



RAPPORT

D'ACTIVITÉ

2024



**Le CEA-List, implanté sur les centres CEA Paris-Saclay et Grenoble, est l'institut de recherche technologique du CEA dédié aux systèmes numériques intelligents.** Structurés autour des thématiques de l'intelligence artificielle, la confiance numérique et l'industrie du futur, ses programmes de R&D se déclinent dans plusieurs domaines applicatifs au service de la compétitivité industrielle. Les 1000 ingénieur.e.s-chercheur.euse.s et technicien.ne.s du CEA-List mettent ainsi leurs expertises au service des enjeux socio-économiques majeurs en concevant des innovations technologiques à haute valeur ajoutée, centrées sur l'humain et porteuses de valeurs de responsabilité sociale et environnementale. La qualité de sa recherche partenariale a valu au CEA-List d'être labellisé Institut Carnot en 2020, pour la 4<sup>e</sup> fois consécutive depuis 2006.



[list.cea.fr](http://list.cea.fr)



# Éditorial

→ Le revirement spectaculaire de la politique américaine et des relations transatlantiques marque un tournant qui vient confirmer s'il le fallait la nécessité pour l'Europe d'acquérir une souveraineté stratégique, notamment dans les domaines de la sécurité, de la défense et des technologies numériques, où notre dépendance aux solutions américaines est patente. Nous l'avons d'ailleurs répété depuis la crise du Covid sans imaginer néanmoins que l'impérieuse nécessité de cette souveraineté soit définitivement actée du fait de risques émanant d'alliés historiques. C'est sous cet angle particulier qu'il faut analyser l'année 2024 et les faits marquants du CEA-List que je vous invite à retrouver dans ce rapport d'activité.

L'engagement de nos équipes qui œuvrent au quotidien avec passion et détermination à relever les défis scientifiques et technologiques au profit de la science et de la société, s'est traduit par des réalisations remarquables en 2024. C'est le cas dans le domaine de l'IA avec le lancement de la première plateforme logicielle open-source AIDGE pour l'IA embarquée et des avancées significatives en IA générative où en l'espace de quelques mois seulement, nos chercheurs ont réussi à nous imposer comme leader dans ce domaine. Cette reconnaissance est illustrée par notre première place au concours de la DGA sur les LLMs et la confiance de notre partenaire Thales avec lequel nous avons lancé le premier laboratoire commun sur les applications de l'IAG pour la défense.

C'est aussi le cas dans le domaine quantique, où deux grands programmes ont été lancés : le Grand Défi Q-Loop sur la chaîne de contrôle des qubits et la Maison du Quantique Île-de-France, dont le CEA-List est coordinateur. Ces initiatives témoignent du dynamisme et de la capacité de nos équipes à conduire de grands projets technologiques. Nous avons également mené cette année des chantiers stratégiques, avec notamment la mise en place de la capacité Robotique Intelligente (R2I) de la plateforme Lab2Fab PRISM pour l'industrie du futur. Cette infrastructure de recherche unique souligne notre positionnement différenciant grâce à une dynamique de valorisation de nos briques technologiques. Cette dynamique est amplifiée par l'accélération du déploiement des services de la TEF AI-Matters et le renforcement de notre positionnement dans le partage de données et le Cloud.

Par ailleurs, notre dynamique européenne s'est poursuivie avec près d'une trentaine de projets acceptés – sur une centaine déposés – dont le projet DECIDE sur la Plateforme de Design européenne (PCT). Ce projet ouvre la voie à la prochaine étape de notre stratégie dans les semi-conducteurs avec le DET (Design Enablement Teams) pour accompagner les acteurs industriels dans leurs projets de conception de composants.

En 2024, un effort important a été consacré à l'évaluation de notre recherche par le Haut Conseil de l'Évaluation de



**« L'engagement de nos équipes qui œuvrent au quotidien avec passion et détermination à relever les défis scientifiques et technologiques au profit de la science et de la société, s'est traduit par des réalisations remarquables en 2024. »**

— ALEXANDRE BOUNOUH  
DIRECTEUR DU CEA-List

la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (HCERES), et la production d'un rapport d'auto-évaluation. Les conclusions du comité consacrent le CEA-List dans ses missions qui « s'étendent des technologies au cœur du numérique jusqu'aux domaines applicatifs dans une démarche systématique passant par les outils numériques matériels et logiciels, de la recherche amont aux applications. Ce positionnement en termes de recherche amont au service de la compétitivité industrielle est unique au niveau national », et le positionnent comme « un lien fort entre le monde académique et l'industrie ».

Les équipes du CEA-List continuent également à renforcer leur lien avec la société à travers des programmes à fort impact, comme le projet FRATHEA sur la flashthérapie qui va révolutionner les traitements du cancer. Elles aspirent également à un dialogue entre art et science, illustré par la collection des œuvres de l'artiste mondialement connu Claude Mercier, exposées au sein de nos espaces comme une curiosité et une invitation dans l'univers des chercheurs d'absolu.

# Sommaire

- 01 **Éditorial**
- 04 **Nos grandes initiatives en 2024**
- 08 **Chiffres clés 2024**
- 09 **Prix et distinctions**



## Au cœur de la science

- 12 **Nos programmes de recherche**
- 14 **L'ingénierie systèmes et les jumeaux numériques**
- 16 Prendre en compte les vulnérabilités micro-architecturales dans l'analyse de robustesse de systèmes sécurisés contre l'injection de fautes
- 18 Méthodes formelles pour l'analyse de programme
- 20 NACRE, un jumeau numérique pour concevoir le futur pilotage du réseau électrique de RTE

- 22 **L'intelligence artificielle responsable**
- 24 1<sup>re</sup> place au challenge EvalLLM pour l'extraction d'information à partir de textes
- 26 Savoir quantifier les incertitudes dans la simulation guidée par intelligence artificielle
- 28 Succès de PyRAT dans une compétition de vérification formelle
- 30 DIOD (Self-Distillation Meets Object Discovery) booste la performance de la découverte d'objets non supervisée dans les vidéos
- 32 Démonstration d'IA générative appliquée à la saisie robotique
- 34 **Calcul avancé et systèmes distribués**
- 36 Généralisation de l'évaluation de la valeur d'usage de différents processeurs quantiques (QPU)
- 38 J3DAI : définition d'une architecture avancée d'imageur intelligent sur 3 couches silicium
- 40 Succès de la mise en Open Source du L1 Data Cache (HPDcache)
- 42 **Instrumentation et usine du futur**
- 44 Manipulation dextre bimanuelle
- 46 Détection et discrimination en temps réel de mélanges de gaz radioactifs à l'aide d'aérogel de scintillateurs inorganiques
- 48 Diagnostic des câbles électriques par apprentissage automatique : une innovation primée à AUTOTESTCON
- 50 L'imagerie X révèle l'impact de la foudre sur les composites carbone

## 52 **Nos technologies en soutien à l'industrie**

### **Innovation pour l'industrie**

- 54 DGA et CEA-List, une collaboration fructueuse sur l'analyse de codes de sécurité
- 56 Nouvelles technologies de vision pour la robotique & le contrôle automatisé avec Siemens
- 58 Une avancée majeure vers l'exploitation des mémoires spintroniques de TDK pour l'IA probabiliste
- 60 Accélérer la détection de matières radioactives aux frontières

### **Transfert technologique**

- 55 ExpressiF® : une intelligence artificielle symbolique contribue au développement des artisans
- 57 Un jumeau numérique pour l'inspection robotisée avec SAFRAN
- 59 Fabrication d'aciers : une simulation ultrasonore haute performance pour une production optimisée
- 61 AIHERD intègre nos technologies d'IA pour analyser le comportement des bovins
- 62 Pour augmenter la performance du contrôle-commande EPR, Framatome intègre un outil d'optimisation dans sa chaîne de conception
- 63 Un robot autonome pour inspecter les canalisations de SARP Veolia

## 64 **Accompagner les transitions sociétales**

### **Santé**

- 66 Prendre en compte les facteurs humains dans le jumeau numérique fonctionnel de l'hôpital
- 67 Tomosynthèse mammaire : optimisation des doses et de la précision des dépistages
- 68 ABILITY, une révolution pour l'accessibilité numérique des non-voyants
- 69 Des capteurs ultrasonores embarqués pour le monitoring en santé

## **Vers une IA plus respectueuse**

- 70 Analyse approfondie des actualités politiques dans la presse
- 71 Détection des textes générés par Intelligence Artificielle

### **Éco-responsabilité**

- 72 EECONE : un projet européen d'envergure sur le développement soutenable de l'électronique
- 73 Comment qualifier l'éco-innovation dans un projet de recherche technologique ?
- 74 Le passeport produit numérique devient une réalité en Europe

### **Enjeux technologiques de la filière nucléaire**

- 75 Atelier d'Ingénierie Système pour l'aide à la conduite des futures centrales nucléaires
- 76 Des innovations technologiques pour le démantèlement nucléaire
- 78 L'ingénierie des modèles pour la maintenance des réacteurs à fusion nucléaire
- 79 Diamant monocristallin : un détecteur pour le recyclage de combustible nucléaire

## 80 **Qualité de vie au travail, un engagement pour le CEA-List**

#### **Crédits photographiques**

Tous les droits sont réservés par le CEA, sauf indication contraire sur les photos.  
Couverture, pages 02 et 10 : créations graphiques EFIL

#### **Conception et réalisation**

Efil – [www.efil.fr](http://www.efil.fr)

#### **Impression**

Imprimerie LESAGE-RICHARDEAU



© Cyrille DUPONT/CEA (Dupont Productions)

→ 2024, année riche en nouvelles actions de structuration de la recherche et de l'innovation : des actions nationales pour relever des défis fondamentaux comme la cybersécurité, l'intelligence artificielle, le continuum numérique et le quantique. Elles se déclinent sur un continuum de nouveaux outils d'accélération de la recherche prospective (« recherche à risque »), à des innovations de rupture clé pour l'industrie du numérique portées par les agences mais également par les stratégies d'accélération de France 2030. Avec l'ambition de diffuser rapidement et très largement l'innovation au niveau européen, les équipes du CEA-List se sont particulièrement mobilisées pour la mise en place de nouvelles plateformes d'innovation dans de multiples domaines comme la santé numérique, la défense, la microélectronique ou l'usine du futur.

# Nos grandes initiatives en 2024



## Les agences de programme

Nouvelles modalités d'animation de la recherche, les agences de programme créées en 2024 visent à fédérer les meilleures équipes françaises de recherche sur des thématiques stratégiques de l'État. Elles financent de grands programmes de recherche, à vocation opérationnelle, pour des budgets de 20 à 40 M€. Le CEA-List est impliqué dans l'agence « Du composant aux systèmes et infrastructures numériques » (ASIC) portée par le CEA, notamment dans le programme « composants pour l'IA » co-piloté avec Inria. L'institut participe aussi à l'agence du numérique portée par Inria, pilotant des projets sur les programmes « Évaluation de l'IA » et « Jumeaux numériques ».

## « Recherche à risque »

Le programme « Recherche à risque » du CEA, Audace!, financé par France 2030 à hauteur de 40 M€, vise à surmonter des défis scientifiques et technologiques risqués mais prometteurs. Le projet clé TwinSec, piloté par les instituts List et Leti du CEA, se concentre sur

### TwinSec Sécurisation matérielle

Premier jumeau numérique holistique de sécurisation native des systèmes embarqués (TwinSec)

- Projet de recherche à risque structurant de 4 ans
- Budget de 4M€
- Piloté par le List et le Leti
- 8 équipes du CEA, UGA, INRIA, CS, MSE
- Modélisation de bout en bout des capacités des attaquants
- Méthodes formelles pour des hauts niveaux de garanties
- Sécurité native des systèmes embarqués
- Création d'îlots de confiance super-résilients
- Enjeu stratégique national

la sécurisation des systèmes embarqués dès leur conception ("security-by-design"). L'objectif est de modéliser les capacités des attaquants, d'analyser les effets physiques sur le matériel et d'utiliser des méthodes formelles pour garantir un haut niveau de sécurité. Le projet innovant TwinSec propose la conception d'un jumeau numérique holistique du système et des attaques pour contrer nativement l'essentiel des vulnérabilités.

## Des projets pour la 2<sup>e</sup> révolution quantique

Experts en systèmes de calculs numériques, nous accélérons notre implication dans la 2<sup>e</sup> révolution quantique.

En 2024, nous avons initié de grands projets structurants comme Quorum, la Maison du quantique d'Île-de-France et Q-Loop de l'IRT Nanoelec. À l'interface de la recherche académique et des besoins industriels, nous jouons un rôle clé dans le développement et la valorisation des technologies. Dans le cas du projet Quorum, notre objectif est de mettre en œuvre les algorithmes quantiques issus du programme HQI en développant des cas d'usage industriels.

### Q-Loop Objectif de passage à l'échelle de l'électronique de contrôle et lecture des calculateurs quantiques

- 40 M€ France 2030
- 25 M€ Industriels
- 6 ans
- 2 Industriels microélectronique
- 6 startups quantiques
- 5 organismes de recherche

# Des secteurs stratégiques

## La continuité numérique

La continuité numérique transforme la gestion des données, au cœur de la révolution numérique actuelle. Les solutions cloud centralisées atteignent leurs limites face à l'explosion des données de terrain (industrie, santé, énergie). Une approche *hybride edge-cloud*, combinée à l'IA et aux jumeaux numériques, assure une gestion efficace et sécurisée des données en répondant aux contraintes industrielles (temps réel, confiance, souveraineté), augmentant ainsi la productivité, la résilience et la compétitivité. Deux projets France 2030 complémentaires, OTPaaS et

Data4Industry-X, s'attachent à la convergence OT/IT pour l'optimisation de la fabrication et aux échanges de données entre cloud de terrain et cloud, le CEA-List assurant la sécurisation des données. Cette double vision se décline dans la création d'espaces de données structurant des filières comme l'aéronautique (DECAD-X) ou l'énergie, avec des solutions technologiques souveraines.

