

L'Intelligence Artificielle, quel rôle pour l'Industrie Nucléaire?

Gabriel Thomas
V&V Leader





Objectifs de la conférence

1. Positionnement
2. L'IA : son histoire, ses différentes incarnations
3. Industrie Nucléaire : quels métiers peuvent profiter de l'IA?
4. Aspects sociétaux
5. Conclusions



1.

Positionnement de l'orateur

IA :

acteurs,
producteurs,
consommateurs,
législateurs

Légitimité : bonne question !



Nucléaire : sujet très technique et à fort impact sociétal



2.

De l'Intelligence Artificielle

L'IA des origines



On parle de **réseaux de neurones** dès 1957 : l'intelligence artificielle a ensuite évolué, en raison des progrès technologiques (puissance de calcul). Mais qu'est-ce-que l'IA ?

BACKWARD CHAINING

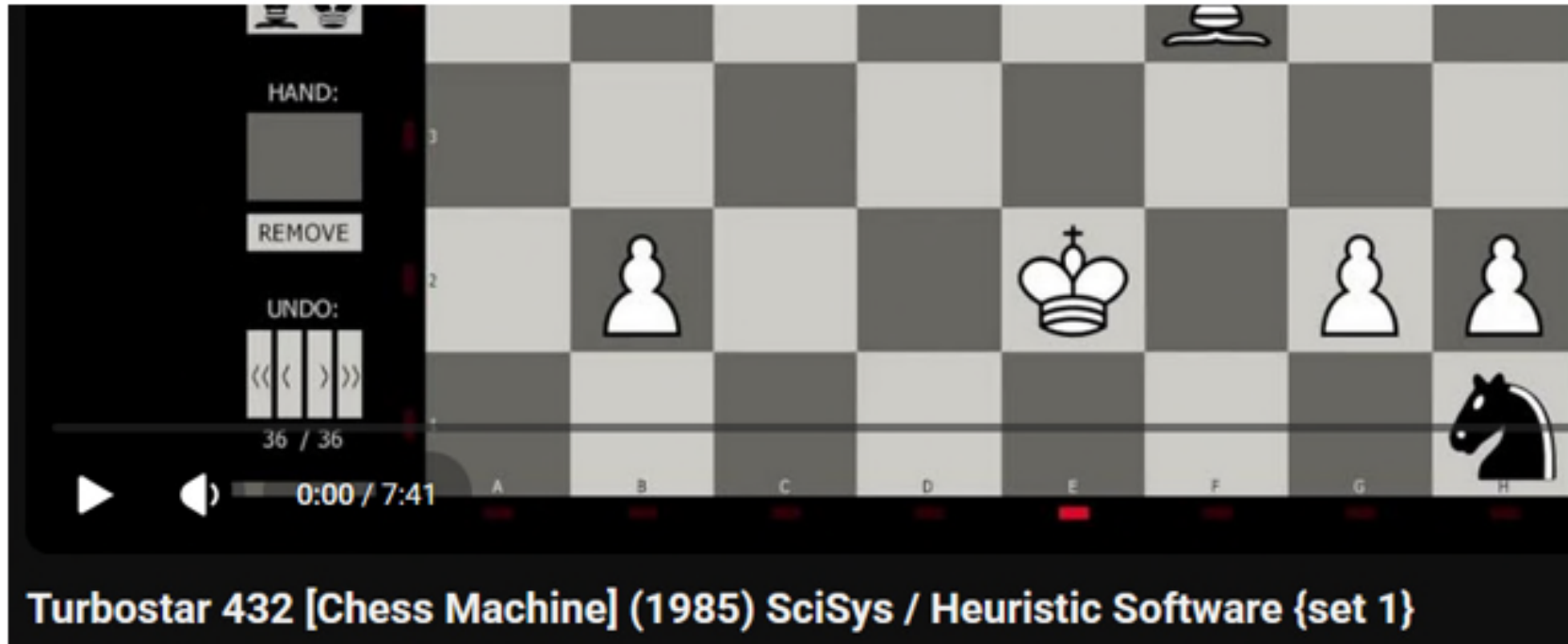
GOAL: Make \$20.00

RULE: If the lawn is shaggy and
the car is dirty and you mow
the lawn and wash the car,
then Dad will give you \$20.00



Extrait d'un système expert (années 80) : source Wikipédia

Un « jumeau numérique » archaïque

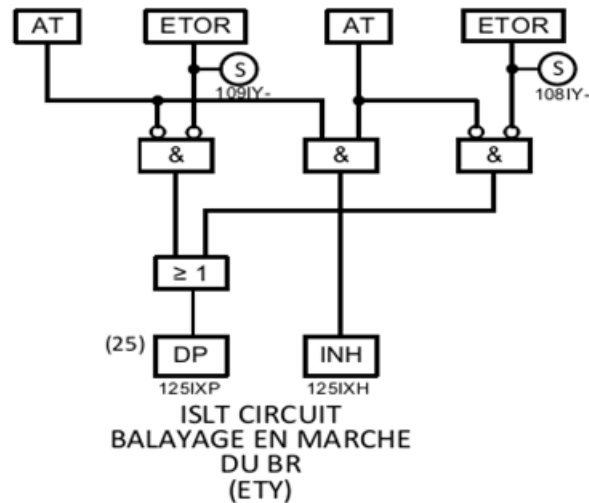


A Chess simulator (source YouTube)

Ce jeu « intelligent » utilise une ou plusieurs heuristiques en explorant un arbre de possibilités, et joue selon le meilleur score qu'il a obtenu. Son niveau est notamment lié à la profondeur d'analyse.

