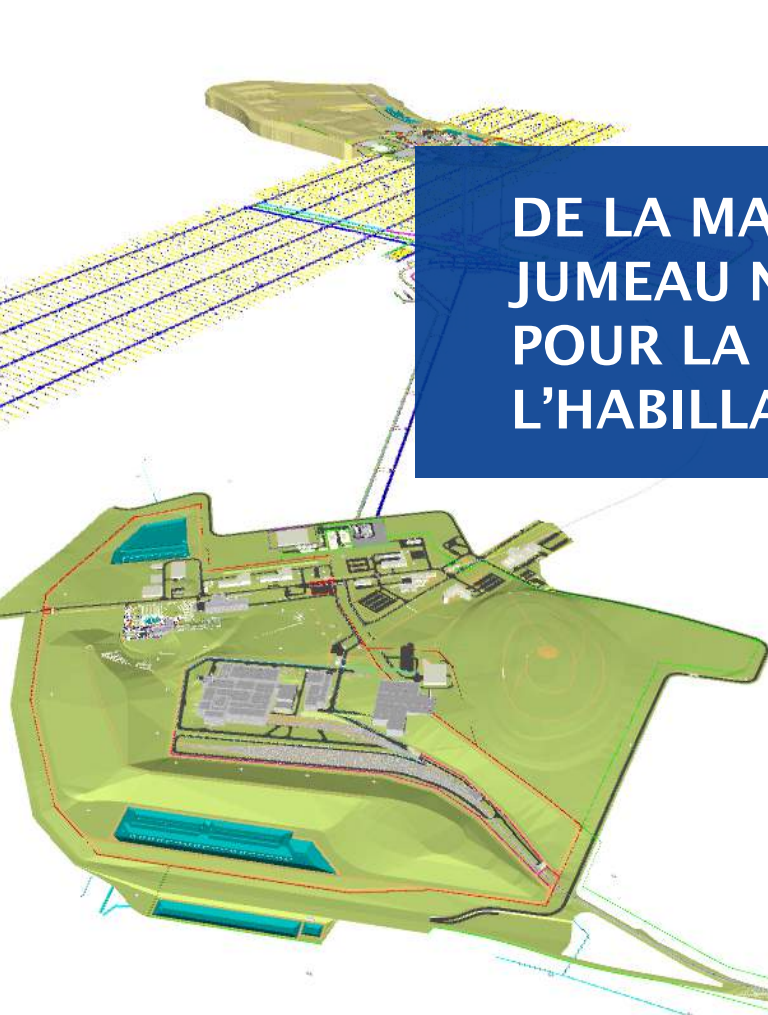




De la maquette numérique de Cigéo au jumeau numérique pour la surveillance : exemple d'application sur la thermique d'un ouvrage

Antoine Pasteau

La captation de cette conférence est disponible sur Culture Sciences de l'Ingénieur à partir du lien suivant : https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/edubim-2021-dela-maquette-de-cigeo-au-jumeau-numerique-pour-la-surveillance



DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE DE CIGÉO AU JUMEAU NUMÉRIQUE PHÉNOMÉNOLOGIQUE POUR LA SURVEILLANCE : L'EXEMPLE DE L'HABILLAGE EN GÉOLOGIE ET EN THERMIQUE

Gérard BOURRIAUX¹, Emilie BERNARD¹
Guillaume PEPIN², et Antoine PASTEAU²

¹Andra - Direction de l'Ingénierie

²Andra - Direction de la Recherche et Développement

Workshop eduBIM du 1^{er} décembre 2021
EIVP Paris

L'Andra et le projet Cigéo

ANDRA = Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs

- Créée en 1979 au sein du CEA puis indépendante depuis 1991
- Statut d'établissement public industriel et commercial (EPIC)
- Missions : Inventorier les déchets radioactifs français, rechercher des solutions de stockage des déchets ultimes, entreposer et stocker sur site, exploiter/surveiller les centres de stockage, sécuriser et remettre en état les sites pollués par la radioactivité, informer le public
- Ce que nous ne faisons pas : recyclage/transformation des déchets, transport...

Le projet Cigéo

- ~500 mètres sous terre
- Situé à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne
- 2025 (si accepté) : phase pilote puis exploitation
- Phase d'exploitation ~ 100 ans
- Réversibilité (pendant l'exploitation) d'au moins 100 ans