### OTPaaS

- 12 partenaires
- Budget de 50 M€
- Un cloud approprié à la numérisation du terrain (convergence OT/IT)
- Remplacer le traitement en silos sur le terrain, par une plateforme native Gaia-X

### Data4Industry-X

- 5 partenaires
- Budget de 37 M€
- Maîtrise des échanges de données dans le *Manufacturing* (productivité, compétitivité et souveraineté)
- Solutions intelligentes et sobres de gestion des données fédérées dans un système d'information hétérogène

## Santé numérique

Le projet FRATHEA, coordonné par l'Institut Curie, vise à démontrer l'impact de l'irradiation Flash en radiothérapie, utilisant des électrons à très haute énergie, sur l'augmentation du taux de guérison des patients touchés par des cancers de mauvais pronostic et la réduction des effets secondaires induits.

La mise en œuvre clinique de cette modalité pose des défis technologiques inexplorés, qui nécessitent des nouvelles méthodes de dosimétrie et de modélisation, défis au cœur des sujets portés par les équipes du CEA-List.

### FRATHEA Un nouveau démonstrateur pour la radiothérapie Flash avec des électrons à haute énergie

- 3 partenaires : Institut Curie, CEA, industriel
- Budget de 37 M€ (2024-2028) : France 2030 et Région Île-de-France



## Le numérique pour la défense

Pour traduire les besoins stratégiques de défense en innovations technologiques, nous développons des solutions numériques opérationnelles pour lutter contre les menaces, améliorer le renseignement et l'aide à la décision, sécuriser les infrastructures de défense et maintenir les matériels militaires. Acteur reconnu de la R&D européenne, l'institut List participe à des projets structurants comme StarLight et collabore avec des industriels de la défense comme MBDA et Thales.



## Au service de l'industrie

L'année 2024 a vu un fort renforcement de notre mission de transfert technologique à l'industrie, illustré par trois partenariats structurants et pérennes. Avec Thales (CortAlx Lab), nous développons l'IA générative de confiance pour le renseignement et le commandement. Notre collaboration avec Aubert & Duval vise à renforcer la sécurité des produits métallurgiques via l'innovation dans les contrôles non destructifs. Enfin, notre partenariat avec Dawex innove dans les espaces de données industrielles, créant des solutions technologiques impactantes pour des écosystèmes durables et résilients.

# Des infrastructures d'envergure européenne

## Europe

Dans le cadre de l'initiative *Chips Act*, qui vise à renforcer l'écosystème européen en micro-électronique, le projet DECIDE vise à créer une plate-forme européenne de conception virtuelle de systèmes semi-conducteurs, impliquant le CEA, l'IMEC, les Fraunhofer et Chips-IT. Conformément au Pacte Vert, DECIDE soutiendra l'innovation et la compétitivité des startups, des PME et des instituts

de recherche européens. La plateforme offrira une place de marché, des centres de conception et un accès personnalisé aux outils d'automatisation de la conception électronique, aux modèles de composants et aux lignes pilotes.

### DECIDE Environnement de conception virtuel

- 25 M€ (4 ans)
- 12 partenaires, 11 états : 4 ONR, 8 universités
- 4 lignes pilote
- Circuit intégré, photonique, quantique, open source
- Support aux startups, PME
- Représentant d'Europractice

### Nos plateformes d'innovation

La plateforme PRISM est un lieu d'innovation et d'accompagnement des industriels dans le déploiement des technologies de l'industrie du futur. Elle se dote en 2025 d'une zone d'expérimentation de 600 m<sup>2</sup> pour la robotique Intelligente Interactive (R2I). Agile et évolutive, cette capacité a vocation à tester des scénarios industriels mobilisant des technologies robotiques du List et de ses partenaires.

En 2022, la mission numérique du CEA a lancé DeepLab, une plateforme pour l'ingénierie collaborative des systèmes et logiciels, offrant notamment des outils pour la gestion des exigences, l'architecture des systèmes mais aussi la vérification et le partage. Déployée en interne CEA et sur un site collaboratif pour nos partenaires, elle intégrera prochainement des agents digitaux d'assistance aux utilisateurs.

### Plateforme PRISM Industrie du futur

- Déploiement des capacités**
- 2,5M€ d'investissement réalisés en 2024
- Écosystème et projets services**
- Une offre de service pour les PME. 5 services lancés en 2024
  - Projets en montage

### DeepLab Plateforme d'ingénierie collaborative

- Développement : 5 unités CEA
- Exigences, conception, IVV Logiciel et systèmes complexes
- 4 cas d'usage pilotes
- > 15 services déployés
- Déploiement Q1 2025
- Directions opérationnelles CEA
- Open-source



## Objectifs

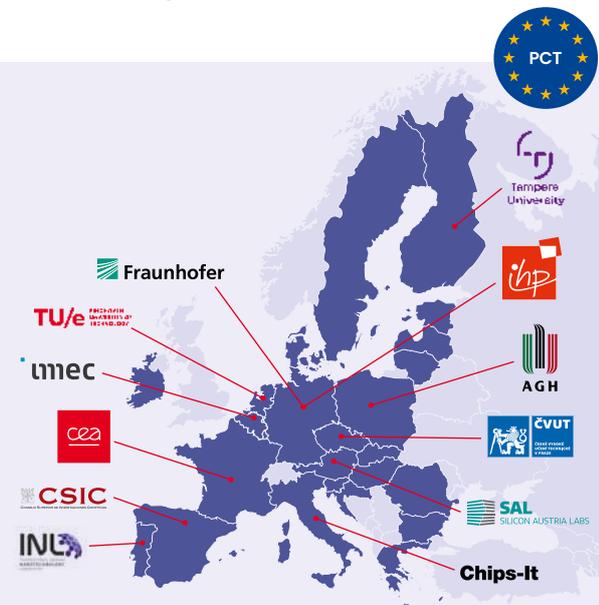
- Augmenter l'activité de conception de puces en soutenant les startups et les PME en Europe pour maintenir leur souveraineté dans des domaines clés
- Construire un environnement de conception virtuelle pionnier qui démocratise l'accès aux technologies de conception de semi-conducteurs de pointe
- Favoriser un écosystème robuste de sociétés de conception à travers l'Europe, pour stimuler l'innovation, améliorer la compétitivité et soutenir le développement et le déploiement rapides des technologies de semi-conducteurs de nouvelle génération
- Servir de catalyseur pour cultiver une industrie de conception de puces prospère en Europe, contribuant de manière significative aux agendas numériques et écologiques de l'Union

### Budget

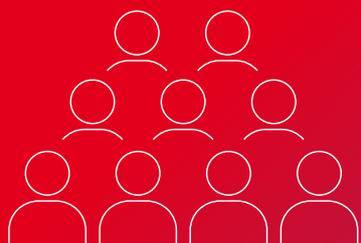
- 25 M€ (4 ans)

### Consortium

- 12 partners
- 11 state members
- 4 RTOs, 8 universités
- 4 pilot lines representatives
- Europractice representative
- IC, PIC, Quantum, Open source
- 76 support letters



# Chiffres clés 2024



Collaborateurs



**1000**  
personnes

**41** HDR

**3** senior fellow

(intelligence artificielle, architectures de calcul, ingénierie système)

**12** fellow

**61** experts senior

**3** experts techniques

**110** experts

**31** directeurs de recherche

**153** doctorants



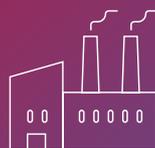
Production scientifique



**300**  
publications  
de rang A

**2122**  
brevets

**80**  
nouveaux  
brevets  
en 2024



Valorisation industrielle



**110**  
licences

**29**  
startups  
créées depuis  
2003

**200**  
partenaires  
industriels

Ressources



**450**  
projets  
par an

**> 130 M€**  
de budget  
annuel

**> 80%**  
de ressources  
externes

# Prix et distinctions

**1<sup>er</sup> prix pour le solveur de programmes de preuve COLIBRI dans trois catégories** de la 19<sup>e</sup> édition de la compétition internationale de satisfiabilité d'équations SMT-COMP durant la conférence *Computer Aided Verification – CAV2024*, juillet 2024, Montréal, Canada.

[https://smt-comp.github.io/2024/results/qf\\_abvfp1ra-single-query/](https://smt-comp.github.io/2024/results/qf_abvfp1ra-single-query/)  
[https://smt-comp.github.io/2024/results/qf\\_fplra-single-query/](https://smt-comp.github.io/2024/results/qf_fplra-single-query/)

**Premier prix attribué au CEA-List lors du challenge EvallLM organisé par l'AMIAD** (Agence Ministérielle pour l'IA de Défense) **et la DGA** (Direction Générale de l'Armement) sur l'extraction d'information en français dans un contexte few-shot, lors de la conférence JEPTALN2024, juillet 2024, Toulouse, France.

[https://www.linkedin.com/posts/amiad-minarm\\_jeptaln2024-toulouse-llm-activit-y-7224338219838943234-fYRS/?originalSubdomain=fr](https://www.linkedin.com/posts/amiad-minarm_jeptaln2024-toulouse-llm-activit-y-7224338219838943234-fYRS/?originalSubdomain=fr)

**2<sup>e</sup> place pour l'outil de preuve de fiabilité des IA PyRAT à la 5<sup>e</sup> édition de la compétition internationale de vérification de réseaux de neurones (VNNCOMP)** durant la conférence *Computer Aided Verification – CAV2024*, juillet 2024, Montréal, Canada.

<https://arxiv.org/pdf/2412.19985>

**Prix LNE 2024 attribué à Jean-Marc Bordy** pour sa contribution scientifique majeure dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants et de la métrologie de la dose en particulier.

<https://www.lne.fr/fr/recherche-et-developpement/prix-lne-recherche/lau-reats-2024>

**Prix Best Démonstration Circuit NEUROCORGI à Ivan Miro-Panades et al.**, "A 772μJ/frame ImageNet Feature Extractor Accelerator on HD Images at 30FPS," lors de la conférence APCCAS, Taiwan, 2024.

[https://www.linkedin.com/posts/cealist\\_iaembarqu%C3%A9e-neurocorgi-apccas-activity-7264940576322547712-c9Z8/](https://www.linkedin.com/posts/cealist_iaembarqu%C3%A9e-neurocorgi-apccas-activity-7264940576322547712-c9Z8/)

**Trophées du Tech Show For Construction catégorie Exploitation-Maintenance pour l'outil de maintenance prédictive SOFIA basé sur l'intelligence artificielle** (CEA-List, Socotec, Sanef), événement organisé par Le Moniteur et Les Cahiers techniques du bâtiment, juin 2024, Paris, France.

<https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/palmares-tech-show-2024.71588>

**Innovation Award catégorie Santé numérique décerné à l'entreprise Social Dream pour son dispositif DREAMSENS** lors du CES 2024, janvier 2024, Las Vegas (USA). Ce casque immersif sensoriel, utilisant les technologies de simulation interactive du CEA-List, s'adapte à chaque utilisateur en fonction de ses émotions.

<https://www.ces.tech/ces-innovation-awards/2024/dreamsens/>

**Prix de la Start-Up de l'année pour Snowpack**, startup du CEA-List, lors du Forum InCyber Europe 2024 (ex. FIC), mars 2024, Lille, France.

<https://www.cea.fr/Pages/innovation-industrie/start-up/snowpack-anonymisation-securisation-donnees.aspx>

**Prix de l'Innovation des Assises pour Snowpack** lors de l'édition 2024 des Assises de la Cybersécurité, octobre 2024, Monaco.

<https://www.lesassisesdelacybersecurite.com/fr-FR/presse-media-asso/actualites-et-communique-de-presse/cp1-lesassises-2024>, <https://snowpack.eu/fr/quand-linvisible-devient-visible/>

**Best Work-in-Progress (WIP) Award** (mention honorable) décerné à E. Madoux, C. Hudin pour leurs travaux "Refreshable Braille display using wave focusing and bistable pins" lors de la conférence EuroHaptics, juillet 2024, Lille, France.

**Prix du meilleur poster à Marine Poret** pour son poster "Lab-around-fiber for detecting biological threats" lors de la 6th International Conference on CBRNE Research and Innovation, mars 2024, Strasbourg, France.

**Best Student Paper Award à Hanane Slimani**, doctorante, pour son article "Detection, localization and characterization of fault in cable via machine learning approach based on compressed sensing time-domain reflectometry" lors de l'IEEE Automatic Test Conference – AUTOTESTCON 2024, août 2024, National Harbor, USA. [DOI:10.1109/AUTOTESTCON47465.2024.10697515]

<https://ieeexplore.ieee.org/author/625308984352659>

**Best Paper Award à Matilde Sosa Marti**, doctorante, pour son article "Point-by-point femtosecond fiber Bragg gratings behavior at high temperatures" lors de la conférence Advanced Photonics / Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides and Materials (AP/BGPP 2024), juillet 2024, Québec, Canada. [DOI: 10.1364/BGPP.2024.BTu2A.3]

**Best Paper Prize à Vincent Fu, Lilia Zaourar, Alix Munier, et Marc Duranton** pour l'article "Design Space Exploration of HPC Systems with Random Forest-based Bayesian Optimization" lors du Workshop RAPIDO24 de la conférence HiPEAC, Munich, 2024.