Usage historique d'une IA dans le nucléaire : le contrôle-commande numérique

1984-86 : première mise en exploitation de contrôle-commande numérique en France,
sur le palier 1300MW



Le système I&C est parfois appelé le « cerveau » de la centrale

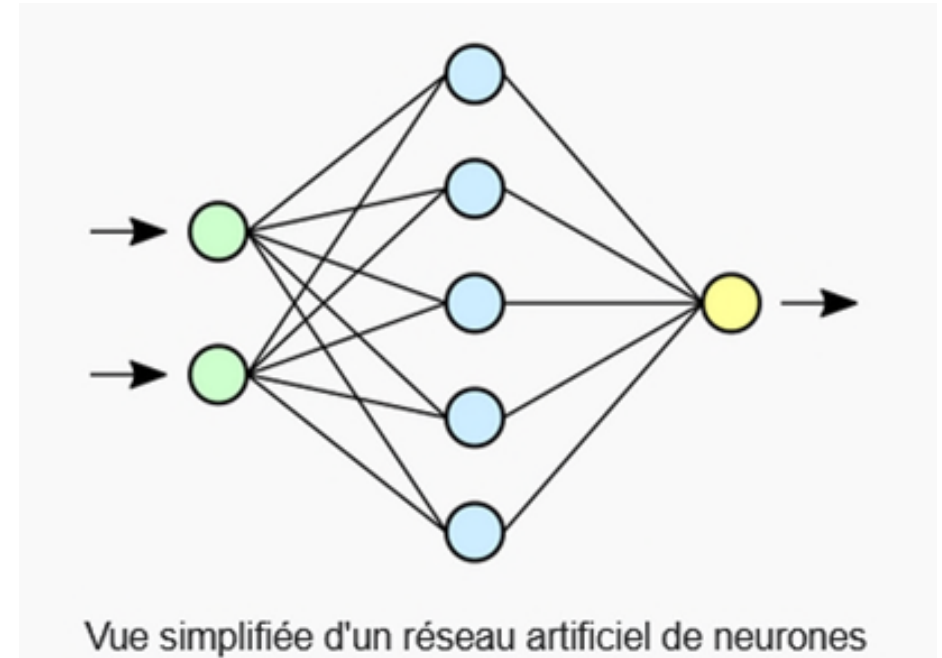
- Réception de signaux : « sens »
- Traitement : mise en forme de l'information « nerfs »
- Calculs divers : « pensée »
- Prise de décision : vote, partie intelligente « conscience »
- Emission de commandes d'actions : rôle actif « nerfs »

*Calcul booléen, système SPIN (Merlin-Gerin / Framatome) : similaire à un système expert évolué.
En revanche le système ne sait pas apprendre de son expérience.*

Naissance de l'IA « moderne » : utilisation des réseaux de neurones

Le **Machine Learning** (apprentissage automatisé) a pu être employé quand les processeurs ont eu suffisamment de puissance : années 90.

- Algorithmes en constante amélioration contenant des réseaux de neurones (NN = neural networks). A base d'optimisation mathématique en grande dimension.
- Deep Learning, Data Science sont utilisées en entreprise
- Nombreuses applications industrielles depuis environ 2010
- Recherche toujours active



Source : Wikipédia

Qu'attend-on de l'IA dans l'Industrie nucléaire ?



C'est notre problématique : une nouvelle technologie pourquoi ?

→ Améliorations diverses et ROI : un peu vague !

- > Absorption et analyse de multiples données
- > Accélération de procédé, automatisation
- > Qualité de process (exhaustivité, fiabilité)
- > Décision « intelligente »
- > Apports Recherche & Développement
- > ...



3.

