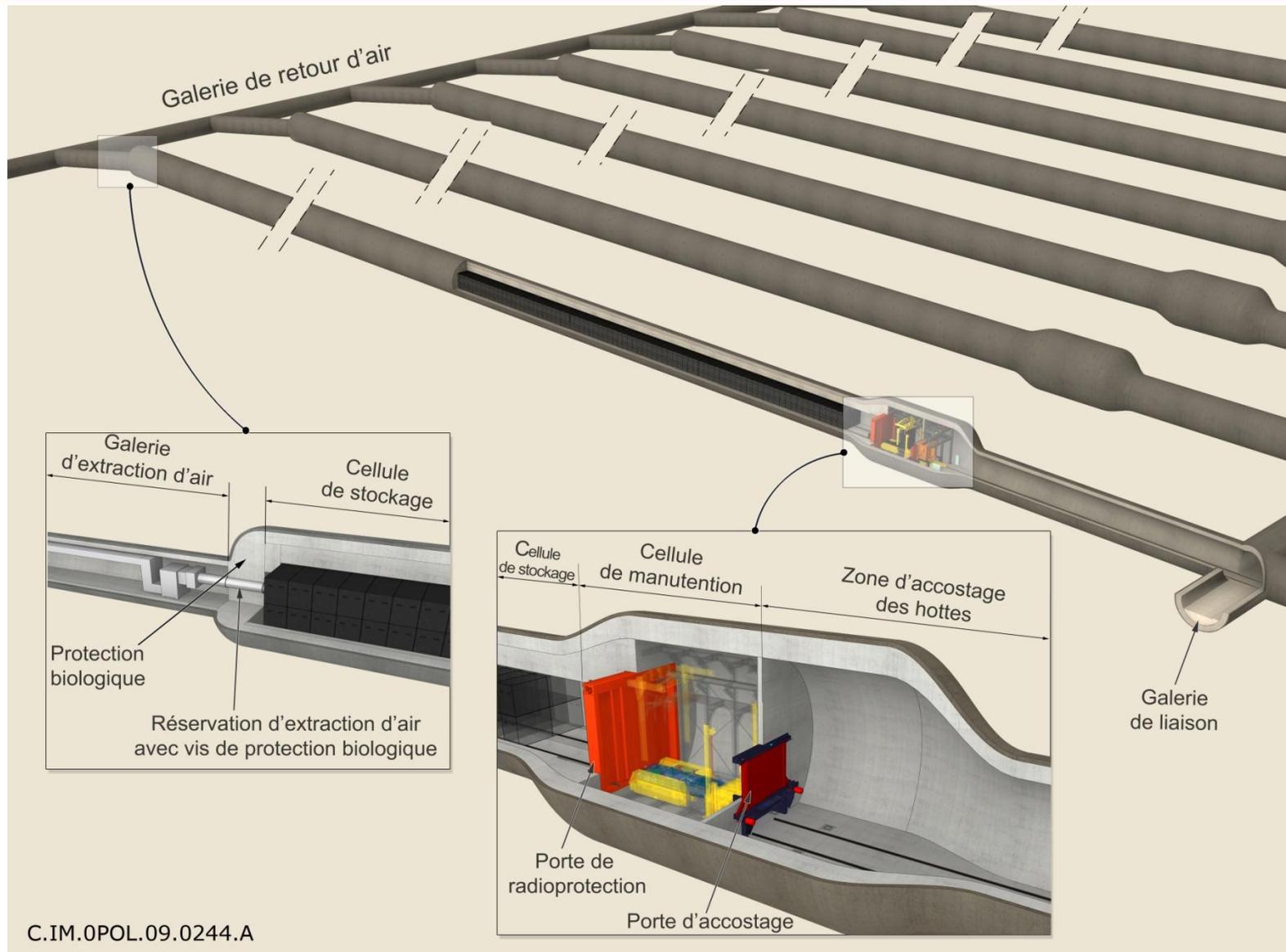
- Les colis concernés : les colis dits HA-MAVL (haute et moyenne activité, à vie longue) ; parc électronucléaire français, durée de vie des centrales 40 ans.
- La fonction principale du stockage : protéger les personnes et l'environnement contre les effets de la radioactivité (critères à respecter sur 1 million d'années)
- La mise en service du stockage est prévue en 2025
- L'exploitation du stockage devrait durer environ **un siècle**; sa construction également.