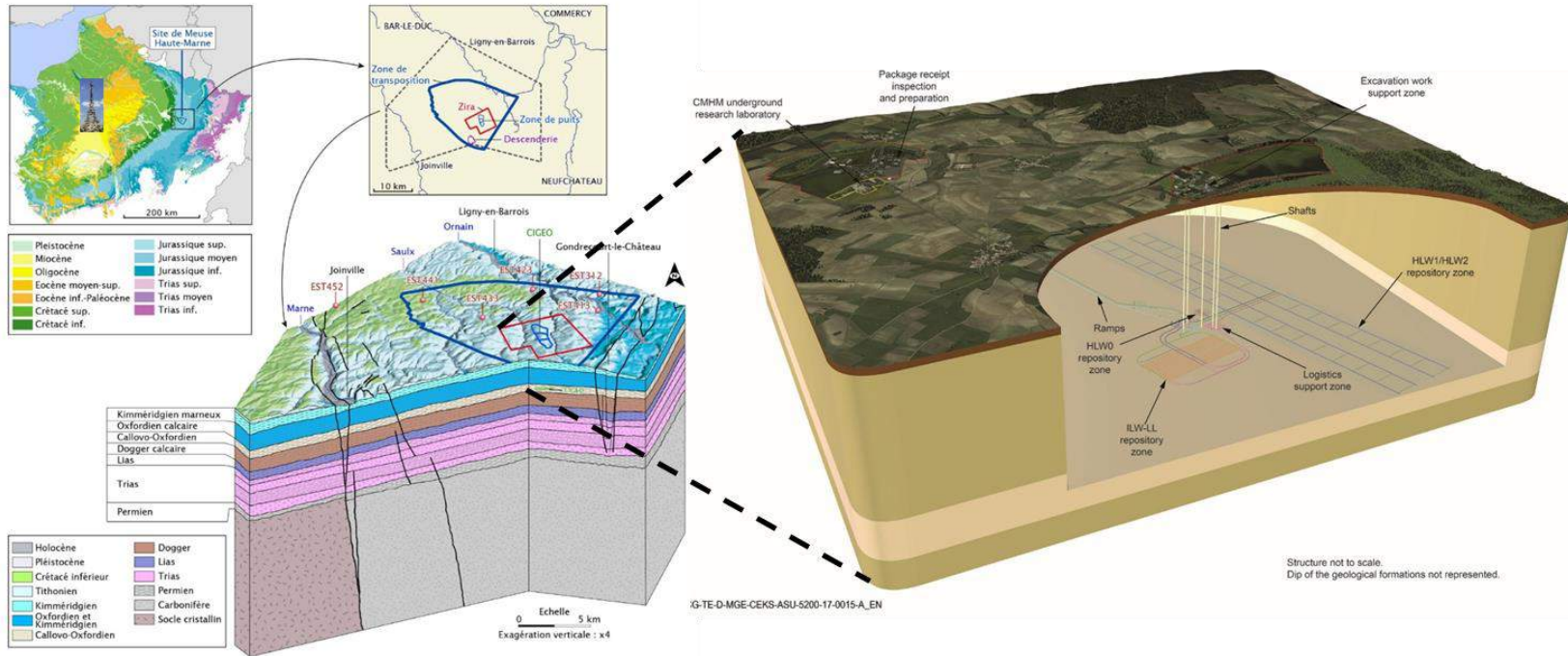
	Vie courte ($C(t) \propto e^{-\lambda t}, T = \frac{\ln(2)}{\lambda} < 31 \text{ ans}$)	Vie longue ($T > 31 \text{ ans}$)
Très faible activité (TFA)	Stockage en surface Centre TFA de l'Aube 	
Faible activité (FA)	 Centre de la Manche	 Projet de stockage à faible profondeur (15-200m)
Moyenne activité (MA)	Stockages en surface Centre FMA de l'Aube 	
Haute activité (HA)	Projet Cigéo, Stockage en profondeur (500m) 	

En appui au projet Cigéo : Le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne

- 2 km de galeries souterraines dédiées à des expérimentations diverses sur la roche et les ouvrages
- Non destiné au stockage de déchets

Le projet Cigéo

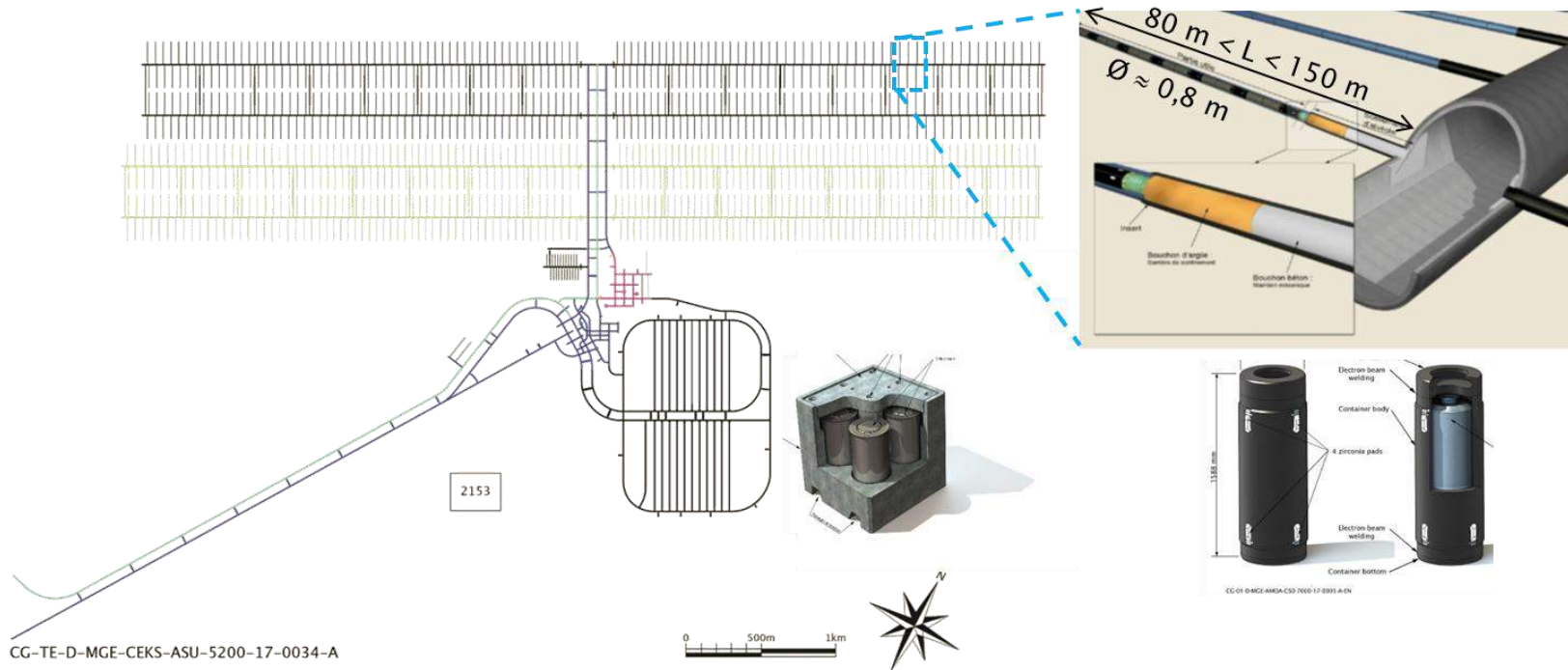
Localisation et environnement géologique