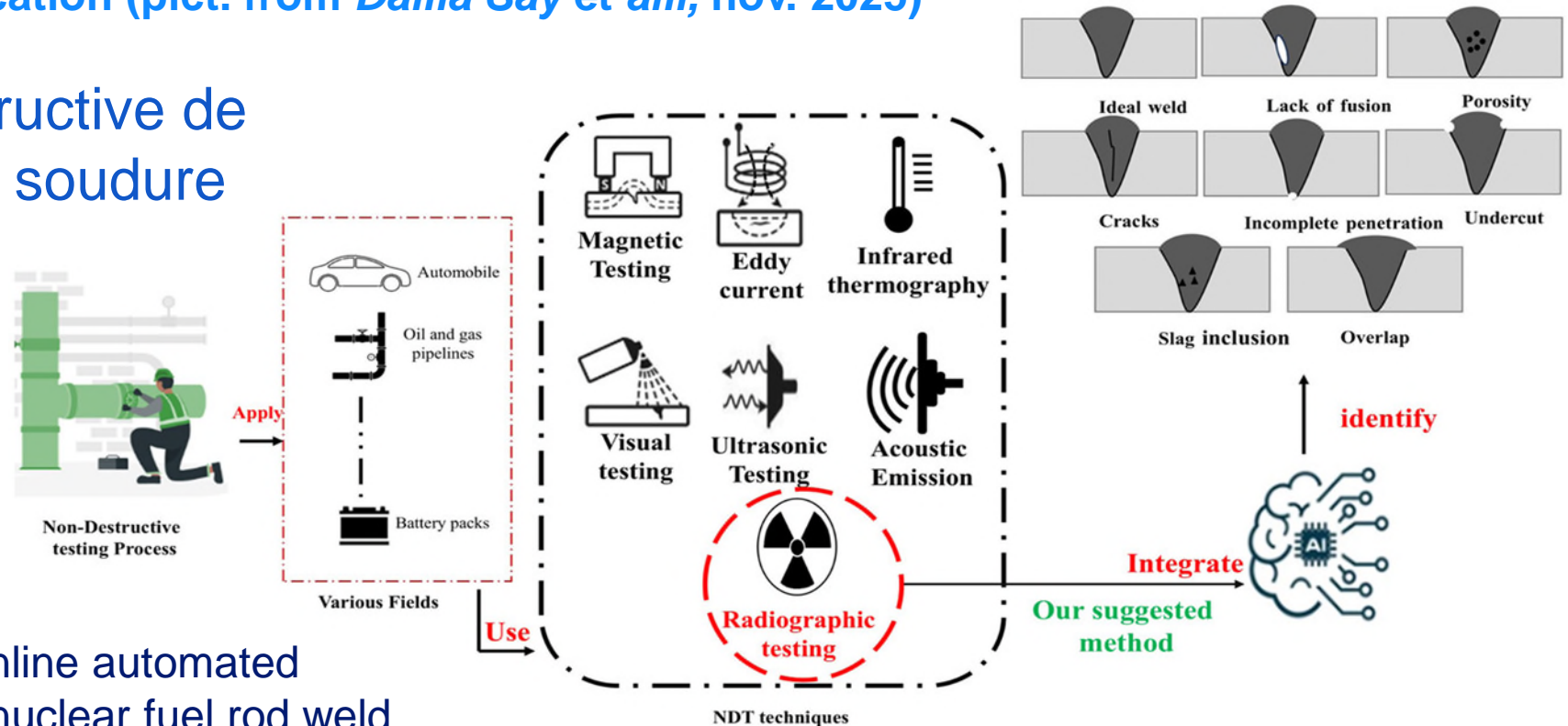
Quelques applications dans l'Industrie Nucléaire

- > Soudure
- > Gestion des exigences
- > Jumeaux numériques dans le nucléaire
- > Fusion nucléaire

Utilisation Industrielle du Machine Learning : la soudure (1/2)

AI-aided welding verification (pict. from *Dalila Say et alii*, nov. 2025)