# Le projet de stockage CIGEO

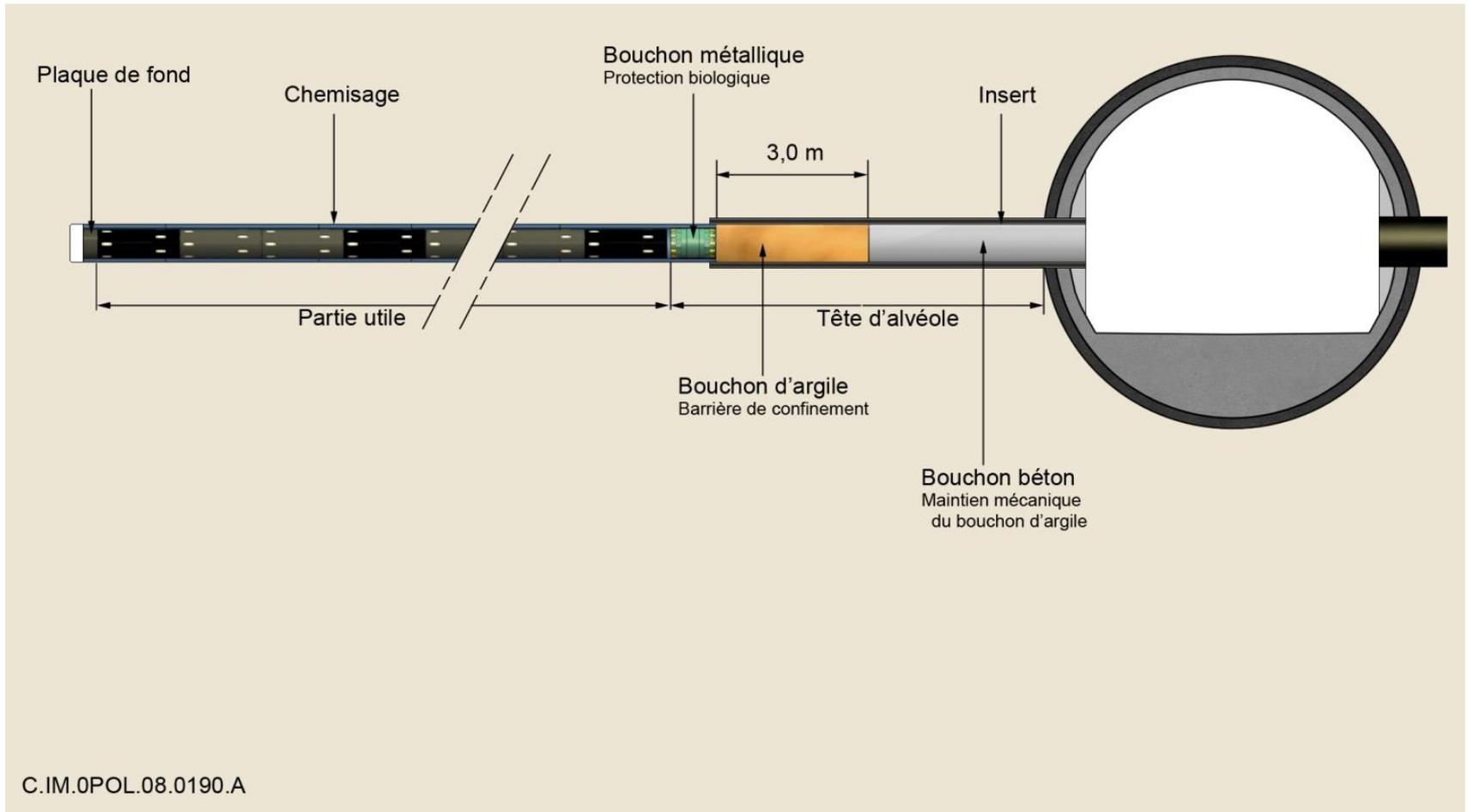
- Le linéaire à creuser est de 300 km, pour un volume à excaver de 7 à 8 millions de m<sup>3</sup>
- Le stockage sera implanté à 500 / 600 m de profondeur, dans des argilites du Jurassique, en Meuse / Haute-Marne.