[https://www.linkedin.com/posts/lilia-zaourar-koutchoukali\\_rapido24-munich-hipeac-activity-7155174425733058560-pvyW/](https://www.linkedin.com/posts/lilia-zaourar-koutchoukali_rapido24-munich-hipeac-activity-7155174425733058560-pvyW/)

**Best Paper Hardware & Circuits à Hana Krichene et Rohit Prasad** pour l'article "A dataflow architecture with distributed control for DNN acceleration", MECO'2024 & CPSIoT'2024 Conference, Juin 2024, Montenegro. [DOI : 10.1109/MECO62516.2024.10577802]

<https://mecoconference.me/meco2024-cpsiot2024-conference-the-best-papers-awards/>



---

# Au cœur de la science

→ Chercher des ruptures, développer des solutions innovantes, la mission du CEA-List est au cœur de l'accélération de la transition numérique, au bénéfice de notre société. Inscrites dans la Mission numérique du CEA, nos recherches se concentrent plus particulièrement sur l'innovation numérique, depuis le monde physique jusqu'aux mondes virtuels.

---

**NOS PROGRAMMES  
DE RECHERCHE**  
PAGE 12

**NOS TECHNOLOGIES EN  
SOUTIEN À L'INDUSTRIE**  
PAGE 52

**ACCOMPAGNER LES  
TRANSITIONS SOCIÉTALES**  
PAGE 64

---

# Nos programmes de recherche

—> Nos programmes, axés sur la maîtrise de l'impact numérique sur l'environnement et la souveraineté nationale et européenne, répondent aux enjeux de nos partenaires industriels. Ils s'adaptent en permanence aux avancées du monde scientifique et aux évolutions de notre environnement. Nos chercheurs élaborent ainsi des visions technologiques autour desquelles nous construisons un écosystème intégrant des projets et équipements d'envergure.



Notre stratégie de recherche s'inscrivant dans la durée, nous pilotons aux côtés de nos homologues académiques les Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) « Cloud », « Intelligence Artificielle » et « Cybersécurité » et contribuons à relever les défis du quantique. Nos actions en Recherche de Rupture et projets Carnot les complètent sur des sujets ciblés comme la cybersécurité intégrale logiciel-matériel, l'orchestration des systèmes décentralisés, l'IA générative pour la robotique, les accélérateurs de calcul pour l'IA ou les solutions avancées d'instrumentation et de contrôle non destructif.

Notre mission de transfert inclut l'analyse des besoins et verrous des domaines clés tels que la défense, la santé numérique, le nucléaire et l'usine du futur. Elle s'accompagne d'une démarche d'éco-innovation évoquée dans le chapitre « Accompagner les transitions sociétales » page 64. Le croisement de ces visions favorise les synergies et transversalités au sein de notre Institut, nécessaires pour relier nos innovations aux besoins concrets et immédiats de l'industrie. Ce chapitre présente quatre grands axes thématiques, en se focalisant sur quelques résultats scientifiques emblématiques. L'innovation au service de l'industrie est abordée à la suite de ce chapitre, avec des exemples complémentaires.

**Contrôle non destructif augmenté par l'intelligence artificielle**

© Cyrille DUPONT/CEA (Dupont Productions)

## 1 L'ingénierie système et les jumeaux numériques

Au cœur de la transition numérique, elle vise à accélérer le développement de systèmes numériques fiables. Les verrous portent sur l'assistance à l'ingénierie des logiciels et des systèmes complexes, l'évaluation de leur sûreté et de leur sécurité et la maîtrise de la fiabilité – en intégrant le comportement du matériel. Nos recherches s'appuient sur une modélisation précise des architectures logicielles et systèmes et de leur comportement fonctionnel. Les jumeaux numériques fonctionnels produits permettent une simulation précise qui facilite l'optimisation et le test jusqu'à l'établissement de preuves formelles de propriétés clés de sûreté et de sécurité.

## 2 L'intelligence artificielle responsable

Incontournable pour de nombreuses innovations, elle soulève des questions essentielles de confiance et de frugalité, nécessitant l'adaptation des méthodes et algorithmes d'apprentissage et le développement de cadres théoriques d'analyse fiables. L'arrivée des grands modèles de fondations, de l'IA générative et de leurs très nombreuses applications impose de revisiter ces questions pour promouvoir un apprentissage responsable intégrant cette facette technologique de l'IA et explorer de nouveaux secteurs d'application.

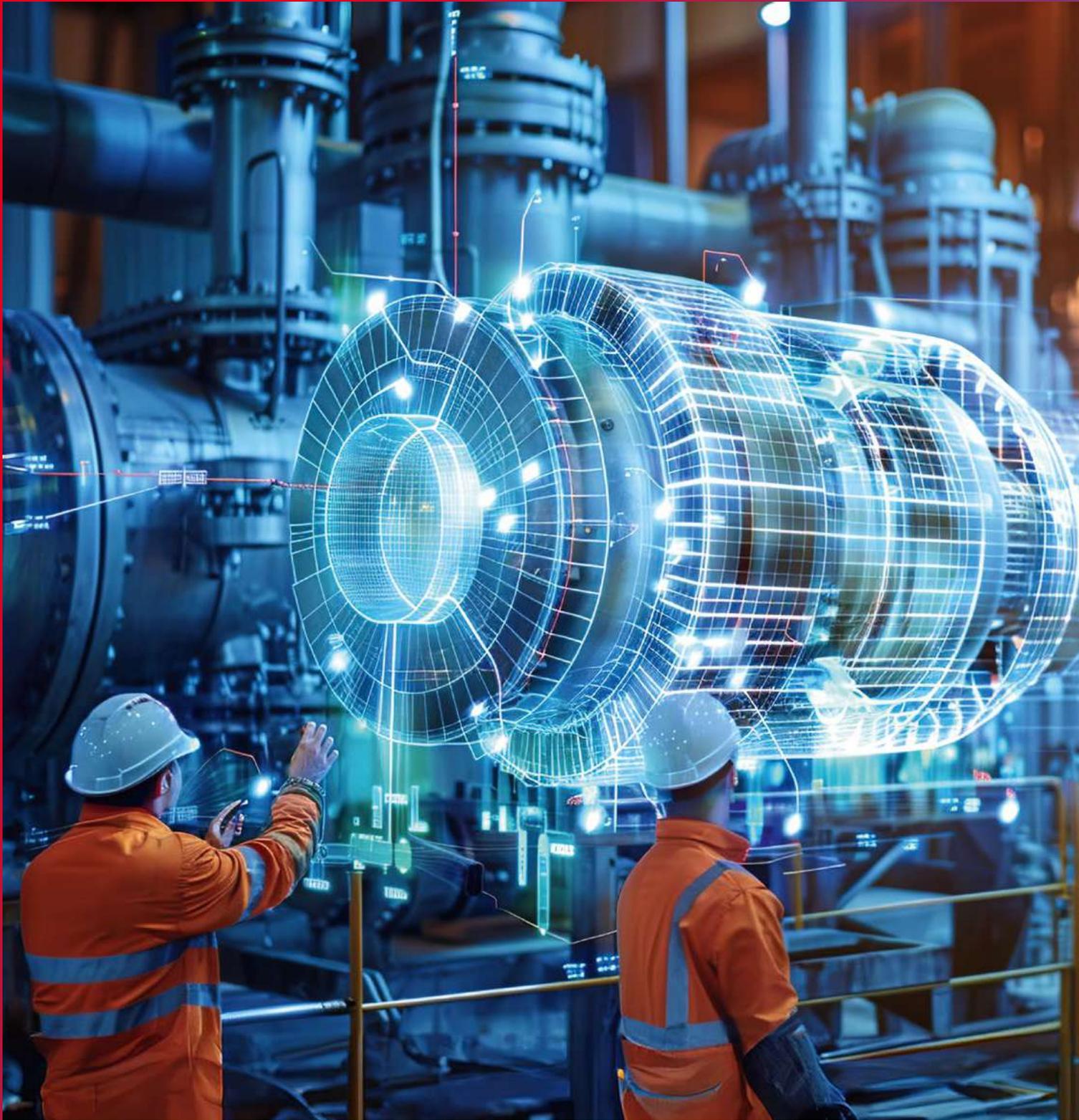
## 3 Le calcul et systèmes distribués

La question du calcul couvre le continuum du cloud à l'embarqué, en soulevant des questions de modèles de calcul, d'architectures logicielles et microélectroniques à tous les niveaux. Les enjeux portent, en particulier, sur la capacité à concilier frugalité et très haute performance pour chaque contexte d'usage : cloud, serveurs intermédiaires, systèmes, capteurs embarqués. Parallèlement, le calcul quantique prend de l'ampleur, soulignant encore de nombreux verrous de la programmation au qubit, mais aussi à l'évaluation des solutions.

## 4 Instrumentation et usine du futur

La capture et l'exploitation des données est au cœur de l'innovation des systèmes et procédés industriels. Elles mettent en jeu des dispositifs d'instrumentation, du traitement avancé et leur intégration au sein de chaînes numériques continues, du capteur au contrôle des systèmes. Les verrous portent sur la conception de capteurs et systèmes de capteurs, ainsi que sur l'analyse des signaux au plus tôt mais aussi en bout de chaîne, en lien avec le contrôle de plus haut niveau. De plus, l'usine du futur tend à intégrer de manière efficace et fluide la robotique avancée, avec des défis sur la maîtrise des interactions entre humains et machines et la coopération machines-machines. Cela appelle à des avancées sur le couplage entre robotique, ingénierie système, jumeaux numériques et intelligence artificielle.

AVANCÉES 2024



# L'ingénierie systèmes et les jumeaux numériques

→ À travers son axe de R&D en ingénierie systèmes et jumeaux numériques, le CEA-List aborde de façon holistique l'ensemble du cycle de vie d'un système. Les approches d'ingénierie à base de modèles permettent de maîtriser la complexité des nouveaux systèmes intensément numériques (cf. encart DeepLab en page 7). Elles allient les pratiques d'ingénierie à la modélisation et la simulation du fonctionnement des systèmes et de ses interactions entre ses composants et l'environnement. Elle se décline des très grands systèmes (systèmes de systèmes largement distribués) aux composants microélectroniques en eux-mêmes. Couplées aux méthodes formelles, ces approches fournissent des fondations mathématiques à des pratiques

d'ingénierie qui ne peuvent plus souffrir d'approximation, et doivent aussi satisfaire à des contraintes de sûreté et de sécurité toujours plus fortes (cf. encart TwinSec en page 5).

## Trois résultats marquants de 2024 illustrent ces enjeux et les avancées obtenues :

- 16 **Prendre en compte les vulnérabilités micro-architecturales dans l'analyse de robustesse de systèmes sécurisés contre l'injection de fautes**
- 18 **Méthodes formelles pour l'analyse de programme**
- 20 **NACRE, un jumeau numérique pour concevoir le futur pilotage du réseau électrique de RTE**



**SIMON TOLLEC**  
SECURITY ENGINEER THALES DIS  
© Simon Tollec



**MATHIEU JAN**  
DIRECTEUR DE RECHERCHE  
ET EXPERT SENIOR  
© CEA



**DAMIEN COUROUSSÉ**  
EXPERT SENIOR  
© CEA

# Prendre en compte les vulnérabilités micro-architecturales dans l'analyse de robustesse de systèmes sécurisés contre l'injection de fautes

→ Les attaques par injection de fautes menacent la sécurité des systèmes numériques. En collaboration avec l'Université Technique de Graz, le CEA-List a développé une nouvelle méthode d'analyse pré-silicium qui a permis une première mondiale : prouver la robustesse d'un processeur et son code de démarrage face à ces attaques par injection de fautes.

Les attaques par injection de fautes exploitent des conditions anormales (température, rayonnement, etc.) pour perturber un système embarqué. Elles induisent des erreurs qui permettent à un attaquant d'accéder à des données sensibles ou d'acquies des privilèges. Un composant clé dans la sécurité des systèmes sur puce (SoC) est son sous-système sécurisé, ou *secure element (SE)*. Traditionnellement, l'analyse de la robustesse d'un SE repose sur une caractérisation post-silicium coûteuse et aux résultats souvent variables (évaluateur, outils, etc.).