Méthode non destructive de labélisation d'une soudure

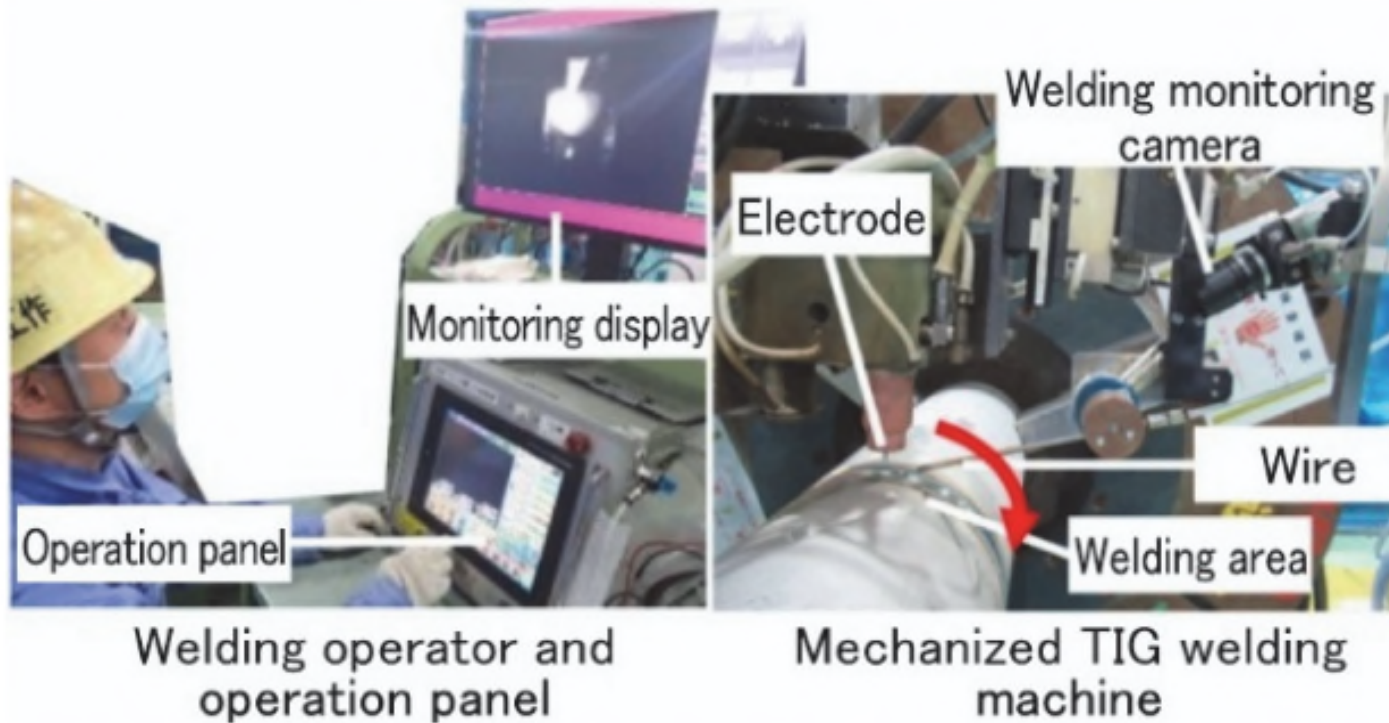


28 October 2024 An online automated evaluation system for nuclear fuel rod weld seam inspection

[Xiaogang Zhang](#), [Dongbao Yu](#), [Hui Tang](#),
[Shaoxing Wang](#)

Utilisation Industrielle du Machine Learning : la soudure (2/2)

Development of Welding Technology with AI (*Yasuda et alii*, Mitsubishi 2025)



Operation of automatic TIG (Tungsten Inert Gas) welding

Rupture - l'IA générative (depuis 2020)

L'IA **générative** (capable de comprendre une demande en langage naturel et de répondre) a fait son apparition publique à partir de 2020 :

- Algorithmes d'apprentissage profond (Deep Learning) + introduction de *Transformer* (chercheurs de Google) sur une quantité gigantesque de données (LLM = Large Language Model)
- Capable de s'améliorer par l'utilisation (expérience/mémoire)
- Utilisée pour exécuter des tâches répétitives ou créatives, publiques ou privées
- En cours d'adoption dans de nombreux secteurs industriels
- Questions éthiques évidentes

IA générative et gestion documentaire (1/4)

On liste de nombreux cas d'usage :

- Trouver une information noyée dans des centaines de documents
- Gérer l'adéquation aux exigences (*requirements traceability*)
- Comparaison de documents
- Transfert de connaissances (*knowledge management*)
- Créer des documents réglementaires conformes



Réaliste 😊

ou juste du rêve ?

IA générative et gestion documentaire (2/4)

Initiative Microsoft / NVIDIA (source l'USINE DIGITALE – mars 2026), **SMR** et **AMR** aux USA

- > **Aalo Atomics** a réduit de 92% le temps de procédure d'autorisation grâce aux solutions d'IA générative de Microsoft (~80 millions de dollars économisés par an) : <https://www.youtube.com/watch?v=qF73FLqvJC4>
- > **Southern Nuclear** a déployé des *agents* basés sur *Microsoft Copilot* pour *améliorer* la cohérence et la prise de décision
https://www.southernnuclear.com/news-center/innovation/2025-1003-ai_innovation_award.html
- > **Idaho National Laboratory** a automatisé des rapports d'ingénierie et de sûreté grâce à l'IA : accélération de processus réglementaires
<https://carboncredits.com/nvidia-and-idaho-national-laboratory-launch-ai-project-to-cut-nuclear-build-time-in-half/>



IA générative et gestion documentaire (3/4)

Analyse d'une exigence, parmi quelques centaines parfois ...

Document spécifications système :

- REQ_KS_124 / « the KS system should send on the surveillance network both redundant commands *TEST RAZ UD* and *DESACT UD*. »
- REQ_KS_100 / « SRV networks should be refreshed at least every 200ms. »

Document interne de conception :

KS_DESIGN-R407 / « signals *TRZ_UDi* and *DES_UDi* are emitted by the *KSVi* units, on networks *SRVA* and *SRVB* respectively, at least every 200ms»

Couverture ou pas couverture?

Document de spécification des tests :

VV_KSV#136 (KS_DESIGN-R401 à KS_DESIGN-R459) : vérifier que le logiciel de KSV émet toutes les 100ms les données rafraîchies, sur le réseau SRV

IA générative et gestion documentaire (4/4)

- Structurer les données
- Former les utilisateurs
- Accélérateur
- Supervision et décision laissées à l'humain (*éviter certaines hallucinations par exemple*)

Conclusion

L'IA et la gestion des exigences

↳ On garde la tête froide



Source : <https://www.linkedin.com/pulse/l'impact-r%C3%A9el-de-lia-sur-la-gestion-des-exigences-m%C3%A9tier-julien-mer-mjr0f/>

Jumeaux Numériques (1/2) - Y a-t-il de l'IA là-dedans?