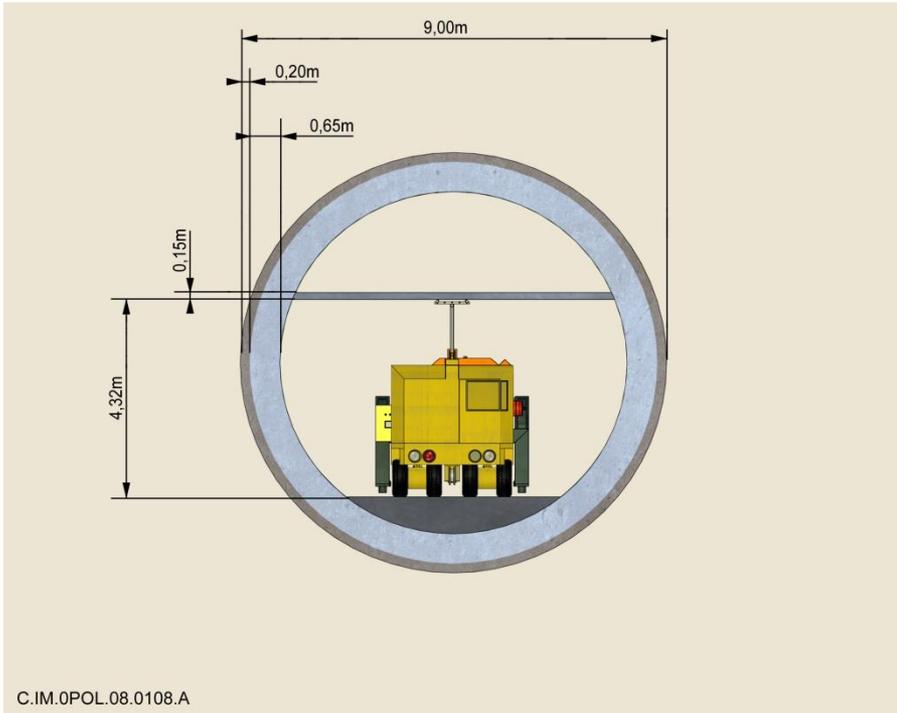


## Stockage des colis MAVL

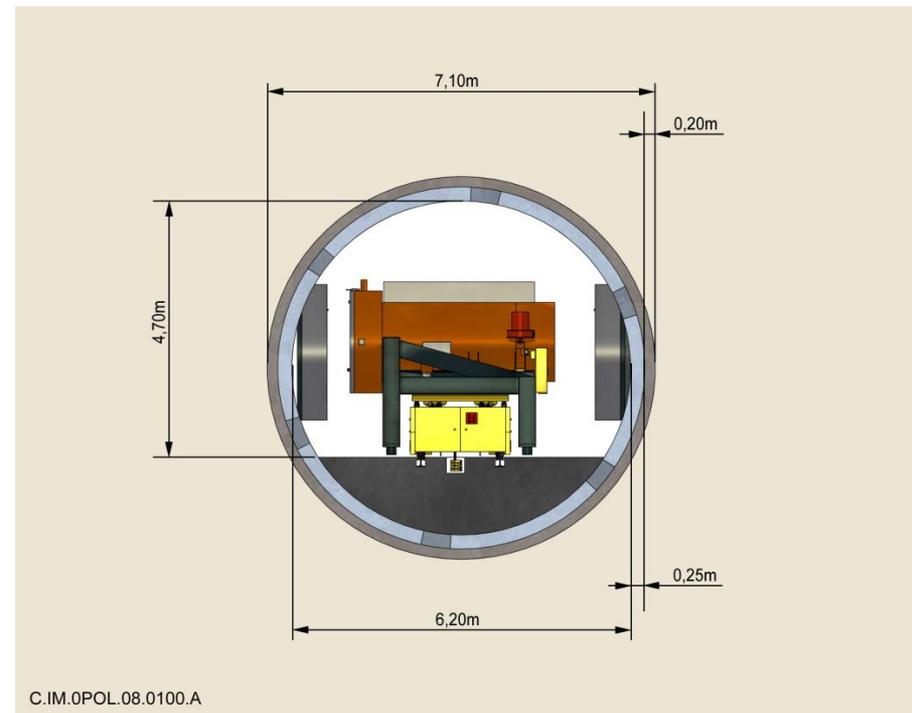


## Alvéole de stockage des colis HA





Galerie de liaison  
avec revêtement  
rigide



Galerie d'accès HA  
avec revêtement  
souple

## 1. Le projet de stockage profond CIGEO

## 2. Utilisation des Eurocodes

- Généralités
- Prise en compte des boulons
- Prise en compte du caractère spécial du stockage
- Prise en compte de la durée d'utilisation
- Définition des actions
- Propriétés des matériaux
- Combinaison d'actions