CG-TE-D-MGE-AMOA-GEO-0000-18-0073-A

Le projet Cigéo

Architecture et conception d'ensemble



Le cadre général

Les outils de la digitalisation de Cigéo

Un modèle de bien commun : la **maquette numérique** et le **PLM**

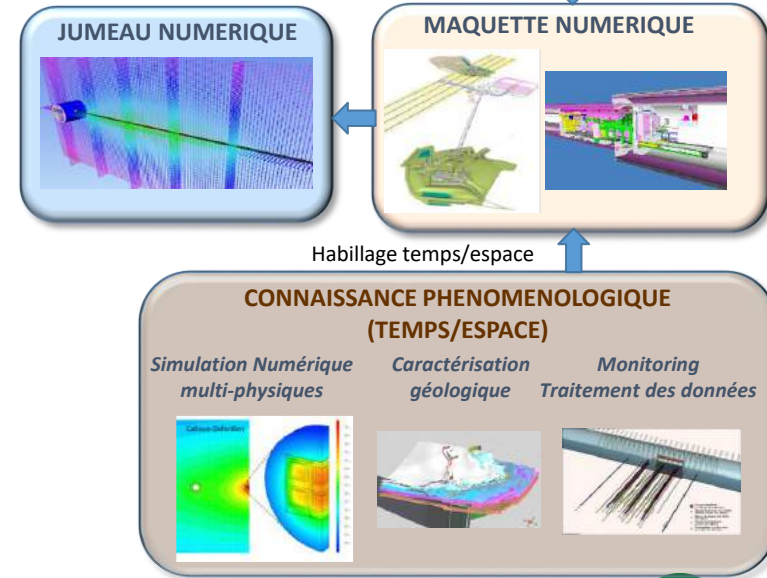
- Mise en œuvre reposant sur une méthode de travail collaborative, le **BIM**
- Représentation 3D géométriques, fonctionnelles et physiques de Cigéo

Habillage en processus physiques de la maquette numérique : le **jumeau numérique**

- Environnement unifié, accessible, lisible, des prédictions temps/espace de l'évolution phénoménologique
 - Simulations numériques multi-physiques « couplées »
 - Intégration/traitement des données mesurées
- Informations et prédictions « temps réel » sur le fonctionnement du système de stockage
 - Outil d'aide à la décision



Evaluation préliminaire de l'habillage de la maquette sur la thermique d'un alvéole HA