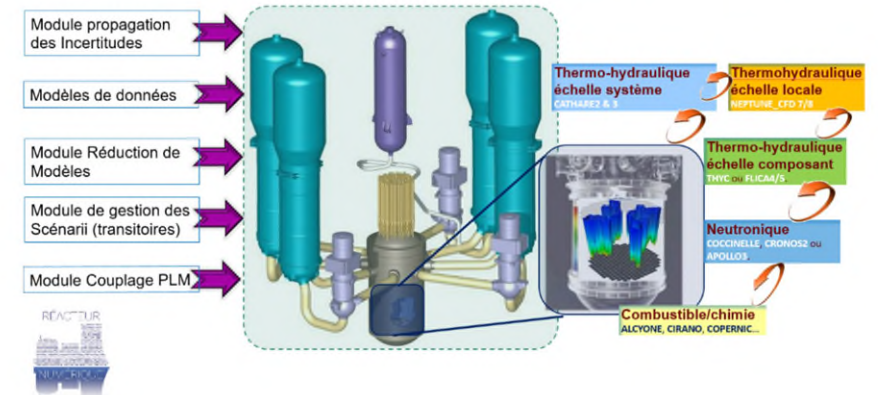
Ce qu'on entend par **jumeau numérique** → modèle numérique, souvent en 3D, qui reconstitue un objet ou un système très fidèlement, notamment dans son fonctionnement.

Exemples : projet « Réacteur Numérique » de CORYS et Université de Lorraine (thèse G. Hequet 2024), pour la simulation de conduite d'un réacteur

Le simulateur est connecté à de très nombreuses données, et est en capacité de gérer :

- Les modèles de calcul de physique nucléaire et fluide
- Le vieillissement, les dysfonctionnements
- Le contrôle-commande et la sûreté

PRODUIT 1 : BANC D'INTEGRATION POUR LES ETUDES



➤ *IA : piste pour améliorer des modèles complexes internes au jumeau numérique*

Jumeaux Numériques (2/2) - Utilisation d'IA générative

Révolutionner l'intervention en milieux complexes : L'IA et les Jumeaux numériques en synergie pour des solutions innovantes et efficaces.

Cette thèse propose de développer une architecture d'IA générative enrichie par des données métiers et accessible via la réalité mixte, permettant à un opérateur de boîte à gants de poser des questions en langage naturel. Les travaux incluent : 1. Une revue de l'état de l'art sur la génération augmentée (RAG), les technologies ASR/TTS et les JN. 2. Le développement et l'intégration d'un chatbot pour l'exploitation nucléaire. 3. L'évaluation des interactions humain-IA et la définition de métriques d'efficacité et d'adoption.



*Thèse ENSAM en cours,
Nellou MICHEL sous la direction
de J-R Chardonnet*

L'IA générative pour « créer » de la connaissance scientifique ?

Evo 2, une intelligence artificielle générative, comprend le langage génétique et parvient à l'imiter et même à le modifier, générant des génomes qui n'existent pas dans la nature.

https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/intelligence-artificielle/cette-ia-peut-creer-de-nouveaux-genomes-qui-n-existent-pas-dans-la-nature_191701

→ Et dans le **nucléaire**?

Utilisation Scientifique du Machine Learning : contrôle de la fusion dans un Tokamak (1/2)

➤ Autre prouesse

La prédiction des disruptions, ces instabilités soudaines qui peuvent endommager les réacteurs. Des modèles d'apprentissage automatique, utilisant des réseaux de neurones, sont capables d'identifier les signaux précoces de telles instabilités.