- L'Andra et ISL ont cherché à définir le cadre réglementaire à utiliser pour les calculs de dimensionnement du stockage
- Les réflexions qui suivent ont été mises en œuvre pour réaliser les pré-dimensionnements
- Les spécificités des ouvrages du projet de stockage :
  - ❑ Durée d'utilisation importante (potentiellement > 100 ans)
  - ❑ Maintenance impossible de certains ouvrages (chambres irradiantes)
  - ❑ Effet déterminant du comportement différé des argilites
  - ❑ Couplages divers, dont thermique (certains colis de déchets sont exothermiques)

- Cadre réglementaire retenu : les Eurocodes
- Justification de ce choix :
  - ❑ Référence citée par l'AFTES (recommandation de 2001)
  - ❑ Les Eurocodes remplacent progressivement les textes réglementaires nationaux (ex en France : BAEL pour le béton)
  - ❑ Largement utilisés par les bureaux d'étude
- Toutefois, les spécificités du projet de stockage profond conduisent à « compléter » les Eurocodes.

- Les Eurocodes applicables :
  - ❑ Eurocode 0 (NF EN 1990) – Bases de calcul des structures
  - ❑ Eurocode 1 (NF EN 1991-1-1) – Actions générales
  - ❑ Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1) – Calcul des structures en béton
  - ❑ Eurocode 3 (NF EN 1993-1-1) – Calcul des structures en acier
  - ❑ Eurocode 7 (NF EN 1997-1) – Calcul géotechnique
  - ❑ Eurocode 8 (NF EN 1998-1) – Résistance au séisme

- Principales limites des Eurocodes dans le cas du stockage CIGEO :
  - ❑ Soutènement par boulons
  - ❑ Calculs de pré-dimensionnement des soutènements (= béton projeté, boulons, cintres...)
  - ❑ Durabilité inhabituelle (potentiellement > 100 ans)

NB :      Soutènement = provisoire  
             Revêtement = définitif

- Les recommandations AFTES en complément des Eurocodes :
  - ❑ Méthode convergence-confinement (2002)
  - ❑ Conception et protection parasismiques des ouvrages souterrains (2001)
  - ❑ Utilisation des règles et normes de conception pour les revêtements en béton (2001)
  - ❑ Conception et dimensionnement du béton projeté (2001)
  - ❑ Projet de recommandation sur les boulons (parue ?)
  
- Les autres textes en appui :
  - ❑ Recommandation Clouterre (1991),
  - ❑ Recommandation TA95 (1995) – tirants d’ancrage
  - ❑ Norme expérimentale XP ENV 1992-1-6 – béton non armé

## Durabilité des boulons d'ancrage

- Références disponibles mettent en évidence des variations d'appréciation sur les épaisseurs sacrificielles pour les longues durées, en fonction des conditions d'environnement
- Compte tenu des conditions favorables dans le stockage, il semble possible d'intégrer les boulons sur une durée séculaire, moyennant une épaisseur sacrificielle
- Pour autant, les boulons ne sont pas pris en compte dans les pré-dimensionnements actuels du revêtement

- L'Eurocode 0 définit des « **classes de conséquences** », (conséquences sur les pertes de vies humaines ou sur l'impact économique / social / environnemental). Les ouvrages type alvéoles de stockage appartiennent *a priori* à la classe la plus élevée
- De la classe de conséquences, on passe à la **classe de fiabilité**
- On déduit alors, pour une durée donnée, une probabilité de défaillance, puis un **coefficient de pondération** à appliquer aux chargements
- On peut considérer que le **niveau de supervision** pendant les travaux sera suffisamment élevé pour ne pas appliquer de coefficient de pondération (**Eurocode 0, article B3.3**). C'est le parti pris actuel

- Impact sur les propriétés des matériaux : s'appuyer sur des choix de conception optimisant la durabilité et sur les connaissances relatives à la dégradation des matériaux
  - ❑ Enrobages des armatures vis-à-vis de la carbonatation (extrapolation Eurocode 2 au-delà de 100 ans) :
    - Enrobage = 15 mm + 10 mm par tranche de 50 ans (pour durée >50ans)
  - ❑ Limitation des sollicitation des bétons : Eurocode 2 donne des seuils au-delà desquels le comportement du béton est affecté. On retient, en cas d'impossibilité de maintenance, à l'ELS :
    - taux de travail béton =  $0,60 \times R_c$  béton
    - taux de travail des armatures =  $0,80 \times R_t$  acier
  - ❑ Composition des bétons : acquis scientifiques (hors sujet)
  - ❑ Nuance des aciers : acquis scientifiques (hors sujet)