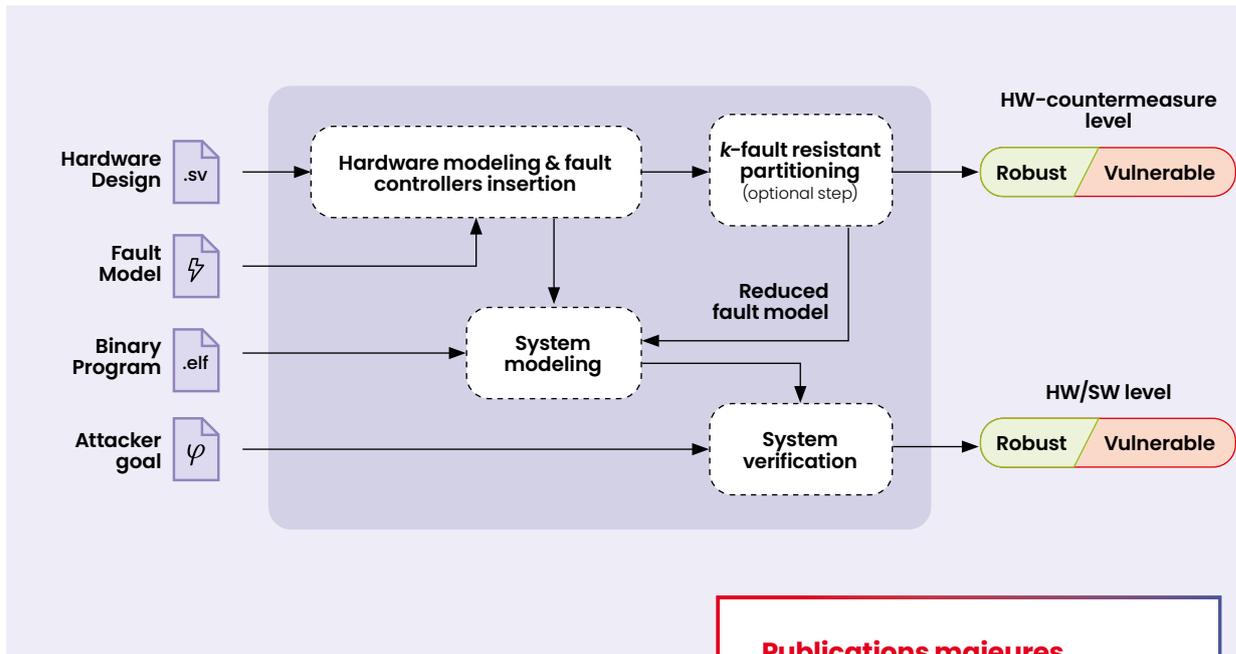
Face au coût et au temps que représente le processus de certification de sécurité d'un produit, il est nécessaire de développer des méthodologies pré-silicium d'analyse pour évaluer les capacités de contre-mesures logicielles et/ou matérielles présentes pour sécuriser un SE.  $\mu$ ArchFI, développé par le CEA-List, est un tel outil d'analyse pré-silicium,

à l'état de l'art, permettant d'évaluer la robustesse d'un SE face à des attaques par injection de fautes. Il analyse la description d'un circuit au niveau *Register Transfer Level (RTL)*, un modèle de fautes, un programme et un objectif d'attaque, afin d'identifier les vulnérabilités ou démontrer formellement la robustesse du système. Jusqu'ici,  $\mu$ ArchFI supportait un modèle de faute restreint et une taille de code analysable d'une centaine d'instructions. Ces limitations empêchaient l'analyse du code de démarrage d'un SE face à une attaque par injection de fautes.

## Des analyses de sécurité auparavant impossibles

Nos méthodologies d'analyse se sont enrichies d'une approche dite *k-fault resistant partitioning (k-FRP)*, développée en partenariat avec l'Université Technique de Graz (TU Graz). Cette collaboration a permis une première mondiale : une analyse sécuritaire d'OpenTitan contre les attaques par injection de fautes. OpenTitan est le premier SE open-source développé par un consortium d'acteurs de premier plan des systèmes numériques et de la cyber-sécurité. Le k-FRP (à terme étape optionnelle sur le workflow de  $\mu$ ArchFI ci-dessous) a notamment permis de :

- identifier une vulnérabilité jusqu'alors inconnue, et de vérifier formellement que le patch appliqué au design d'OpenTitan corrige bien la vulnérabilité ;
- prouver la robustesse à 1 injection de faute de son processeur sécurisé, soit une taille de circuit analysé de 130 kGates équivalentes.



Workflow de la méthodologie d'analyse pré-silicium, développée par le CEA-List, d'évaluation de la robustesse contre des attaques par injection de fautes.

Enfin, cette analyse a permis de démontrer que la seule vulnérabilité identifiée par le k-FRP n'était pas exploitable dans les 2500 instructions du premier étage de code de démarrage d'OpenTitan. L'analyse de sécurité de ce type de systèmes (sécurisés avec des contre-mesures matérielles de type redondance matérielle), pour ce modèle d'attaquant d'injection de fautes, était auparavant impossible à réaliser.

### Un modèle d'attaquant plus réaliste

Nos méthodologies d'analyse pré-silicium, intégrant les vulnérabilités micro-architecturales, sont centrales dans les projets Forward (recherche partenariale PTCC) et TwinSec (Recherche à Risque, programme Audace du CEA) démarrés fin 2024. Ces projets permettront aussi bien de comparer les résultats obtenus par rapport à des caractérisations sécuritaires expérimentales que de concevoir une chaîne d'analyse multi-niveaux (physique, micro-architectural et logiciel) intégrant nos méthodologies pré-silicium. Les travaux menés dans les deux projets visent notamment des modèles multi-fautes réalistes et des processeurs de complexité accrue.

### Publications majeures

**La conférence CHES 2024 (rang A\*) est une des principales conférences internationales dans le domaine de la sécurité**

Simon Tollec, Vedad Hadzic, Pascal Nasahl, Mihail Asavoae, Roderick Bloem, Damien Couroussé, Karine Heydemann, Mathieu Jan, Stefan Mangard

*Fault-Resistant Partitioning of Secure CPUs for System Co-Verification against Faults. IACR Trans. Cryptogr. Hardw. Embed. Syst. 2024(4): 179-204 (2024)*

### Cas d'usage, application, transfert

**Plusieurs industriels et l'ANSSI se sont montrés intéressés par nos méthodologies d'analyse. Par exemple, l'ANSSI évalue l'usage de méthodes formelles dans le cadre de ses analyses sécuritaires architecture du composant de sécurité OpenTitan.**

**Liens vers nos méthodologies d'analyses  $\mu$ ArchFI et «k-fault resistant partitioning»**





**PATRICIA MOUY**  
RESPONSABLE PROGRAMME CYBERSÉCURITÉ  
ET CHEFFE DE LABORATOIRE  
© CEA

# Méthodes formelles pour l'analyse de programme

→ L'évaluation précise de la sécurité des logiciels est un enjeu de sécurité et de souveraineté. Grâce à ses outils basés sur les méthodes formelles, le CEA-List aide les experts en cybersécurité à identifier les vulnérabilités des logiciels mais aussi à prouver qu'ils respectent certaines propriétés de sécurité comme la confidentialité ou l'intégrité de données sensibles, indispensables aux plus hauts niveaux de certification de sécurité.

Pour contribuer à la cybersécurité des systèmes, le CEA-List développe des outils d'analyse de logiciels, notamment via les plateformes Frama-C et BINSEC.

## Cybersécurité des codes binaires avec BINSEC

BINSEC utilise l'exécution symbolique au niveau binaire pour détecter les problèmes de sécurité. La correction de l'ensemble des vulnérabilités d'un logiciel étant coûteuse, il est crucial d'identifier les plus susceptibles d'être exploitées. Une nouvelle fonctionnalité de BINSEC, l'algorithme PyAbd, se concentre sur les vulnérabilités liées aux entrées contrôlables par un attaquant, car elles sont plus faciles à exploiter. PyAbd génère automatiquement des contraintes logiques pour éviter l'exploitation des vulnérabilités. Cet algorithme est prouvé correct, complet et minimal, garantissant que chaque contrainte qu'il propose reflète la gravité d'un bug. Il évalue mieux la criticité des bugs que les techniques existantes et facilite l'interprétation des résultats pour les



Certification par l'ANSSI d'un logiciel de Thales, grâce à Frama-C.

© ANSSI

évaluateurs de sécurité. Les résultats ont été présentés à la conférence POPL 2024.

BINSEC est utilisé dans plusieurs projets du PEPR Cybersécurité de la stratégie nationale, notamment au sein des défis SecurEval, Rev et DefMal.

«Fournir des outils à haut niveau de garantie est essentiel en cybersécurité, que ce soit pour la détection des vulnérabilités ou pour la preuve de propriétés de sécurité.»

— PATRICIA MOUY



© LeTouch/AdobeStock

### Méthodes formelles pour la cybersécurité des codes sources

Les Critères Communs constituent la certification de sécurité la plus exigeante des systèmes d'information, reconnue internationalement. Les deux plus hauts niveaux (*Evaluation Assurance Level EAL6* et *EAL7*) imposent l'utilisation de méthodes formelles pour prouver les propriétés de sécurité (confidentialité, intégrité et disponibilité des données).

L'expertise de nos chercheurs en sécurité et méthodes formelles les a conduits à travailler sur ces niveaux de certification. IDEMIA, acteur industriel reconnu en sécurité, a ainsi sollicité nos experts avec succès : grâce à cette collaboration, IDEMIA a obtenu en 2023 aux Pays-Bas une certification Critères Communs EAL6, via un modèle formel indépendant du code. THALES, autre acteur de référence, a noué un partenariat avec le CEA-List dès 2015 sur les méthodes formelles pour la sécurité. L'une de leurs innovations récentes réside dans le couplage de deux plug-ins

de Frama-C, WP et MetACSL, pour la vérification de propriétés comme la confidentialité et l'intégrité des données. Ce résultat est reconnu par l'ANSSI comme le troisième outil basé sur les méthodes formelles capable de répondre aux plus hauts niveaux des Critères Communs.

En utilisant Frama-C, Thales a obtenu de l'ANSSI un certificat EAL6 en 2021 pour un de ses produits, puis un certificat EAL7 en 2022. La preuve directement sur le code du produit augmente les garanties de cette certification.

Ces résultats traduisent la capacité des outils formels pour la certification de haut niveau en cybersécurité et le rôle clé du CEA-List en tant que fournisseur d'outils spécialisés. Frama-C est également impliqué dans le projet SecurEval du PEPR cybersécurité et l'ANSSI et la DGA collaborent avec nos équipes autour de Frama-C et BINSEC pour l'évaluation avancée des logiciels.



**STÉPHANE SALMONS**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR CHEF DE PROJET ET CHEF DE LABORATOIRE  
© CEA

# NACRE, un jumeau numérique pour concevoir le futur pilotage du réseau électrique de RTE

→ **Le CEA-List est engagé aux côtés de RTE pour concevoir le futur système de contrôle du réseau électrique. L'enjeu principal est de rendre le réseau plus flexible, notamment pour intégrer la part croissante d'énergies intermittentes, en toute fiabilité et sécurité. Le CEA-List a ainsi conçu une plateforme de modélisation, de simulation et d'analyse selon une approche rigoureuse basée sur les modèles.**

Avec l'augmentation des énergies renouvelables fortement distribuées, dont la production n'est pas pilotable, et la croissance et la diversification des usages de l'électricité, le réseau doit pouvoir s'adapter à des situations de production et de consommation de plus en plus versatiles et difficiles à anticiper. Le CEA-List accompagne les équipes R&D de RTE pour relever le défi majeur de la conception du futur système de contrôle du transport de l'électricité.

Le système actuel du réseau de transport comporte deux niveaux : local (protection des lignes) et national (dispatching, prévision et programmation). Pour répondre au besoin crucial d'adaptabilité, RTE souhaite l'ajout d'un niveau intermédiaire, le niveau zonal, au sein d'un système de contrôle plus numérisé et plus distribué.

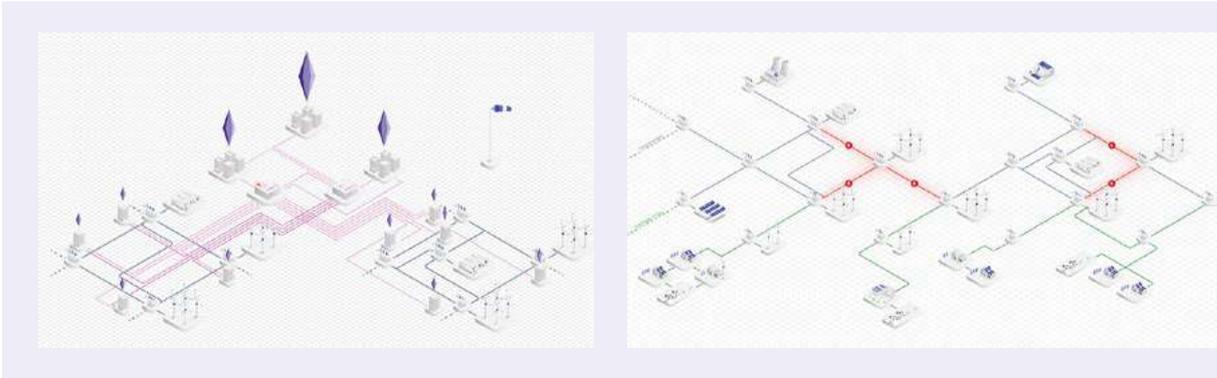
Le CEA-List a mobilisé ses compétences en modélisation et simulation des systèmes complexes pour rechercher la meilleure architecture, tant sur le plan fonctionnel que matériel, en prenant en compte les critères de flexibilité, de fiabilité et de sécurité. L'expertise du CEA-List inclut



© Matthew Henry / Unsplash

*« Nos compétences en ingénierie dirigée par les modèles, notre capacité à intégrer diverses technologies et la richesse des échanges avec RTE sont au cœur du succès de NACRE. »*

— STÉPHANE SALMONS



Démonstrateur NACRE.  
 À gauche : modélisation de l'architecture de contrôle du réseau.  
 À droite : simulation du réseau électrique.  
 © CEA

l'ingénierie dirigée par les modèles, l'architecture système, la simulation en temps réel, les méthodes formelles pour les systèmes distribués, et son expérience des *Smart Grids*. Cette expertise a permis de concevoir une plateforme de modélisation et de simulation du système de contrôle imaginé par RTE et une méthode d'analyse associée. Basée sur Papyrus, l'outil open-source d'ingénierie système du CEA-List, la plateforme permet ainsi de modéliser rigoureusement différentes architectures possibles du système de contrôle, puis de les simuler. Au cours de ces simulations, il est possible de confronter une architecture à différents types d'aléas afin d'évaluer son comportement.