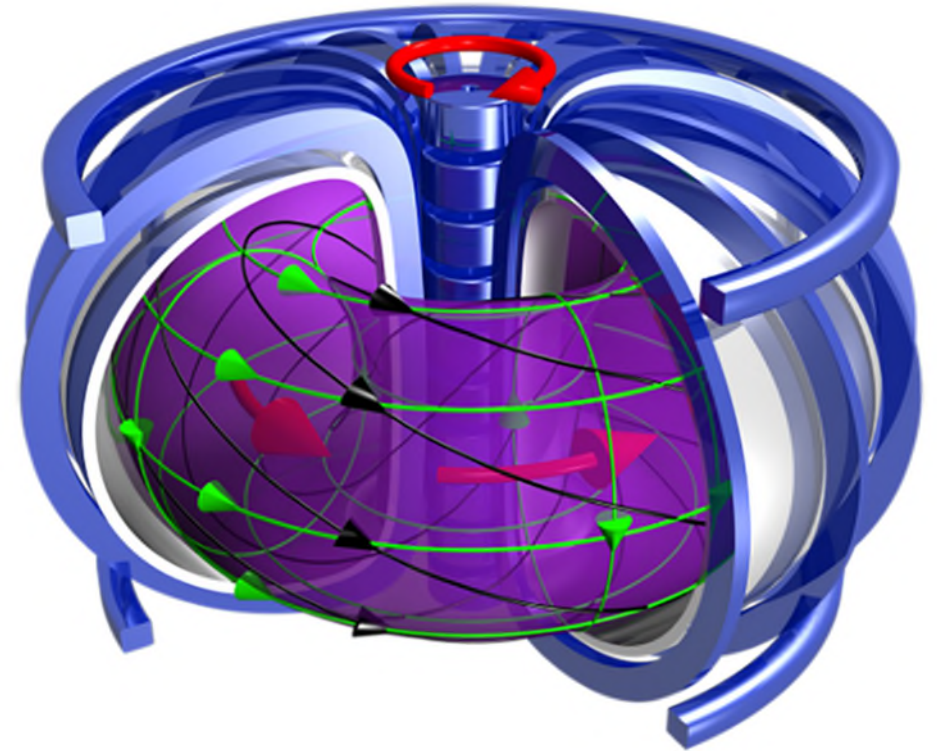
➤ Cas d'usage

Tokamak DIII-D aux États-Unis : une IA entraînée uniquement sur des données expérimentales de ce tokamak a pu anticiper une disruption, 300 millisecondes à l'avance, donnant au système le temps de réagir. Cette **approche sans modèle physique**, c'est-à-dire basée uniquement sur une IA analysant en temps réel les données du réacteur (*data-driven*), a permis d'activer des systèmes d'atténuation (par exemple injection d'impuretés ou modulation des champs) à temps, ce qui a stabilisé le plasma.

Concept : modèle physique prédictif non explicite (pas d'équation), mais contenu dans le « code » calculé par l'IA (coefficients optimaux des réseaux de neurones sous-jacents).

Utilisation Scientifique du Machine Learning : contrôle de la fusion dans un Tokamak (2/2)

Une intelligence artificielle développée par [DeepMind](#) et le *Swiss Plasma Center* a été utilisée pour **contrôler en temps réel la forme et la position du plasma** en utilisant *l'apprentissage par renforcement profond*. Les ajustements de l'IA se font en temps réel, à l'échelle de la milliseconde, ce qui correspond aux temps caractéristiques de l'évolution des instabilités dans un plasma de tokamak. Ainsi, l'algorithme peut ajuster les champs magnétiques de manière dynamique pour maintenir le plasma stable, une première mondiale publiée dans la revue [Nature](#).



Source image : <https://www.iaea.org/fr/energie-de-fusion/la-fusion-par-confinement-magnetique-tokamaks-et-stellarators>