- Définition des actions = ensemble de forces / déformations / accélérations appliquées à la structure
- Notion de **valeur caractéristique** : estimations **prudentes** des actions. D'après l'Eurocode 7 :
  - « Lorsque des méthodes statistiques sont utilisées, il convient d'établir la valeur caractéristique de telle sorte que la probabilité calculée d'une valeur plus défavorable contrôlant l'occurrence de l'état limite ne dépasse pas 5% .»
  - « ... le paramètre qui contrôle le comportement de l'ouvrage est souvent une valeur moyenne sur [...] un certain volume de sol. La valeur caractéristique est une estimation prudente de cette valeur moyenne. »

- Pour certains paramètres, il n'y a pas d'incertitude : la valeur nominale est connue.
- Pour une action donnée, ne pas chercher à cumuler les marges de sécurité (fractiles à 5%) sur tous les paramètres qui la gouverne !
- L'évaluation des valeurs caractéristiques relèvent souvent du jugement d'expert
- Les valeurs caractéristiques sont réévaluées en fonction du degré de connaissance du site

- Poids propre : pas d'incertitude
- Poussée des terres à court terme : calculée à partir de 3 termes
  - ❑ Contraintes initiales : valeurs caractéristiques = valeurs moyennes pour les contraintes principales (l'incertitude sur la profondeur du projet est traitée en étude de sensibilité)
  - ❑ Loi de comportement à court terme des argilites : valeur caractéristiques = valeurs moyennes pour le module de Young et le coefficient de Poisson, valeurs inférieures pour les paramètres de rupture ( $R_c = 12 \text{ MPa}$ )
  - ❑ Raideur du béton : valeur caractéristique = valeur moyenne pour les sollicitations à court terme (Eurocode 0, article 4.2) ;

- Poussée des terres à long terme : calculée à partir de 4 termes
  - ❑ Contraintes initiales : idem court terme
  - ❑ Loi de comportement à court terme des argilites : voir plus haut
  - ❑ Loi de comportement à long terme des argilites : loi « enveloppe » prudente + coefficient d'Arrhénius de la loi de Lemaître majoré de 50%
  - ❑ Raideur du béton : valeur caractéristique = valeur moyenne à long terme, en postulant une humidité de 70% (puis utilisation de l'Eurocode 2, annexe B)  
ex: pour un B40, E passe de 36 à 12 GPa.

- Chargement thermique : calculé à partir de 3 termes
  - ❑ Champ de température : incertitude de l'ordre de 15%
  - ❑ Coefficient de dilatation thermique des argilites (et du béton) : incertitude sur les argilites de l'ordre de 20%
  - ❑ La raideur des argilites (et du béton) : incertitude de l'ordre de 25%
  - ❑ En pratique, on fait porter toute l'incertitude sur le coefficient de dilatation thermique, majoré de 50%.

- Propriétés à long terme : traitées plus haut
- Résistances de calcul du béton
  - ELS :
    - compression :  $0,6 R_c$  (voir plus haut)
    - traction : résistance nulle en l'absence d'armatures, et  $0,8 R_t$  pour les armatures
  - ELU :
    - béton non armé : coefficient partiel de 1,8
    - béton armé : coefficient partiel de 1,5
    - acier : coefficient partiel de 1,15

- Application classique des combinaisons d'actions aux états limites
- Principaux coefficients de pondération :
  - ELS :
    - vise à assurer la durabilité de la structure
    - coefficients = 1
  - ELU :
    - vise à assurer la stabilité de la structure
    - coefficients des actions permanentes = 1,35
    - coefficients des actions variables = 1,5
    - coefficients des actions accidentelles = 1
    - en pratique, la seule action variable est la charge thermique; elle est quasi monotone et est assimilée à une action permanente -> coefficient = 1,35

- Les Eurocodes ne peuvent pas être appliqués sans une analyse préalable :
  - pour les compléter lorsque l'on sort de leur champ d'application (boulons, longues durées)
  - pour les interpréter, à l'intérieur de leur champ d'application (détermination des valeurs caractéristiques, détermination des coefficients de pondération en fonction des classes de conséquences, etc.)
- Le travail présenté donne un premier positionnement pour réaliser des dimensionnements
- Les valeurs caractéristiques évolueront en fonction des gains de connaissance (levée des incertitudes) ; c'est l'un des rôles du Laboratoire souterrain de Meuse / Haute Marne.