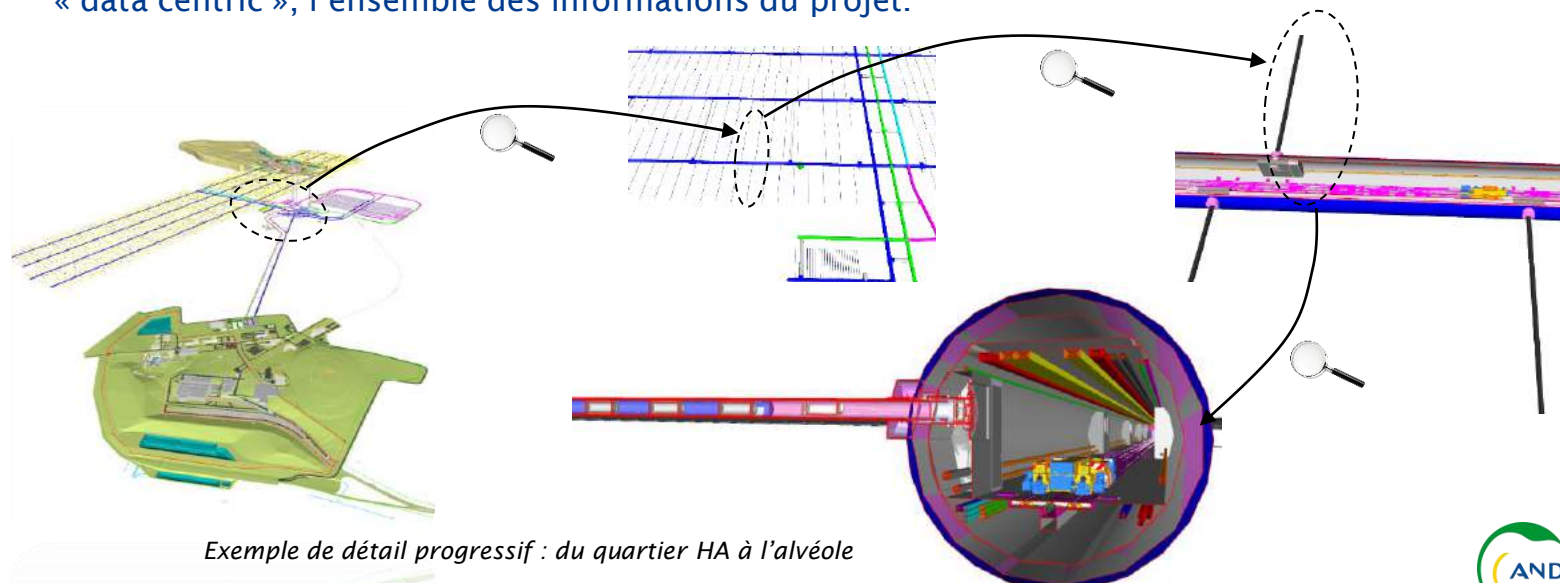


La maquette numérique 3D de Cigéo

Au cœur du management de projet

Modélisation géométrique 3D de l'ensemble du projet finalisée et opérationnelle :

- Détail de l'ensemble des composants des installations de surface et fond de Cigéo, de l'architecture en fin de phase d'APD
- Interface graphique d'accès aux données de différentes natures en capitalisant, en approche « data centric », l'ensemble des informations du projet.



Exemple de détail progressif : du quartier HA à l'alvéole

La maquette numérique 3D de Cigéo

La stratégie BIM et des applications métier en cours/à venir

Une stratégie BIM reposant sur la mise en place d'un **écosystème numérique** pérenne, sécurisé, collaboratif et interopérable, permettant de recevoir toutes les productions des contributeurs dans une structure centralisée (open-BIM, Linked Data, ...).

Applications « métier » programmées (aide au chiffrage, simulation planning, etc...) ou déjà mises en œuvre :

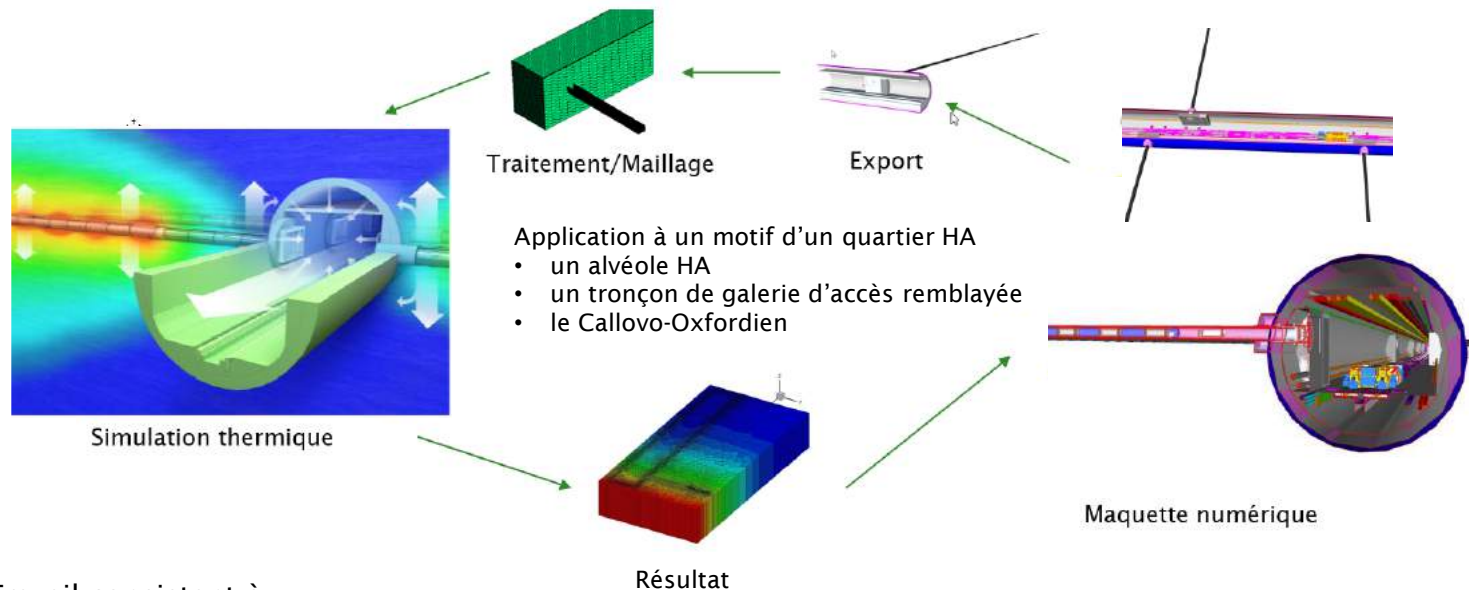
- Le développement d'un outil de réalité virtuelle (**Spadassin**) pour la simulation de cas accidentels ;