La modélisation s'effectue à trois niveaux :

- 1) Modélisation de l'architecture des fonctions de contrôle du réseau électrique ;
- 2) Modélisation de l'architecture du réseau de communication et des ressources de calcul ;
- 3) Modélisation des scénarios d'aléas.

La situation est ensuite modélisée et simulée selon trois aspects :

- 1) Simulation du comportement de chaque organe de contrôle, selon les algorithmes de contrôle prédictif de RTE ;
- 2) Simulation de l'acheminement des messages par les réseaux de communication, incluant d'éventuels aléas ;
- 3) Simulation de l'état physique du réseau électrique et des équipements électrotechniques (générateurs et batteries) connectés au réseau.

Enfin, les résultats de la simulation sont évalués selon différents critères de sécurité (par exemple, le risque d'endommagement de lignes) et de performance (par exemple, la quantité d'énergie perdue).

En 2024, la plateforme NACRE a été exploitée par le CEA-List et RTE, afin d'étudier deux configurations d'architecture (centralisée et distribuée) sur un ensemble de cinq zones de contrôle soumises à divers aléas. À l'issue ces études, le programme NACRE a été renouvelé pour trois années supplémentaires.

**Bien que conçue pour répondre aux besoins de RTE, la plateforme NACRE s'appuie sur des méthodes et des outils génériques. Il est donc possible de reproduire la démarche pour d'autres systèmes d'acheminement de l'énergie, avec un travail modéré d'adaptation. Cela peut concerner en particulier le système d'acheminement du gaz qui, avec l'arrivée des biogaz est confronté à des problèmes de flexibilité similaires à ceux des réseaux électriques.**

### Publications

**“Modelling and simulating new power grid control architectures”**

Arnaud M., Lapitre A., Lhuillier Y., Salmons S., Smaoui A., Giraud G., Guerrier A.  
 ISGT 2023, Grenoble

**“A Domain Specific Language to Design New Control Architectures for Smart Grids”**

Smaoui A., Arnaud M., Salmons S., Giraud G.  
 MODELSWARD 2025 (Best poster)

**“Modeling and Simulating Power Grid Control Architectures: Hypotheses and First Results”**

Arnaud M., Lapitre A., Lhuillier Y., Salmons S., Smaoui A., Tessier P., Giraud G., Rahmoun A.  
 POWERTECH 2025



# L'intelligence artificielle responsable

→ Le programme IA

Responsable porte l'excellence scientifique sur deux enjeux clés de notre stratégie : la confiance et la frugalité. Il s'ancre dans une recherche intense sur les fondements de l'IA. La question de la confiance numérique en IA, thème de recherche majeur au List, trouve ses racines dans l'engagement du CEA pour la sûreté et la sécurité logicielle. Abordée dans sa globalité par nos équipes, elle est ici mise en avant sur deux axes : la sûreté de fonctionnement et la capacité à vérifier les systèmes critiques à base d'IA ; le couplage de l'IA aux modèles de simulation demandant la maîtrise des imprécisions véhiculées dans les modèles, en particulier pour le traitement du signal. L'enjeu de la frugalité s'appuie sur l'expertise des équipes autour des domaines d'applications. Parmi ceux-ci, deux exemples importants sont le traitement naturel des langues et la vision par ordinateur. Les équipes visent l'élaboration de méthodes de conception (des données aux algorithmes) capables

d'assurer performance et frugalité, y compris pour les approches actuelles à base d'IA générative. L'option est de contourner les solutions brutes généralistes afin de favoriser la spécialisation et la performance sur des contextes opérationnels précis.

## Ces enjeux sont abordés autour de cinq résultats clés de l'année :

- 24 **1<sup>er</sup> place au challenge EvalLLM pour l'extraction d'information à partir de textes**
- 26 **Savoir quantifier les incertitudes dans la simulation guidée par intelligence artificielle**
- 28 **Succès de PyRAT dans une compétition de vérification formelle**
- 30 **DIOD (Self-Distillation Meets Object Discovery) booste la performance de la découverte d'objets non supervisée dans les vidéos**
- 32 **Démonstration d'IA générative appliquée à la saisie robotique**



**ROBIN ARMINGAUD**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA



**ARTHUR PEUVOT**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

# 1<sup>re</sup> place au challenge EvalLLM pour l'extraction d'information à partir de textes

→ Le CEA a remporté le challenge EvalLLM 2024, organisé par l'Agence Ministérielle de l'IA pour la Défense (AMIAD) en mai 2024, sur l'extraction d'information pour des textes en français avec une faible disponibilité de données d'entraînement. Nous avons montré que des modèles de langue de type encodeur, de taille limitée, peuvent nettement surpasser des modèles de langue génératifs de très grande taille.

Le challenge EvalLLM 2024 visait à évaluer les approches reposant sur des modèles de langue neuronaux dédiés à la reconnaissance d'entités nommées, pierre angulaire de l'extraction d'information. Cette tâche s'effectuait dans un contexte *few-shot*, c'est-à-dire avec peu de données annotées, et en français, langue moins dotée que l'anglais. Dans les cas réels d'application de l'extraction d'information, les données annotées permettant d'adapter les modèles ne sont que très rarement disponibles en quantité suffisante pour être exploitées par des modèles d'apprentissage supervisé traditionnels. C'est pourquoi le challenge EvalLLM s'est concentré sur un nombre limité de documents d'entraînement : 4 bulletins d'information et un article de blog (Figure 1). Dans une telle configuration «*fewshot*», la question majeure est la suivante : est-il préférable d'exploiter un grand modèle de langue génératif ou un modèle de langue bien plus petit, de type encodeur ? Pour répondre à cette question, le CEA s'est appuyé sur deux modèles : GoLLIE (Sainz *et al.*, 2024) et GLiNER (Zaratiana *et al.*, 2024).

1

PERSON UNKNOWN FUNCTION ORGANISATION  
MILITARY\_UNIT GROUP LOCATION SITE RESOURCE  
EQUIPEMENT EVENT TIME ID

L'éventuel déploiement de paramilitaires russes au Mali inquiète Washington... Les États-Unis s'inquiètent d'un éventuel déploiement de paramilitaires russes au Mali. Dans un communiqué, Linda Thomas-Greenfield, la représentante américaine permanente aux Nations unies, a fait part de ses inquiétudes. « J'ai exprimé notre sérieuse inquiétude au sujet des informations selon lesquelles des mercenaires russes pourraient être déployés au Mali » a-t-elle déclaré à l'issue d'un entretien à Niamey avec le président nigérien Mohamed Bazoum. Madame Linda Thomas-Greenfield fait partie d'une délégation du Conseil de sécurité de l'ONU qui s'est rendue le week-end dernier à Bamako afin de faire pression pour le rétablissement du pouvoir civil au Mali. La délégation s'est ensuite rendue au Niger. La représentante des États-Unis à l'ONU a estimé que les paramilitaires russes sont pointés du doigt dans des abus sur des civils et que leur présence va aggraver probablement la situation sécuritaire actuelle. La France et l'Allemagne ont prévenu qu'un accord entre Bamako et Wagner remettrait en cause leur présence militaire au Mali. Paris accuse le groupe Wagner de se rémunérer sur les ressources des pays d'accueil comme le Centrafrique et la Libye, et de servir les intérêts du Kremlin. Ce que dément catégoriquement le président russe Vladimir Poutine.

GoLLIE, fondé sur le modèle génératif Code-LLaMA 13B, transforme la tâche de reconnaissance d'entités nommées en tâche de génération de code par le biais de prompts similaires à la Figure 2.

GLiNER, fondé sur des modèles encodeurs de type BERT, apprend quant à lui à mettre en correspondance des représentations de mentions d'entités candidates et les représentations des types d'entités possibles, utilisés comme prompt (cf. Figure 3).

Ces deux modèles ont la particularité commune d'avoir été pré-entraînés à grande échelle en utilisant des jeux de données en anglais non liés au domaine cible de l'évaluation (des données annotées manuellement dans le cas de GoLLIE et produites automatiquement à partir de ChatGPT pour GLiNER).

L'application de ces deux modèles aux données de test de l'évaluation a montré une nette supériorité du modèle GLiNER sur le modèle GoLLIE, avec un gain de 62 % en macro-F1 et de 118,6 % en micro-F1.

Il dépasse les performances du modèle GPT-4o, très nettement plus gros, utilisé par les participants arrivés en 2<sup>e</sup> position (Figure 4).

Au-delà de l'évaluation EvalLLM 2024, les perspectives sont parallèlement de transposer les résultats obtenus sur des données du domaine de la sécurité dans le cadre de projets européens en cours et d'améliorer la dimension *few-shot* du modèle GLiNER en lien avec le projet Sharp du PEPR IA sur la thématique de la frugalité.

2

```
@dataclass
class Function(Entity):
    """Désigne les rôles, titres ou fonctions occupés par des individus, y
    compris les titres professionnels, les grades militaires et les fonctions
    nommées. Cette classe englobe les fonctions, les titres et les grades
    militaires, ainsi que les individus désignés par leur profession."""

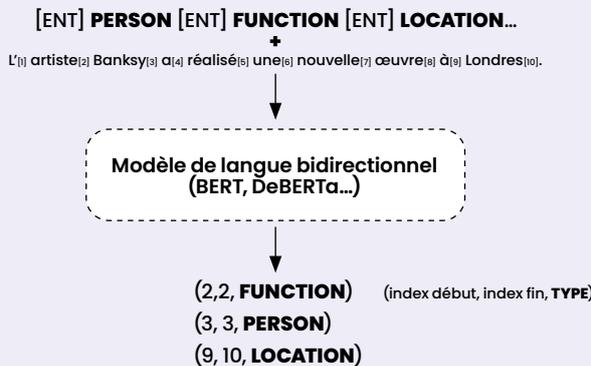
    span: str # Such as: "Président de la France", "Chef Chirurgien", "PDG
    de la société XYZ", "Chef Pâtissier Exécutif", "Docteur", "Ingénieurs",
    "Professeur", "Général de la 2e division", "Capitaine", "Manager"

# This is the text to analyze
text = "L'ambassadeur à Séoul a pris la parole sur la situation"

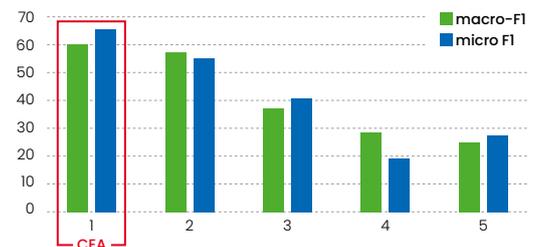
# The annotation instances that take place in the text above are listed here
result = [
    Function (span="L'ambassadeur à Séoul")
]
```

- 1 Texte issu de la compétition et soumis par l'Agence Ministérielle de l'IA pour la Défense (Source <https://evallm2024.sciencesconf.org> à partir de <https://cf2r.org/wpcontent/uploads/2021/10/Renseignori203.pdf>)
- 2 Prompt pour le modèle GoLLIE
- 3 Modèle GLINER
- 4 Résultats de l'évaluation (la performance augmente avec la valeur des deux indicateurs)

3



4



### TIAM (Text-Image Alignment Metric) : mesurer les performances en IA générative visuelle

Les modèles de génération d'image conditionnés par le texte, tels que *Stable Diffusion*, obtiennent des résultats visuellement impressionnants. Néanmoins, leur capacité à suivre précisément des consignes textuelles n'est pas toujours bien établie. C'est pourquoi nous avons développé la métrique TIAM, alliant la génération contrôlée de consignes textuelles et des outils d'analyse d'images pour établir dans quelle mesure un modèle respecte le nombre d'objets ou la couleur spécifiés. Les études menées sur les six modèles d'IA existants les plus utilisés montrent que leur capacité à respecter une consigne spécifiant plus d'un objet est encore limitée, et davantage lorsqu'une couleur est précisée. TIAM peut donc aider à mieux comprendre l'influence des paramètres d'entraînement des IA sur la compréhension et le respect des consignes, ouvrant ainsi une nouvelle voie de recherche sur le *noise mining*, c'est-à-dire la quête des "bons" bruits qui augmentent la qualité des résultats d'une IA.

### Projets majeurs

Le CEA applique ses travaux sur les modèles few-shot de reconnaissance d'entités nommées dans le cadre des projets européens sur la sécurité VANGUARD, ARIEN et STARLIGHT. Ces modèles doivent permettre d'analyser des contenus textuels - en particulier issus des réseaux sociaux- pour lutter contre les trafics de nature criminelle.

### Publication majeure

« CEA-List@Evallm2024 : prompter un très grand modèle de langue ou affiner un petit ? »

Robin Armingaud, Arthur Peuvt, Romaric Besançon, Olivier Ferret, Sondes Souihi et Julien Tourille  
 Evallm2024 : Atelier sur l'évaluation des modèles génératifs (LLM) et challenge d'extraction d'information few-shot, Toulouse, France



**EIJI KAWASAKI**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© Eiji Kawasaki



**HAN WANG**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© Han Wang

# Savoir quantifier les incertitudes dans la simulation guidée par intelligence artificielle

→ Les outils d'apprentissage profond probabiliste développés au CEA-List permettent la mesure quantitative de la fiabilité d'une prédiction. Cette quantification ouvre la voie aux premières solutions innovantes quant au problème que pose l'incertitude prédictive pour le déploiement de l'IA en simulation numérique.