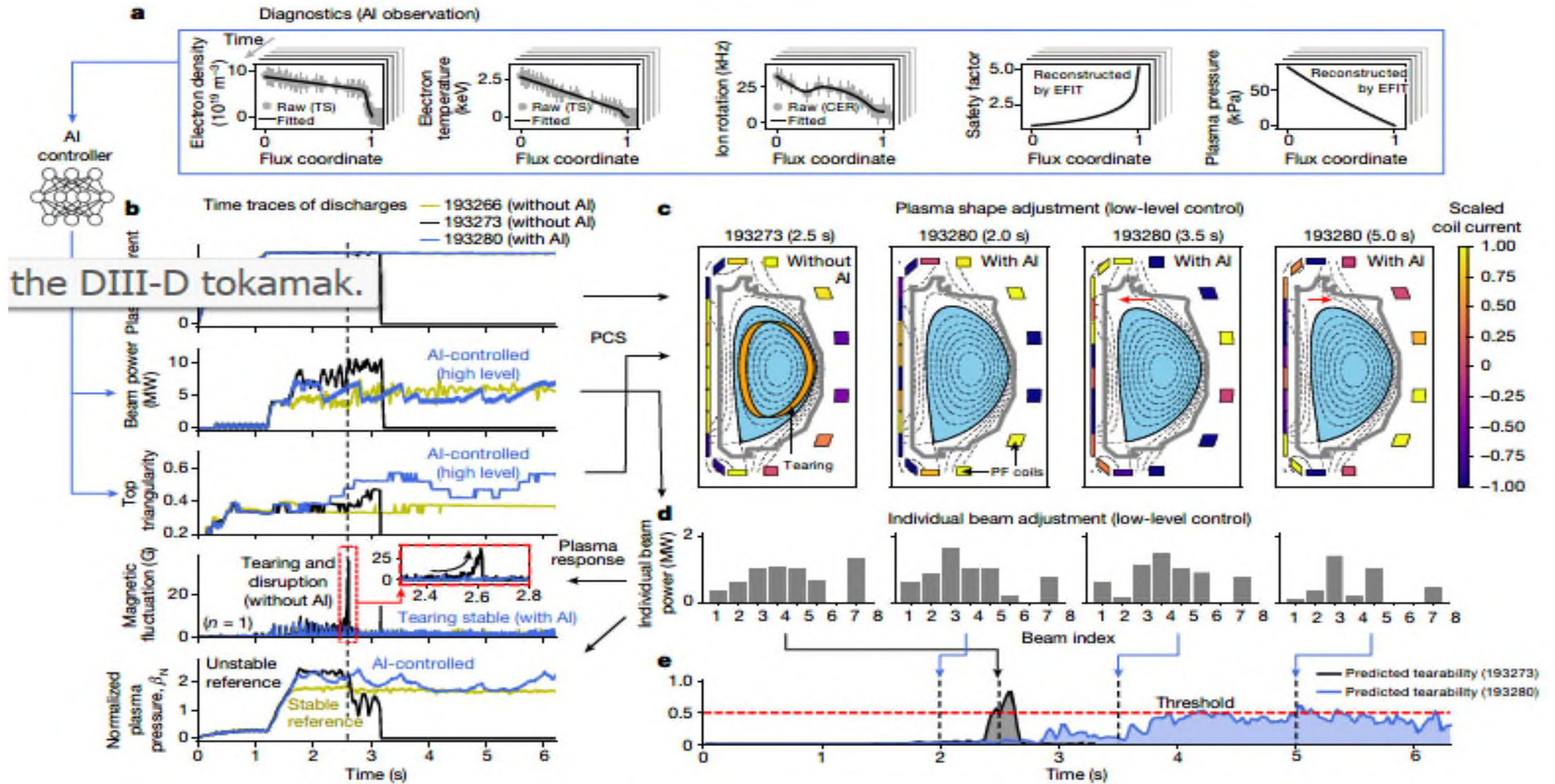


Fig. 3 | The AI-based tearing-avoidance experiments in DIII-D. a, The

current control by the PCS and the plasma boundary variation. Scaled currents

Utilisation Scientifique du Machine Learning : fusion inertielle par tirs lasers

Ici encore, l'IA change la donne. À l'Université de Rochester, aux États-Unis, une IA a été entraînée à optimiser la forme des impulsions laser sur le système OMEGA (le plus puissant laser académique au monde, dédié à la recherche sur la fusion par confinement inertiel). OMEGA génère ces tirs avec précision, et des diagnostics mesurent les résultats à des échelles de millièmes de mètre et de trillionèmes de seconde.

L'IA est aussi utilisée pour corriger les simulations, combler les écarts entre théorie et réalité, et proposer des conceptions inverses : on fixe un objectif (par exemple, atteindre l'ignition) et l'IA propose le meilleur design pour y arriver. C'est ce qui a permis, fin 2022, à NIF d'atteindre pour la première fois un rendement de fusion supérieur à l'énergie injectée par les lasers, un jalon historique.



Source image :
Sfen, RGN avril 2025

Fusion nucléaire : conclusion



Sujet long terme, quatre défis majeurs

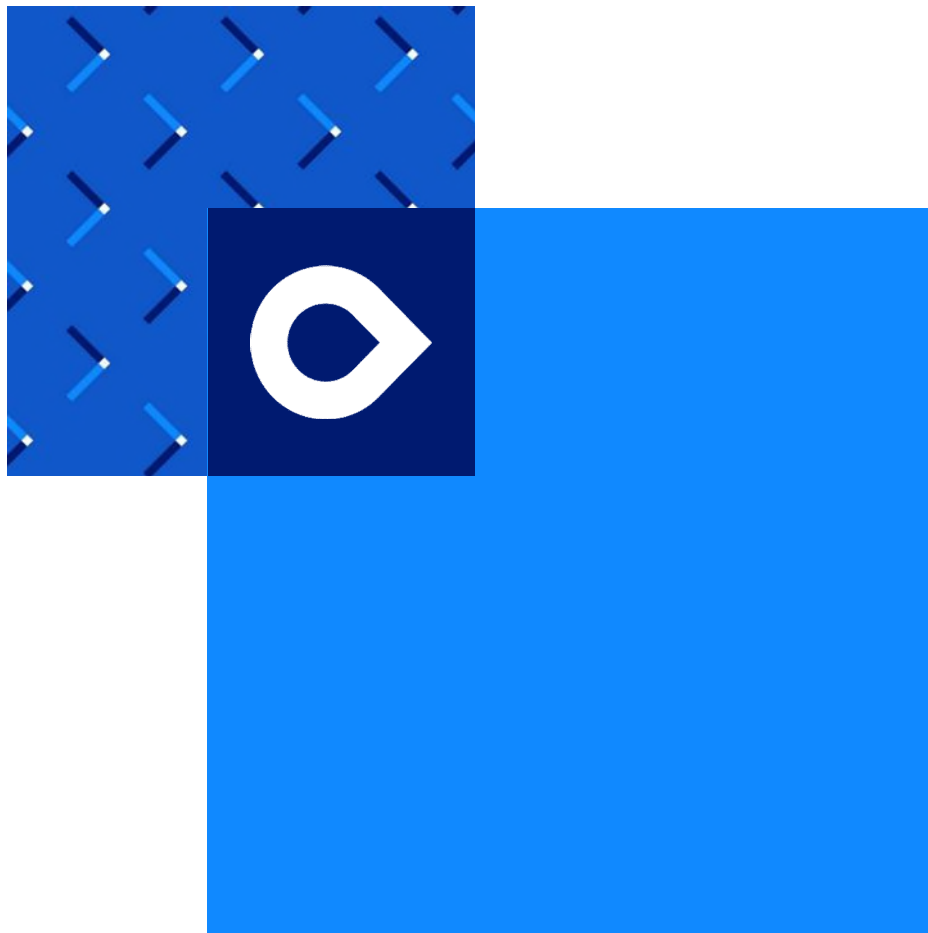
1. Trouver des matériaux capables de résister à de puissants flux de neutrons
2. Atteindre un fonctionnement en régime permanent
3. Gérer des charges thermiques extrêmes
4. Optimiser le cycle du combustible de fusion