- La production d'iconographies et vidéos
- L'intégration de la géométrie des couches géologiques dans la maquette numérique ;
- L'intégration des résultats de simulation thermique d'un alvéole HA à partir de la géométrie de la maquette numérique puis une projection des résultats dans la maquette.
 - **Objet de l'article pour eduBIM**

L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

Les caractéristiques du cas étudié



Travail consistant à :

- mettre en œuvre un processus séquençant l'extraction, l'adaptation et le maillage d'une géométrie issue de la maquette numérique,
- réaliser une simulation numérique en dehors de la maquette
- projeter les résultats en retour sur la maquette.

L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

Les problématiques de développement *a priori*

- Les interfaces entre les différents outils utilisés (CAO, maillage, simulation...)
 - multiplicité des formats de fichiers (entrée/sorties) par les différents outils ;
- Les interfaces entre utilisateurs, et donc entre métiers (ingénierie et sciences/modélisation), en lien avec les outils précités,
 - niveaux de conceptualisation différents selon le champ d'application ;
- La nature des objets issus de la maquette numérique et leur compatibilité avec leur traitement et leur conceptualisation dans les codes de calcul
 - suppression et remplacement d'objets,
 - modification/simplification d'objets (milieux non poreux, jeux, ...),
 - ajout d'objets (Callovo-Oxfordien, ...),
- Les résultats (temps/espace) en vue de leur projection sur la maquette numérique, compte tenu de leur type et de leur volume.
 - lien fort avec la discrétisation spatiale et temporelle de l'outil de simulation numérique



Définition et **mise en œuvre d'une méthodologie de développement** minimisant le nombre d'outils de pre et de post-processing, et garantissant la compatibilité transverse des formats de fichiers

L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

Etape 1 : l'extraction des informations géométriques de la maquette

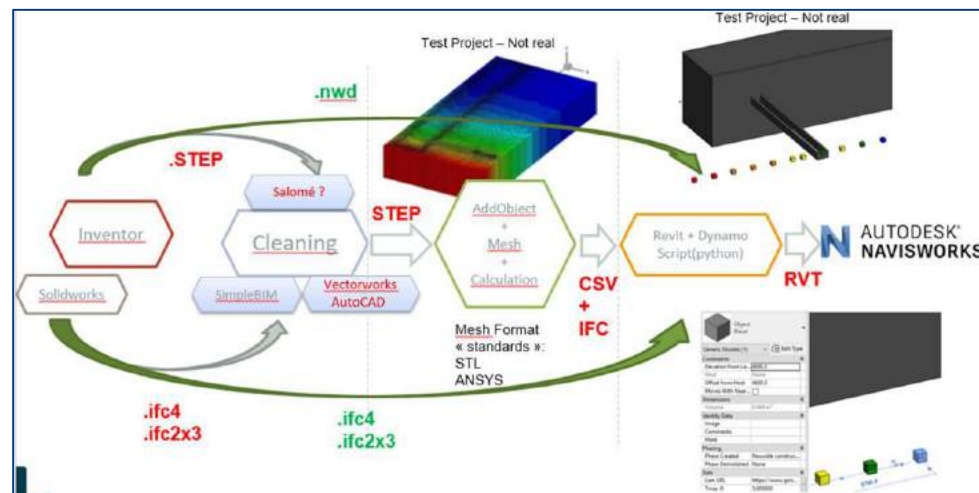
Choix d'un outil de pre et de post-processing combinant la CAO/génération de maillage et la visualisation intermédiaire de résultats

- o **Salomé** retenu parmi de nombreux outils analysés



Approche combinant 2 formats largement utilisées dans la communauté CAO et BIM :

- o « STEP » pour les actions CAO et maillage,
- o « IFC » pour les projections de résultats dans la maquette