L'hybridation entre apprentissage automatique et simulation numérique ouvre la voie à des avancées scientifiques majeures dans le domaine de la physique computationnelle. À titre d'exemple, la mise en œuvre des simulations numériques sur lesquelles repose l'étude des propriétés des matériaux à l'échelle microscopique est limitée par la lourdeur du calcul des énergies et des forces atomiques. Pour contourner le problème et accélérer ces simulations, des modèles d'apprentissage profond sont utilisés pour apprendre à prédire les quantités coûteuses.

Toutefois, malgré des performances satisfaisantes en prédiction, l'incertitude inhérente aux modèles obtenus par apprentissage profond introduit un biais dans le calcul des observables physiques issues de la simulation.

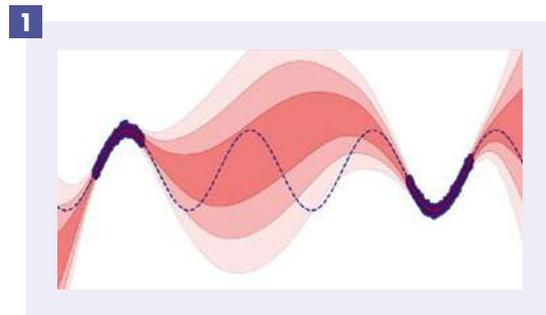
En effet, l'apprentissage automatique se base sur un ensemble d'observations qui servent à ajuster au mieux un modèle dont les paramètres sont incertains. Les biais de simulation induits par cette incertitude dite « épistémique » représentent une limitation clé dans le déploiement de l'IA pour les simulations numériques.

Nous développons des méthodes de quantification d'incertitude des prédictions de réseaux de neurones afin de concevoir des techniques innovantes de correction des

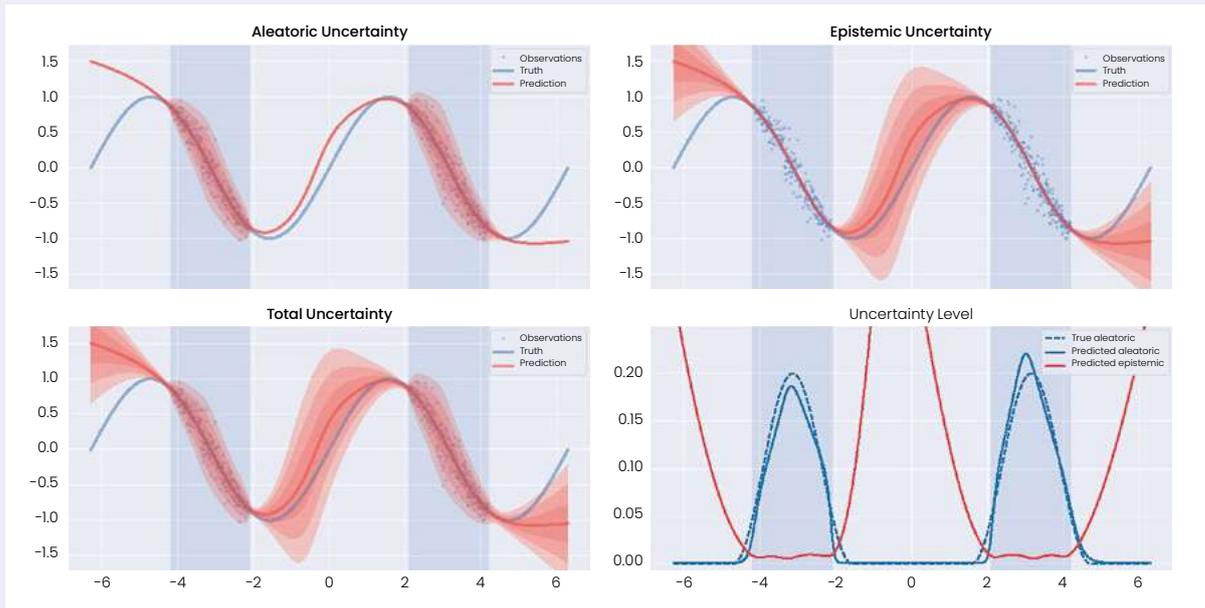
biais de simulation. Ces méthodes se basent sur l'inférence statistique bayésienne, afin de calculer la probabilité qu'un réglage des paramètres du réseau de neurones soit correctement ajusté au regard du nombre limité des observations disponibles. Cette probabilité dépend du bruit que les données peuvent contenir : cette seconde incertitude est nommée « aléatoire ».

## Calculer l'incertitude d'un réseau de neurones

Le logiciel CAUTIONER (*unCertAinty qUanTificatiOn Neural nEtwoRk*), développé au CEA-List, est capable de calculer l'incertitude d'un réseau de neurones en le transformant en réseau de neurones bayésiens, défini par la distribution de poids et de biais probables. Ce nouveau modèle ne peut pas être « entraîné » par des algorithmes conventionnels. Grâce à l'expertise du CEA-List en matière de programmation probabiliste, CAUTIONER est basé sur des algorithmes issus de la famille des méthodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC) qui représentent l'étalon or en matière de calcul de prédiction et de son incertitude. Ce logiciel



2



est accessible au CEA sous la forme d'une librairie Python, incluant les interfaces API du composant, une documentation et une interface graphique afin de faciliter son utilisation sur cluster avec GPU.

### Évaluer l'incertitude de prédiction

De plus, nous développons de nouveaux modèles de réseaux de neurones profonds probabilistes avec la dernière couche bayésienne (*Bayesian Last Layer - BLL*). Version réduite du réseau de neurones bayésien classique, où seule la dernière couche est probabilisée, cette approche a l'avantage unique

de permettre l'évaluation de l'incertitude de prédiction par conception car elle peut être calculée analytiquement. Cette expression explicite a permis le développement d'un algorithme d'optimisation performant type EM (*Expectation Maximization*) pour l'apprentissage des paramètres du réseau de neurones.

Ces outils de quantification des incertitudes permettent de concevoir des corrections des biais pour les simulations numériques évoquées ci-dessus, ouvrant la voie à des avancées scientifiques en physique computationnelle et en science des matériaux.

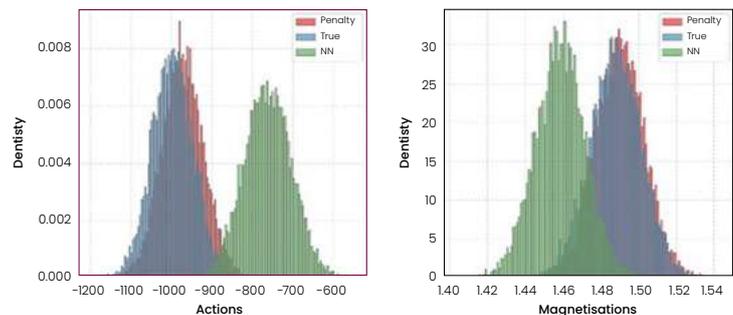
1 L'incertitude (zone en transparence rouge) augmente pour une prédiction éloignée des données d'entraînement (points bleus).

2 Incertitude de prédiction d'un réseau de neurones décomposée en partie aléatoire et épistémique.

Source : Figure extraite de H. Wang & alt. (arXiv:2405.01761)

3 Deux exemples de comparaison d'une propriété physique obtenue par pure simulation coûteuse (rouge) et simulation hybride physique et IA (vert). Le CEA-List a développé une technique d'hybridation de la simulation physique et IA (bleu) qui corrige le biais introduit par les incertitudes de prédiction.

3





**AUGUSTIN LEMESLE**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA



**JULIEN LEHMANN**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

# Succès de PyRAT dans une compétition de vérification formelle

→ Dans un contexte où fiabiliser les systèmes contenant des intelligences artificielles est devenu un enjeu majeur de sécurité, nos équipes ont conçu PyRAT, un outil de vérification formelle de réseaux de neurones. Lors de la dernière édition de la conférence *Computer Aided Verification (CAV2024)*, PyRAT a remporté la 2<sup>e</sup> place à la compétition de vérification de réseaux de neurones (VNNCOMP).

Alors que l'IA occupe une place de plus en plus importante dans notre quotidien, son déploiement au sein de systèmes critiques est un enjeu clé de son succès. Dans ces systèmes, où la moindre défaillance peut provoquer des dommages humains, économiques ou environnementaux irréparables, il est indispensable que toute application logicielle soit certifiée (c'est-à-dire que son comportement soit jugé conforme au cahier des charges en conditions d'utilisation nominales).

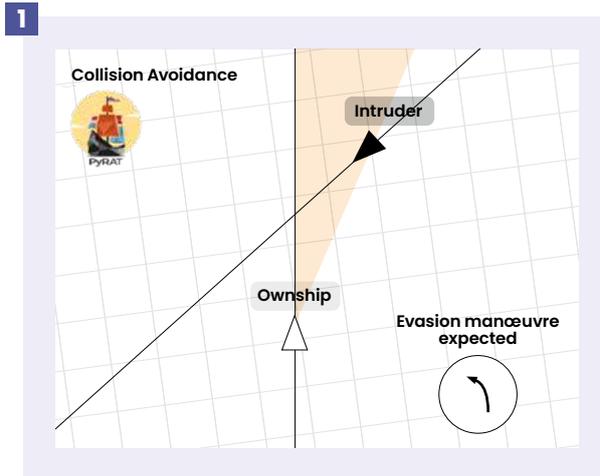
C'est dans cet objectif que les équipes du CEA-List développent des outils de vérification formelle destinés aux applications d'intelligence artificielle. Ils apportent des garanties mathématiques fortes quant au fonctionnement des IA, en vue de leur application en contexte industriel et opérationnel. C'est notamment la vocation de notre outil de vérification formelle de réseaux de neurones, PyRAT, créé en 2019.

PyRAT permet de vérifier la stabilité d'un réseau de neurones (RdN) face à de légères perturbations de ses entrées. Par exemple, dans le domaine de la vision par ordinateur pour l'automobile, considérant un RdN chargé de la reconnaissance automatique des panneaux de signalisation routière, PyRAT contrôlera que la réponse de l'IA ne change pas lorsqu'il pleut ou que la luminosité baisse.



« Cette deuxième place à la VNN-Comp confirme l'efficacité de PyRAT pour assurer la sûreté et la sécurité des systèmes à base d'IA. »

— AUGUSTIN LEMESLE



Il est également possible de vérifier qu'un RdN respecte certaines contraintes de son cahier des charges, dès lors que ces dernières peuvent être exprimées par une formule mathématique.

### L'excellence académique

Pour mener à bien cette procédure de vérification (notoirement complexe), PyRAT se base sur des méthodes classiques d'interprétation abstraite et les combine à des optimisations logicielles adaptées aux RdN (parallélisation sur carte graphique, opérations matricielles...). PyRAT intègre également une représentation précise des opérations complexes des RdN, lui permettant de minimiser les erreurs d'abstractions durant l'analyse. Enfin, l'ajout de méthodes itératives dites « diviser pour régner » ainsi que de nouvelles méthodes d'optimisation ont permis une nette amélioration des performances (précision du résultat et rapidité d'analyse) de PyRAT en l'espace d'un an. En effet, PyRAT a participé deux années consécutives à la compétition internationale de vérification de RdN, atteignant la 3<sup>e</sup> place en 2023 et la 2<sup>e</sup> place en 2024. Ce résultat montre l'excellence académique de cet outil utilisé dans l'industrie, renforçant notre position de leader en vérification formelle. Nos futurs travaux vont permettre d'optimiser encore les performances de l'outil, tout en étendant son champ d'application à de nouveaux types de RdN, plus complexes (*transformers*, *RNN*...). Enfin, PyRAT va également être adapté à l'analyse des RdN destinés à l'embarqué (RdN quantifiés).

1 PyRAT analyse une IA d'évitement pour les drones.  
© CEA

2 Résultat de l'analyse : PyRAT indique dans quels cas l'IA a le comportement attendu ou non.  
© CEA

### Cas d'usage et applications

#### Technip Energies

Évaluation de sûreté d'un RdN pour la détection d'anomalies sur des plateformes off-shore

#### Renault

Évaluation de la robustesse d'images de soudure dans une chaîne de production de voiture.

#### Airbus

Sûreté de RdN embarqués pour l'évitement de collision de drones.

### Projets majeurs

#### France 2030 - Confiance.ai

Maturation & applications de PyRAT

#### ANR - DeepGreen

Sûreté et robustesse de RdN quantifiés

#### Horizon Europe - TRUMPET

Vérification de RdN prenant en compte la confidentialité des données dans le cadre d'un apprentissage fédéré.

### Publications majeures

#### "Reciph: Relational coefficients for input partitioning heuristic"

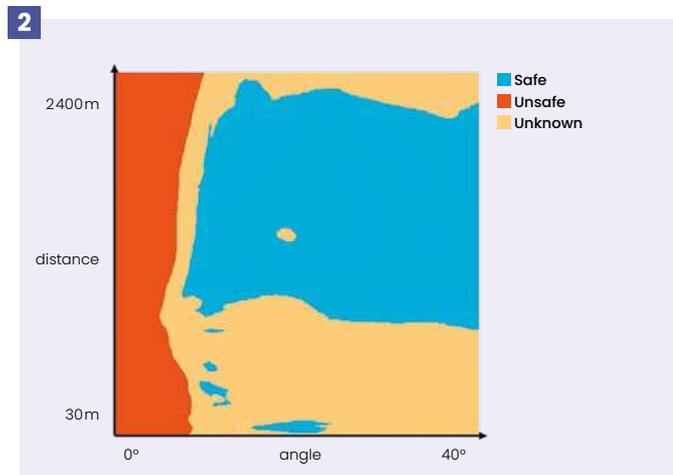
WFVML 2022

#### "A study of an ACAS-Xu exact implementation using ED-324/ARP6983"

ERTS 2024

### Rapport technique

#### "Neural Network Verification with PyRAT", ArXiv preprint 2410.23903





**SANDRA KARA**  
DOCTORANTE  
© CEA

# DIOD (*Self-Distillation Meets Object Discovery*) booste la performance de la découverte d'objets non supervisée dans les vidéos

→ La localisation d'objets d'intérêt dans les vidéos est une tâche fondamentale dans les applications de vision par ordinateur. Pour entraîner des modèles d'IA à effectuer cette tâche avec de bonnes performances, il est nécessaire d'acquérir un grand volume de données annotées, ce qui peut constituer un frein à leur développement. La découverte d'objets a précisément pour but de localiser des objets sans annotation humaine. Elle permet également de gérer des classes d'objets inconnues, contrairement aux détecteurs d'objets classiques.

