

I – Introduction

L'énergie nucléaire en France est un enjeu majeur dû à son importance stratégique, et donc de même pour la sûreté dans le parc nucléaire français. Cependant, malgré leur entretien constant, il est possible d'observer un vieillissement des installations, augmentant donc la complexité de la maintenance et ainsi augmentant les coûts d'entretien et d'opération. Malgré l'amélioration continue, il y a toujours besoin d'outils plus prédictifs en amont des problèmes pour ne plus être dans la réaction, mais dans l'anticipation et ainsi réduire les risques et les coûts, les deux critères majeurs du domaine nucléaire. Ainsi, en réponse à ces demandes, les jumeaux numériques (ou digital twin) offrent une surveillance avancée, continue et précise avec des modèles prédictifs avancés et donc des actions avant même l'apparition des problèmes. [1]

Comment utiliser les Jumeaux Numériques pour améliorer la performance et la sûreté tout en anticipant des incidents ?

II – Concept des jumeaux numériques

Les jumeaux numériques sont des modèles numériques avec les particularités suivantes [1] :

- Réplique virtuelle du réacteur avec un lien continu virtuel/réel
- Production de données en continu à l'aide de capteurs complexes pour prédire l'état du réacteur
- Ne remplace pas l'humain.

Les objectifs des jumeaux numériques sont de **compléter** les systèmes de surveillance avec un retour du personnel sur site [2].

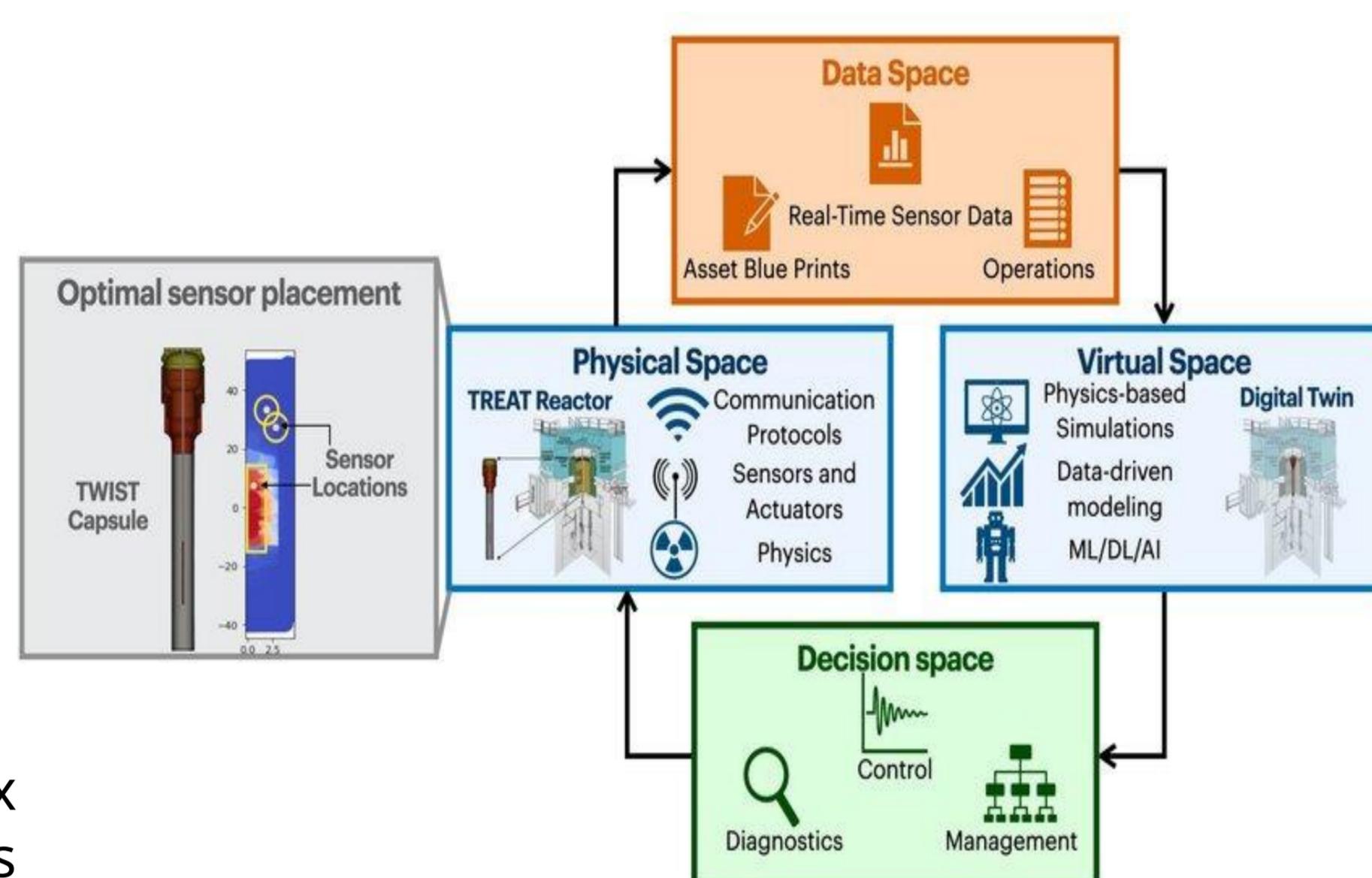


Figure 1 : Schématisation des jumeaux numériques pour les centrales
Source : N. Karnik et al (2024)