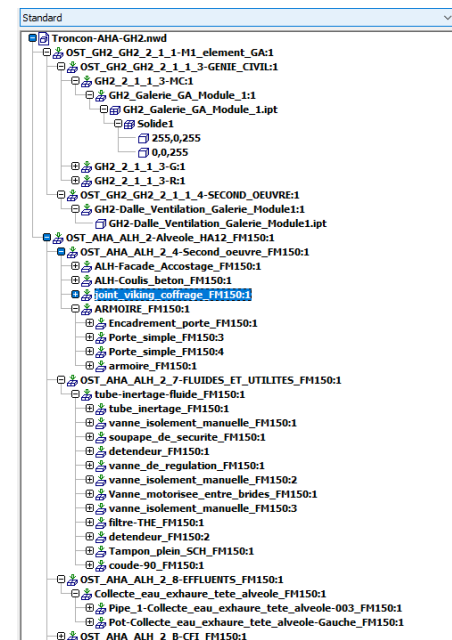
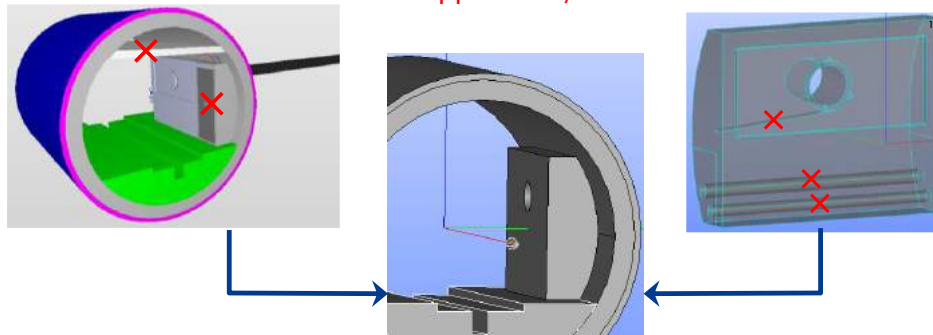
L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

Etape 2 : la conceptualisation du problème thermique (1/3)

Un besoin de **simplification géométrique** du détail exhaustif de la maquette, en lien avec la conceptualisation physique, et au juste besoin de représentation :

- Suppression des objets « inutiles » et remplacement/ajustement
 - Certaines réservations
 - Divers équipements (tuyaux, soupapes, joints...), etc...
- Modification éventuelle des objets (simplifications)
 - Massif d'accostage, coffrage,
- Ajouts d'objets
 - Callovo-Oxfordien sain et endommagé, jeux, remblai, ...

X : Suppression/modifications



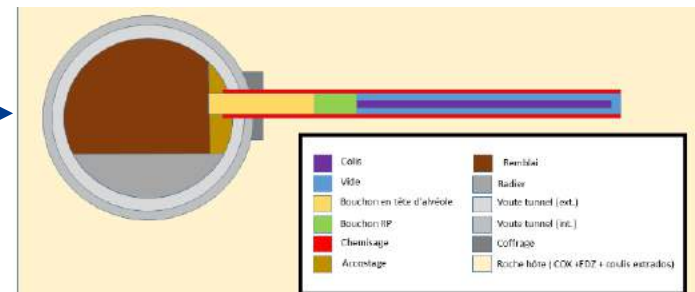
Arborescence objet de la maquette (extrait)

L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

Etape 2 : la conceptualisation du problème thermique (2/3)

Conceptualisation physique

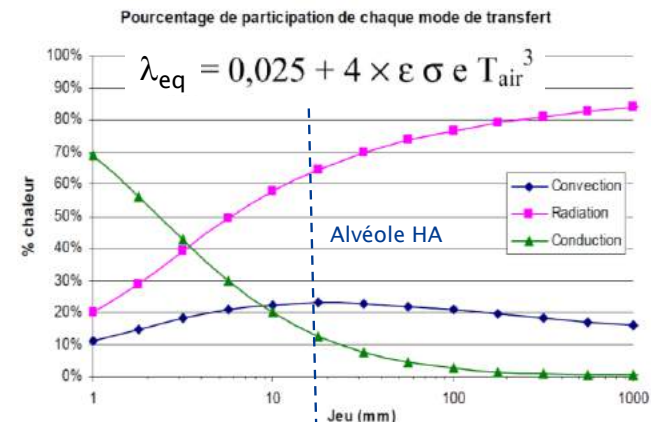
- propriétés thermiques des composants
- conditions initiales et aux limites
- Simplifications « ingénieur »



Jeu (chemisage/conteneur) représenté par une conductivité thermique équivalente

Conceptualisation numérique

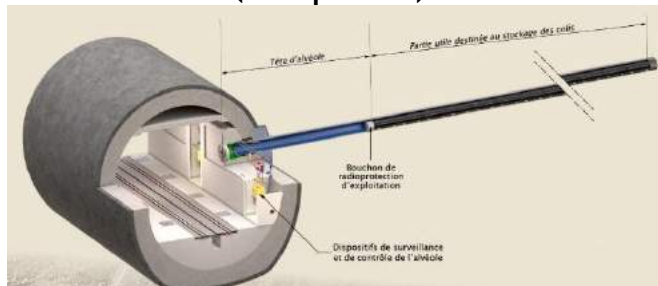
- Discrétisation
 - spatiale (maillage) avec spécification de raffinement local pour gérer les forts gradients
 - Temporelle : instant de résolution et de sauvegarde)
- Solveur/précision requise



L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

Etape 2 : la conceptualisation du problème thermique (3/3)