## Quand la découverte d'objet rencontre l'auto-distillation

Pour découvrir des objets dans une image ou une vidéo, sans avoir à utiliser d'annotations manuelles, des signaux de bas niveau peuvent être utilisés, telle que l'information de mouvement ou de profondeur.

Dans nos travaux, nous nous focalisons sur les méthodes exploitant l'information de mouvement (*Motion Guided Object Discovery*). Ce choix présente plusieurs défis

techniques. Premièrement, l'information de mouvement utilisée comme source de supervision ne cible pas -par définition- les objets statiques, d'où la difficulté à généraliser vers ce type d'objets. En outre, le mouvement de la caméra engendre un bruit empêchant la séparation entre les objets mobiles et les parties du fond ayant un mouvement apparent.

Pour relever ces défis, nous nous sommes intéressés à l'exploitation de l'auto-distillation pour la découverte d'objets, encore inexplorée à ce jour. Ce mécanisme repose sur un modèle « maître », utilisé pour étiqueter automatiquement des images non annotées, ainsi que sur un modèle « élève », qui apprend à résoudre la tâche principale avec les données annotées (soit manuellement, soit par le maître). Ce schéma maître-élève permet d'apprendre sur de nouvelles données non annotées, en améliorant progressivement la qualité des pseudo-étiquettes produites initialement par le modèle maître.

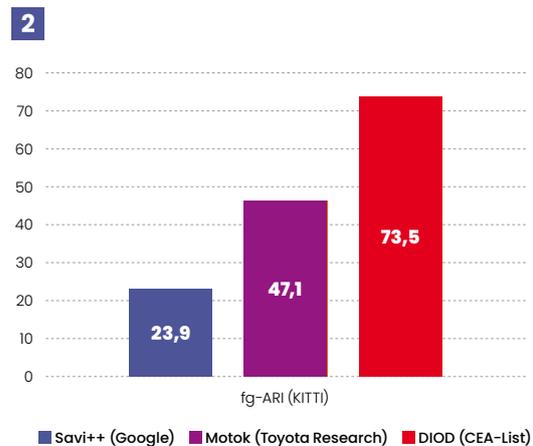




Image d'entrée



Bao et al. (Toyota Research)



BMOD (CEA-List)



DIOD (CEA-List)

1

DIOD est la première méthode qui combine la découverte d'objets et l'auto-distillation. Son architecture maître-élève permet de mettre à jour le maître en fonction de ce qu'apprend l'élève, qui découvre les objets à partir de deux sources : les cartes d'attention du maître avec un critère de confiance pour ne garder que les objets les plus sûrs, et les masques de mouvement dont les segments bruités sont retirés. L'amélioration progressive des pseudo-étiquettes conduit le modèle à augmenter ses performances au cours de l'apprentissage. Cela permet de traiter les différents enjeux techniques évoqués ci-dessus : apprendre à découvrir les objets statiques (par exemple, des voitures garées) que le maître a pu généraliser et réduire substantiellement le bruit engendré par le mouvement de la caméra grâce aux différents filtrages.

DIOD surpasse les autres méthodes de l'état de l'art avec une marge confortable (+18.8 points en fg-ARI, +43.8 points en all-ARI, +8.9 points en F1@score sur la base KITTI). Notre solution est capable de mieux découvrir à la fois les objets mobiles et statiques, d'éliminer le bruit présent sur le fond de l'image et de séparer les objets adjacents de même classe sémantique.

En conclusion, DIOD est une méthode de découverte d'objets performante, fonctionnant sans aucune annotation manuelle. Ses perspectives d'utilisation sont multiples : annotation automatique de données (pour supprimer ou réduire le coût d'annotation), extension aux nuages de points 3D (données LIDAR, très utiles par exemple, pour la conduite automatisée), ou découverte d'objets 2D/3D avec un modèle multimodal (pour bénéficier des avantages respectifs des images RGB 2D et des données LIDAR 3D).

**1** Comparaison de prédictions de la découverte d'objets de trois méthodes de l'état de l'art sur une image de TRI-PD dataset.

© CEA

**2** DIOD surpasse les autres méthodes de l'état de l'art dans la découverte d'objets non supervisée.

© CEA

### Caractéristiques clés

*Découvrir les objets mobiles sans aucune annotation humaine*

*Pré-annotation intelligente des objets mobiles*

### Brevet DD24102 CJ

### Publication majeure

*"DIOD: Self-Distillation Meets Object Discovery."*

Kara, S., Ammar, H., Denize, J., Chabot, F., and Pham, Q. C. (2024).

*In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (rang A\*)*



**CAROLINE VIENNE**  
ADJOINTE AU CHEF DE SERVICE  
© CEA



**JAONARY RABARISOA**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

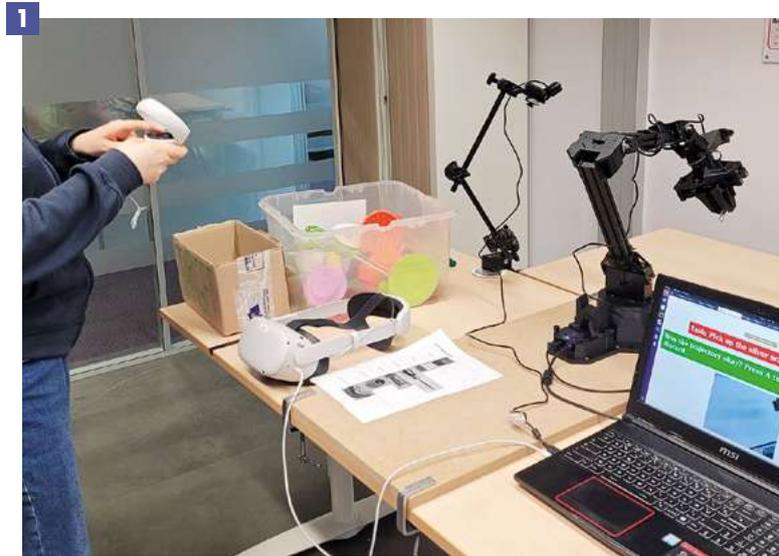
# Démonstration d'IA générative appliquée à la saisie robotique

→ Notre démonstrateur de robotique intelligente illustre le potentiel des approches d'IA générative pour réaliser une tâche robotique spécifiée en langage naturel. Nos équipes ont conçu un agent de manipulation robotique basé sur la vision artificielle et l'apprentissage profond, capable de réagir avec précision à une instruction de haut niveau en langage naturel correspondant à une tâche de saisie.

L'objectif de nos recherches est de concevoir une brique logicielle permettant à un robot de comprendre et d'exécuter des tâches spécifiées en langage naturel (ou indiquées par des images), transformant ainsi des interactions intuitives en actions physiques concrètes.

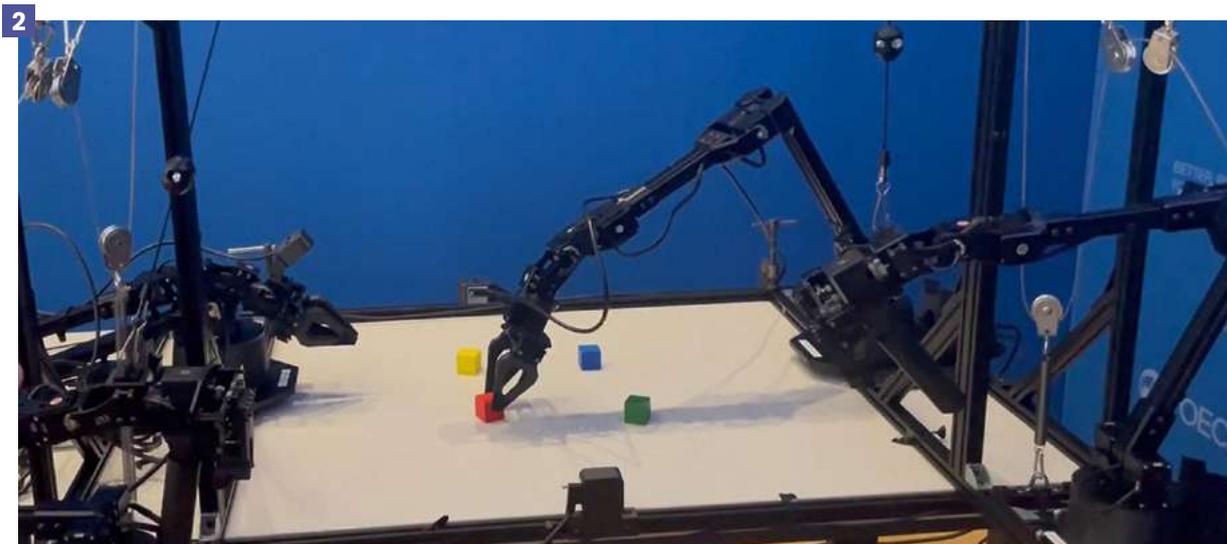
Nous avons intégré un modèle d'IA générique, ou modèle de fondation, basé sur une architecture *Transformer* pré-entraînée sur un large ensemble de trajectoires de robots. Ce modèle est ensuite affiné sur nos propres données afin d'optimiser ses performances pour nos applications spécifiques. Le modèle sélectionné, Octo [1], est conçu pour s'adapter efficacement à diverses configurations robotiques tout en nécessitant un volume de données limité et des ressources de calcul modérées. Cette flexibilité repose sur sa structure modulaire d'attention, qui facilite son ajustement aux spécificités des tâches ciblées, améliorant la généralisation et les performances du modèle sur un large éventail d'applications robotiques.

Pour collecter des données spécifiques à notre problématique de saisie robotique, nous avons mis en place



une fonctionnalité de télé-opération. Elle repose sur une plateforme robotique incluant un robot léger à 6 axes, contrôlé à distance par une manette de réalité virtuelle. Cette méthode de contrôle permet une manipulation précise et intuitive, essentielle à l'acquisition de données de bonne qualité. Pour produire ces données, plusieurs volontaires ont réalisé des saisies robotiques, parmi une dizaine d'objets différents, manipulés dans quatre configurations spatiales distinctes. Cette diversité est cruciale pour assurer la diversité et la représentativité des données recueillies, permettant au robot de traiter une grande variété de scénarios de manipulation.

Enfin, pour corriger d'éventuelles erreurs d'annotation, une étape essentielle de nettoyage des données acquises a été menée à l'aide du logiciel PIXANO, développé au CEA-List. Les données nettoyées ont été utilisées pour *fine-tuner* le



« Ces développements s'inscrivent dans nos travaux sur la programmation intuitive, visant à rendre la robotique accessible aux opérateurs non experts. »

— CAROLINE VIENNE

« Nos travaux visent à développer des systèmes robotiques robustes, accessibles et rapides à déployer, à destination de l'industrie, grâce à l'intelligence artificielle. »

— JAONARY RABARISOA

modèle Octo. Ces données de laboratoire correspondent à un jeu de données d'entraînement de 678 trajectoires et un jeu de test de 70 trajectoires.

Finalement, cet entraînement a abouti à la démonstration de la capacité du système à identifier et saisir un objet de la base d'apprentissage placé seul, ou au milieu de distracteurs, sans perception 3D dédiée.

Les travaux se poursuivent et visent maintenant à réaliser des tâches plus complexes parmi lesquelles des saisies d'objet bimanuelles.