Utilisation de l'IA générative

- Recherche virtuelle de nouveaux matériaux : Microsoft MatterGen
- Modélisation Physique avec une plateforme d'IA : LLM dédié
- Gestion des données multimodales par IA générative
- IA agentique : agrégation de plusieurs systèmes utilisant de l'IA, avec une « tour de contrôle » qui comprend les consignes ou demandes en langage naturel

« Intérêt de l'apprentissage automatique, en particulier les modèles informés par la physique, qui utilisent des lois du monde réel pour prévoir les comportements »



4.

Questions sociétales

Ethique

L'IA générative fascine certains technologues ...
... et questionne par des problématiques
souvent anticipées par la Science-Fiction



- Comment appréhender la sûreté? Algorithmes pas tout à fait déterministes - travaux internationaux en cours
- Au niveau européen : AI Act (2024-2025 ...) pour contrôler les usages « dangereux » de l'IA
- Société des robots et des humains augmentés, quel rôle pour le travailleur ?
- L'IA aux commandes : cas de la défense
- Fabriquer des centrales nucléaires pour l'IA ? Cercle vicieux ou vertueux ???

Framatome, acteur de la communauté IA



Utilisation

1. **Exploration de ces sujets au sein notamment de ses programmes de R&D.**
2. **Travaux interne en robotique, inspection, simulation numérique, neutronique, documentation, ingénierie des systèmes ...**



Réflexion

1. **Acceptabilité par l'ASNR : échanges actuels avec ASNR dans le cadre AIEA d'un côté (coparticipation à la rédaction d'un TECDOC en cours de diffusion)**
2. **Livre blanc : IA en sûreté, rédaction d'un guide pour un usage fiable des métamodèles en étude de sûreté**



5.

Conclusions

Conclusions



- L'IA avancée offre de nouveaux paradigmes, y compris pour la recherche scientifique
- On ressent parfois un vertige, en rapport avec son efficacité déraisonnable
- L'attitude à adopter concernant son usage propre dépend de chacun, mais pourrait influencer « son avenir personnel »
- Le contrôle de l'utilisation des IA est un sujet
- L'Industrie Nucléaire est en train d'intégrer « des IA »





Questions / Débat

Gabriel Thomas
gabriel.thomas1@framatome.com

Éléments bibliographiques



<https://reqi.io/articles/how-ai-transforms-requirements-management-for-systems-engineers>

<https://www.cio-online.com/actualites/lire-ia-agentique-fdj-united-parie-petit-mais-vise-gros-16905.html>

<https://www.iter.org/fr/actualites-iter/lia-dope-linnovation-dans-domaine-fusion>

<https://www.capgemini.com/fr-fr/perspectives/blog/ia-agentique-dans-le-nucleaire>

<https://www.mandarine.academy/ou-en-est-l-ia-aujourd'hui-4-categories-d-intelligence-artificielle/>

<https://www.cgi.com/fr/baladodiffusion/energie-services-publics/intelligence-artificielle-generative-valeur-jumeaux-numeriques-donnees-fiabiles>

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/fusion-fusion-nucleaire-ce-intelligence-artificielle-sait-faire-plasma-laisse-chercheurs-voix-126066/>

Gopaldaswamy, V., Williams, C.A., Betti, R. et al. Demonstration of a hydrodynamically equivalent burning plasma in direct-drive inertial confinement fusion. Nat. Phys. 20, 751–757 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02361-4>

Éléments bibliographiques



Seo, J., Kim, S., Jalalvand, A. et al. Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning. Nature 626, 746–751 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07024-9>

<https://araiko.ai/blog/cas-dusage-1--trouvez-instantanement-une-informati>

<https://www.iaea.org/fr/bulletin/renforcer-la-production-denergie-nucleaire-grace-a-lintelligence-artificielle>

<https://www.usine-digitale.fr/big-tech/microsoft/simplifier-les-procedures-reglementaires-acceler-er-la-conception-des-centrales-et-optimiser-leur-exploitation-pourquoi-microsoft-et-nvidia-unissent-leurs-forces-dans-le-nucleaire.6ZFAOO2YPFC5PE3FEINI7KQH6E.html>

<https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/sept-contributions-de-lia-au-progres-de-la-science-et-de-la-technologie-nucleaires>

<https://www.edf.fr/groupe-edf/inventer-l-avenir-de-l-energie/rd-un-savoir-faire-mondial/les-pepites-de-la-rd/le-reacteur-numerique/la-pepite-en-un-clin-d-oeil>

https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/intelligence-artificielle/cette-ia-peut-creer-de-nouveaux-genomes-qui-n-existent-pas-dans-la-nature_191701