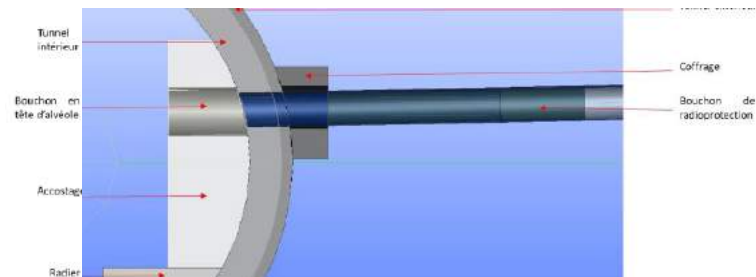
Géométrie détaillé « native » (maquette)



Simplifications
manuelles

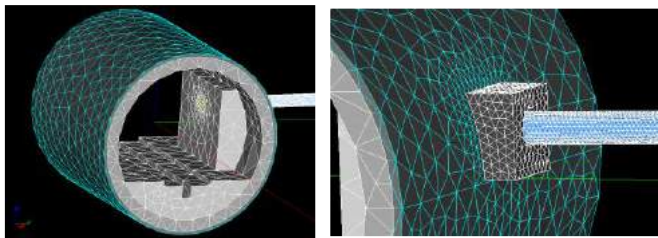


Géométrie simplifiée et nettoyée (maquette)



Maillage
tétraédrique

Géométrie maillée (Salomé)



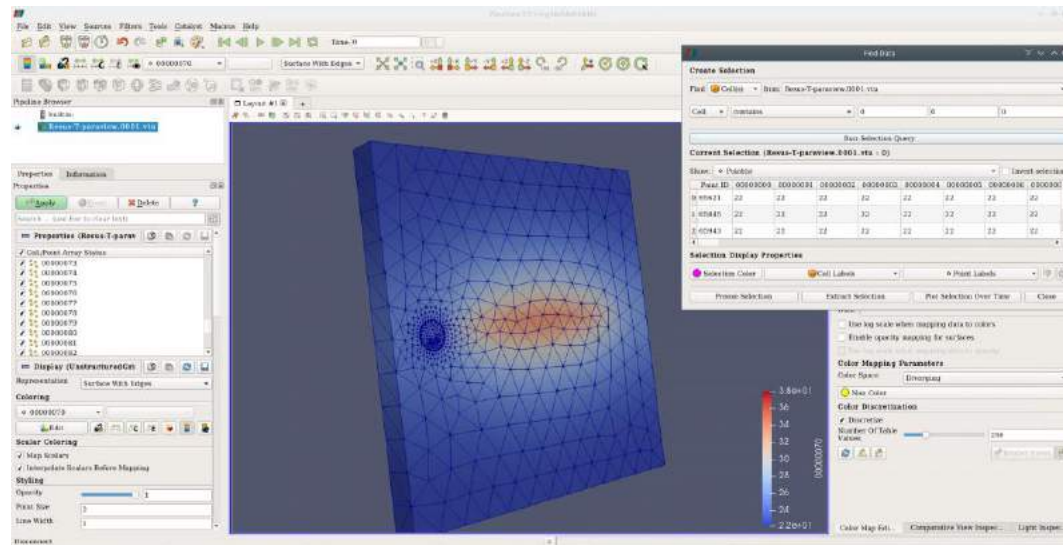
850 000 éléments

L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

Etape 3 : la simulation numérique

Simulation thermique

- Réalisée avec le code Cast3m
- Développement d'un script spécifique entre Cast3M et Salomé
- Vérification préliminaire des résultats avec Salomé avant projection sur la maquette



Cast3M

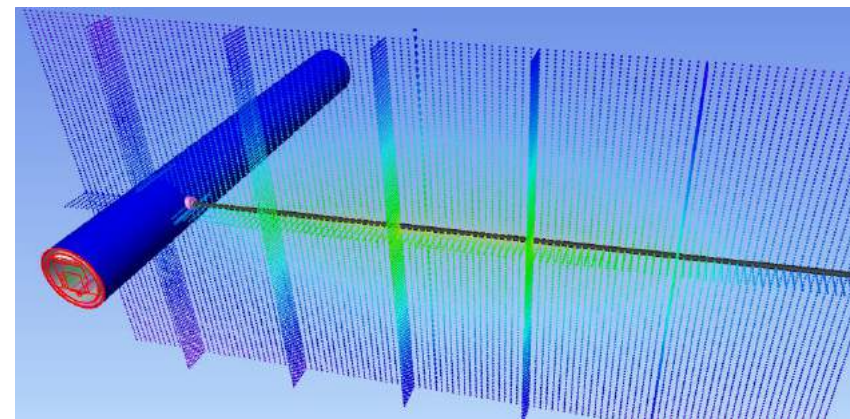
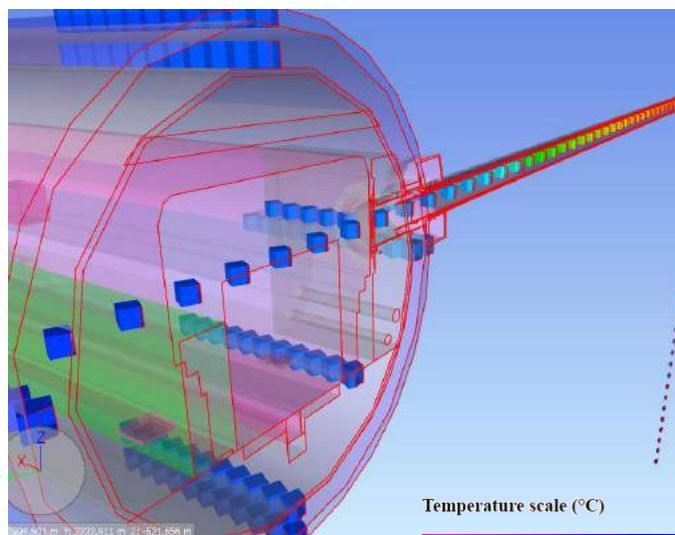