III – Source des données et correction

Les capteurs nécessaires aux simulations (physique/thermique/neutronique...) vont permettre d'obtenir les **données**, mais qui auront besoin d'une **correction spécifique** pour chaque centrale [3] :

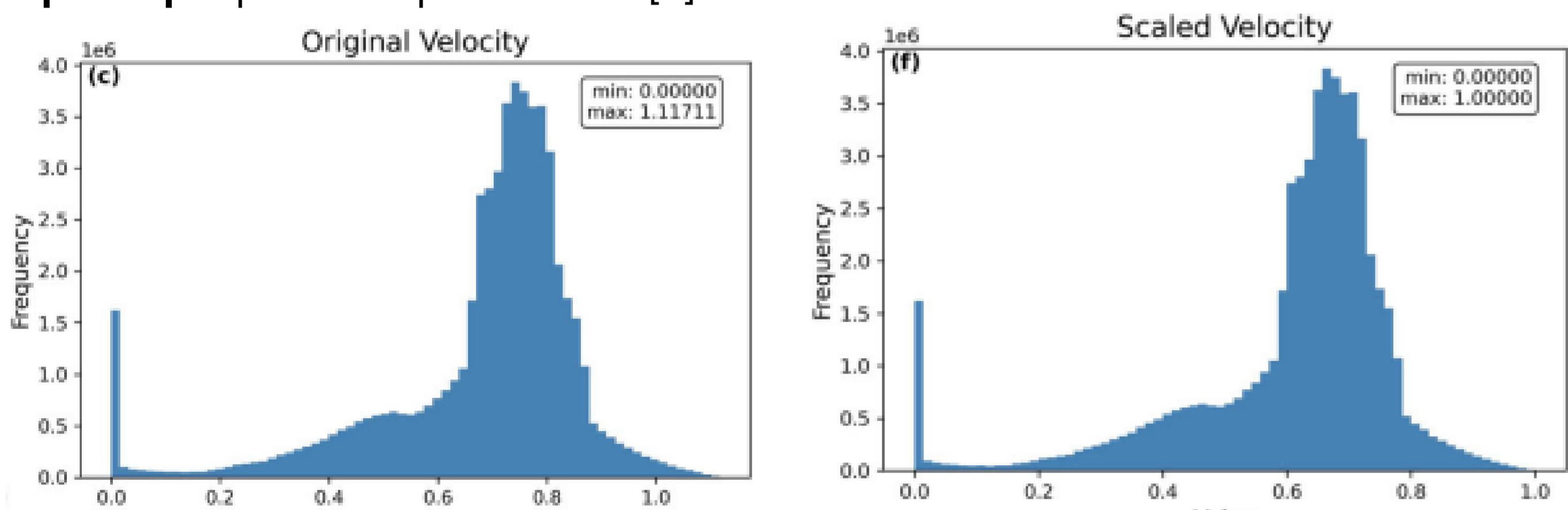


Figure 2 : Correction de la vitesse dans un système de refroidissement après récupération des données.
Source : Hossain, R and al (2025)

V – Coûts et résultats attendus

Réduction des incertitudes dans les modèles de sûreté, pouvant avoir un Impact et une contribution directe à l'entretien et à la sûreté

Déjà plusieurs projets financés actuellement :

- Etats-Unis : nombreux projets à hauteur de plusieurs millions de dollars
- France : Projet Réacteur Numérique -> plusieurs millions par PIA/EDF/CEA

Gains économiques des jumeaux numériques de manière générale :

- Objectif GEMINA : baisse des O&M de 13 → 2 \$/MWh [5]
- Mines de Charbon : baisse des coûts de maintenance de 12 à 23%

Rentabilité sur le long terme en plus des apports de sûreté

IV – Utilisation et application mondial

Ces données sont à condenser dans un modèle numérique qui va permettre de :

- Un suivi en condition normale pour s'assurer un fonctionnement optimal
- Une simulation d'événement catastrophe les théoriques multiples. (malveillance/accident)
- Des suivis à très long terme pour voir les éventuels dysfonctionnements

Ces pays ont d'ailleurs commencé des recherches de laboratoires ou d'université et également des installations avec des entreprises du nucléaire pour utiliser et développer des jumeaux numériques comme :

Etats-Unis / France / Corée / Chine / Russie / Royaume-Uni / Allemagne [4,5]

Avec comme exemples internationaux majeurs :

- **APR1400 (Corée)** : virtualisation MMIS, suivi avancé
- **GEMINA (USA)** : réduction drastique des coûts O&M
- **EDF/CEA (France)** : Projet de recherche, simulation complète