L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

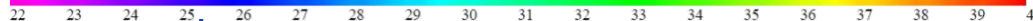
Etape 4 : la projection des résultats 3D sur la maquette (1/2)

Conversion des cartographies de résultats Cast3M en objets « cubes » compatibles avec les formats de la maquette :

- Nombre, position et taille des cubes ajustables (coupes possibles)
- Indépendamment de la discrétisation spatiale (maillage) du calcul



Temperature scale (°C)

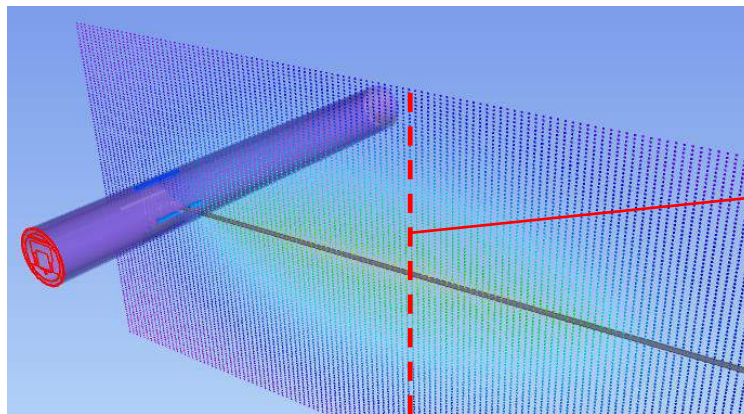


L'habillage thermique de la maquette numérique 3D de Cigéo

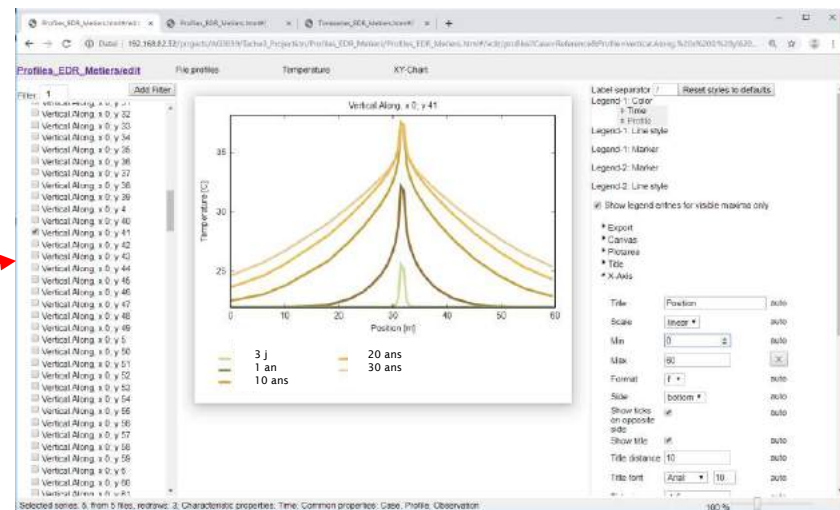
Etape 4 : la projection des résultats 3D sur la maquette (2/2)

Lien URL de tout cube vers un « EDR » (« Electronic Data and Result »)

- Evolution temporelle ou profils passant par ce point



Temperature scale (°C)



Conclusions/Perspectives

Faisabilité du processus d'habillage de la maquette numérique démontrée sur l'exemple « simple » de la thermique d'un alvéole HA et d'une portion de galerie

- Définition d'une méthodologie gérant les différentes difficultés
- Accès intuitifs aux résultats projetés dans la maquette grâce aux EDR
- Gestion des interfaces entre les métiers « scientifique/modélisation » et « BIM manager »
- Beaucoup d'opérations manuelles (conceptualisation, vérification, contrôle)

Travaux futurs

- Mise en œuvre et validation de la méthodologie sur des problèmes physiques plus complexes
 - Hydraulique-gaz, thermo-aéraulique, ... et/ou à plus grande échelle
- Intégration, via la méthode de projection sur la maquette, de données observées
 - Fusion de données (mesurées/simulées) pour affiner la compréhension phénoménologique du système
 - Contribution à la définition d'outils d'aide à la décision
- Accès, via le jumeau numérique, à une information d'indicateurs encore plus détaillée et continue.
 - Techniques de réduction de modèles (*thèse Andra/Inria en cours*) ou de meta-modèles adaptatifs pour accéder en temps réel à des niveaux d'informations encore plus pertinents.