Source des données : Hu Mengyan and Al (2024)
Figure 3 : Carte du monde des principaux pays impliqués dans les jumeaux numériques appliqués au nucléaire

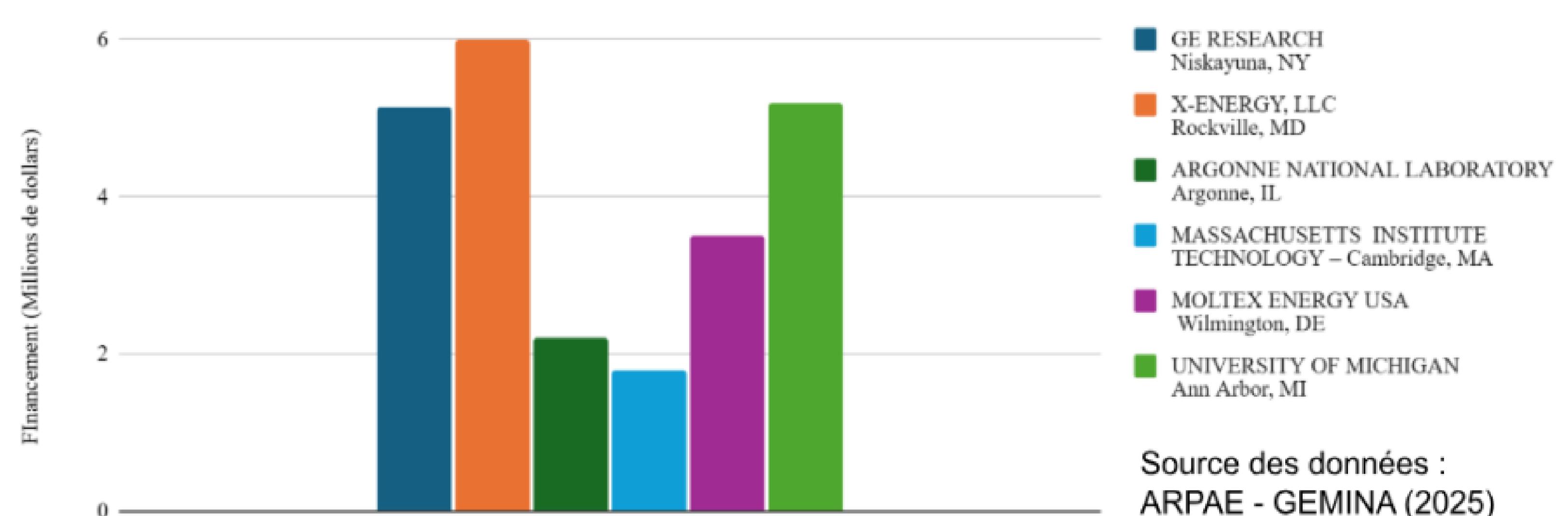


Figure 4 : Budget (en millions de \$) alloués à des recherches sur les digital twin aux états unis
Source des données : ARPAE - GEMINA (2025)

Conclusion

Les jumeaux numériques sont un atout majeur pour les installations nucléaires mondiales, avec un potentiel quasi sans limite avec l'augmentation du niveau technologique associé, ainsi à l'avenir cela pourrait se retrouver dans une majorité de ce genre d'infrastructure en tant qu'atout majeur de sûreté, de prédition et d'économie.

Comme toute technologie elle comporte des risques et des limites à prendre en compte, par exemple l'installation des capteurs sur site est extrêmement technique et va devoir être adapté avec des simulations précises pour chaque infrastructure, demandant une très grande rigueur. Mais également des risques d'incident comme par exemple le risque de malveillance avec la modification des modèles numériques pouvant altérer la prise de décisions et mettre en danger le site en lui-même.

Il existe un grand nombre d'axes d'améliorations envisageable comme un éventuel couplage avec de l'intelligence artificielle qui pourrait faire des propositions d'interventions selon les résultats de simulations.

Bibliographie

- [1] Adolphus Lye and al, (2025) Physics-enhanced machine learning for probabilistic risk assessment in nuclear safety: An overview, recent developments, and perspectives, Annals of Nuclear Energy, Volume 222, 111562, ISSN 0306-4549
- [2] Kropaczek and al (2023). Digital Twins for Nuclear Power Plants and Facilities. Dans Digital Twin (p. 971-1022).
- [3] Hossain, R et al. (2025) Virtual sensing-enabled digital twin framework for real-time monitoring of nuclear systems leveraging deep neural operators. npj Mater Degrad 9, 21.
- [4] Hu Mengyan and al, (2024) Current status of digital twin architecture and application in nuclear energy field, Annals of Nuclear Energy, Volume 202, 110491, ISSN 0306-4549
- [5] Advanced Research Projects Agency-Energy. (2025, avril). GEMINA: Generating Electricity Managed by Intelligent Nuclear Assets – Project descriptions (R25.1). U.S. Department of Energy.