[1] Octo Model Team, D. Ghos, H. R. Walke, K. Pertsch, K. Black, O. Mees, S. Dasari, J. Hejna, T. Kreiman, C. Xu, J. Luo, Y. L. Tan, P. R. Sanketi, Q. Vuong, T. Xiao, D. Sadigh, C. Finn and S. Levine, Octo: An Open-Source Generalist Robot Policy, ArXiv, 2024, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266379116>

**1** Séance d'acquisition de données.

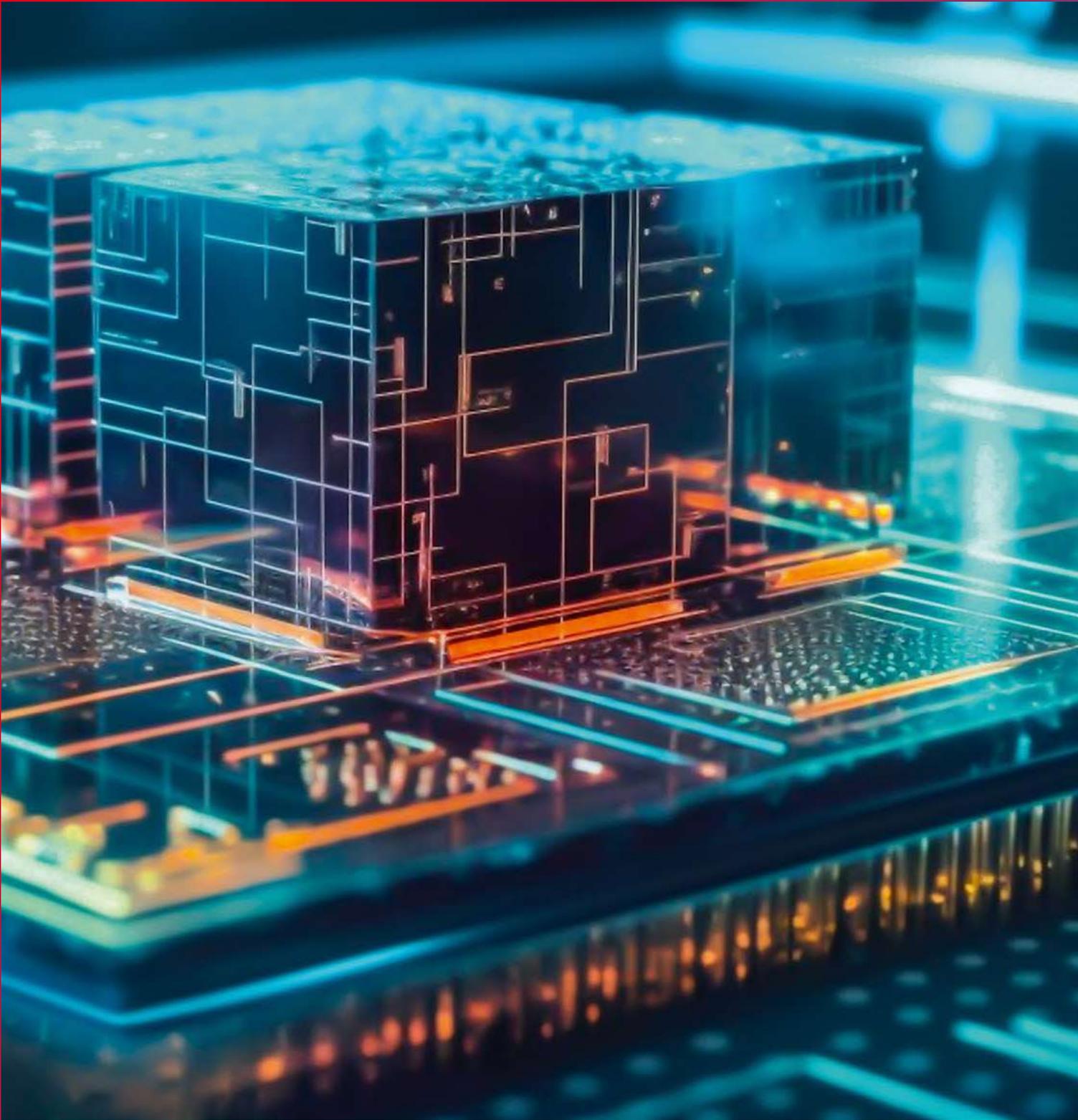
© CEA

**2** Démonstration de saisie robotique 'end to end' lors de la journée de travail sur l'IA à l'OCDE.

© Nikolas Schmidt

**3** Saisie d'un objet-cible parmi des distracteurs.

© CEA



# Calcul avancé et systèmes distribués

→ Dans un monde hyper-numérisé, la demande de puissance de calcul et de capacités de stockage croît, tandis que la numérisation intensive des fonctions nécessite des traitements plus complexes et au plus proche des usages réels. Dans les deux cas, la réduction des besoins énergétiques est cruciale.

Deux axes sont ainsi explorés :

- l'intégration de technologies micro-nanoélectroniques pour proposer des modèles de calcul haute performance et très basse consommation, réduisant ainsi l'empreinte carbone des centres de calcul.
- la conception conjointe logicielle et matérielle d'architectures de calcul pour l'intégration de fonctions à base d'IA au plus près des données dans des composants embarqués.

Ces recherches sont soutenues par une plateforme européenne pour accélérer l'expérimentation et la conception d'innovations dans le domaine du calcul. (cf. encart DECIDE en page 7).

Parallèlement, le déploiement massif du numérique exige une continuité opérationnelle du cloud à l'embarqué. Des programmes de recherche se concentrent sur la collecte et la remontée des données depuis les équipements jusqu'aux

serveurs locaux, voire sur le cloud. Cela nécessite des avancées sur l'abstraction des couches de communication, la mise en place d'orchestrateurs, des mécanismes de traçabilité et de sécurisation des données. Les projets OTPaaS et Data4IndustryX abordent ces enjeux (cf. page 6).

Enfin, le potentiel d'apport des approches à base de calcul quantique pose de nouvelles questions aussi bien sur les technologies de calcul, les méthodes de programmation, de compilation, mais également sur l'évaluation des performances, comme mentionné dans l'encart QLoop en page 5.

## Trois résultats importants couvrant quantique, embarqué et calcul haute performance dans le cloud (HPC) :

- 36 Généralisation de l'évaluation de la valeur d'usage de différents processeurs quantiques (QPU)
- 38 J3DAI : définition d'une architecture avancée d'imageur intelligent sur 3 couches silicium
- 40 Succès de la mise en Open Source du L1 Data Cache (HPDcache)



**STÉPHANE LOUISE**  
DIRECTEUR DE RECHERCHE  
ET EXPERT SENIOR  
© CEA



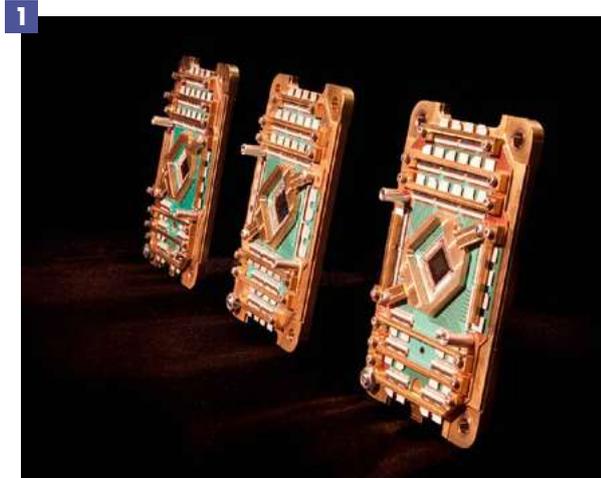
**FÉLICIEN SCHOPFER**  
DIRECTEUR DU PROGRAMME  
QUANTIQUE LNE

# Généralisation de l'évaluation de la valeur d'usage de différents processeurs quantiques (QPU)

→ Les ordinateurs quantiques, avec leurs promesses d'accélération exponentielles pour certaines applications, sont là. Mais à ce jour, ils n'ont pas encore atteint les capacités attendues, en raison de niveaux de bruit élevés. Les ordinateurs quantiques les plus avancés, s'ils ont dépassé la preuve de concept, ne sont pas encore prêts pour une utilisation pratique quotidienne : nous sommes entrés dans l'ère de l'évaluation des performances, mesurant l'écart avec l'applicabilité dans le monde réel : l'utilité quantique (QU).

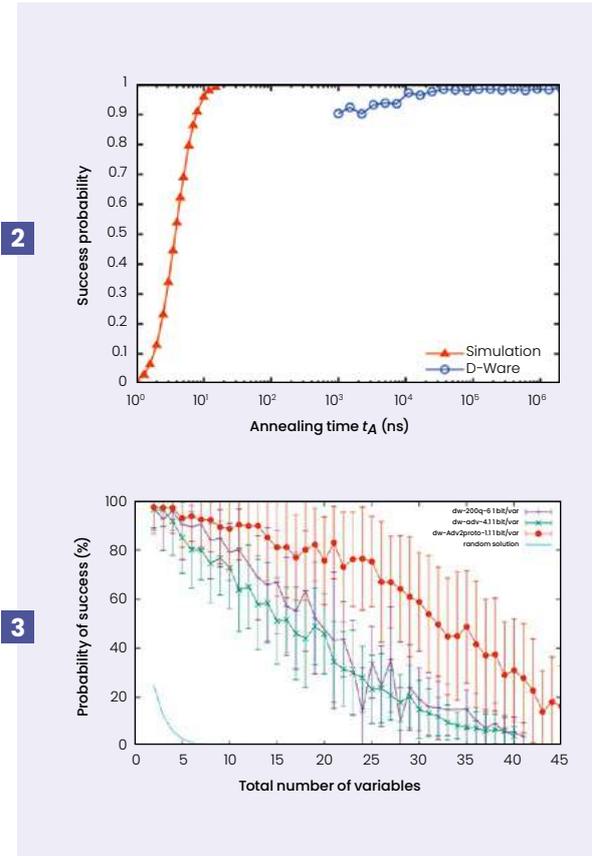
La mesure des performances a guidé le monde de l'informatique traditionnelle depuis sa création, des benchmarks SPEC® pour les CPU au benchmark BLAS pour les GPU, qui domine le classement Top-500. L'informatique quantique est encore trop récente pour avoir défini un benchmark spécifique de référence, mais les années à venir seront cruciales pour en définir un.

Le projet BACQ de l'initiative quantique MetriQs-France, financée par France 2030, vise à proposer les éléments constitutifs d'une évaluation centrée sur les applications pour les QPU pouvant mener à une standardisation, tant au



niveau européen (CEN/CENELEC) qu'international (ISO/CEI). La série de tests de référence repose sur quatre principaux domaines d'application considérés comme la pierre angulaire de l'utilisation future des QPU : les problèmes d'optimisation, la résolution de systèmes linéaires, la factorisation en nombres premiers et les simulations quantiques de problèmes à n-corps. Ces applicatifs sont étudiés conjointement par les instituts List, Irig et IphT du CEA.

Étudier l'avantage applicatif, tout en garantissant l'équité du test, nécessite d'autoriser une grande flexibilité dans le choix d'implémentation des tests, afin de tirer parti des forces de chaque famille de QPU. Cela nécessite de développer une expertise propre à chaque architecture. L'approche est ainsi pertinente pour une large gamme de technologies de QPU, tant les QPU à portes que les QPU analogiques (aussi appelés « simulateurs quantiques »). Elle est ainsi robuste aux évolutions des QPUs vers l'ère du calcul quantique tolérant aux fautes (FTQC).



Les réalisations récentes portent sur une étude approfondie d'un problème d'optimisation classique : la série Gn de *Maximum Cardinality Matching* [1], menée en collaboration avec l'équipe d'informatique quantique de ZF-Jülich, le plus grand centre HPC allemand ; la résolution de systèmes linéaires utilisant les recuits quantiques DWave® [2]. La première étude fournit un catalogue des meilleures pratiques pour exploiter les QPU Dwave® et offre un aperçu de leurs capacités et limites pour la résolution de problèmes pour lesquels ils sont spécifiquement conçus. La seconde démontre que, pour les problèmes que ces QPU ne devaient pas traiter initialement, ils obtiennent finalement un avantage polynomial par rapport au calcul classique dans certaines conditions. Ces résultats fournissent des premières briques de constitution de benchmark pour les processeurs quantiques.

[1] Daniel Vert, Madita Willsch, Berat Yenilen, Renaud Sirdey, Stéphane Louise, Kristel Michiels: **Benchmarking quantum annealing with maximum cardinality matching problems.** *Frontiers Comput. Sci.* 6 (2024).  
 [2] Stéphane Louise: **Benchmarking Quantum Annealers with Linear System Solving.** *QCE* 2024: 1149–1155.

**Références majeures**

*Expertise en problèmes d'optimisation et résolutions de systèmes d'équation par recuit quantique*

**Partenariats**

Thales, Eviden, LNE, CNR

**Collaboration**

FZ Jülich (projet AIDAS)

- 1 Trois processeurs D-Wave 2000Q dans un support. © D-Wave
- 2 Comparaison de l'évolution adiabatique théorique et du recuit quantique réel. © CEA
- 3 Comparaison de l'amélioration des performances sur 3 générations de QPU. © CEA

« Bien que le FTQC soit nécessaire pour atteindre une accélération potentiellement exponentielle, l'ère NISQ ouvre déjà un potentiel d'accélération polynomiale dans certaines applications, ouvrant ainsi la voie à l'Utilité Quantique (QU). »

— STÉPHANE LOUISE

« Les technologies quantiques sont souvent entourées de mythes dans la perception du public. C'est le rôle de la science et de la métrologie de permettre leur adoption en toute confiance. C'est l'ambition du CEA, d'Eviden, de Thales et de Teratec en concevant des solutions d'évaluation des performances applicatives pour les QPU dans le cadre du projet. »

— FÉLICIEN SCHOPFER



**SÉBASTIEN THURIES**  
CO-DIRECTEUR IRT SMART IMAGER  
@NANOelec ET EXPERT  
© CEA



**BENOIT TAIN**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

# J3DAI : définition d'une architecture avancée d'imageur intelligent sur 3 couches silicium

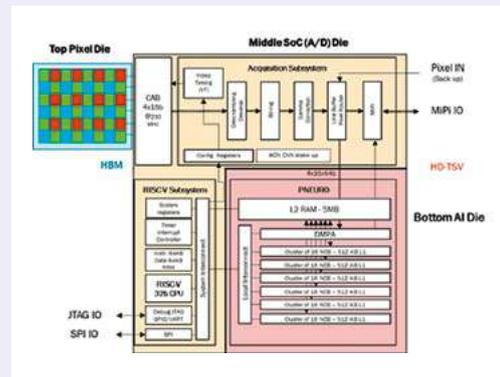
→ Les capteurs d'images intelligents révolutionnent l'acquisition et l'analyse visuelle en combinant capture et traitement en temps réel. Leur conception repose sur la sélection et l'intégration de traitements directement dans le capteur, en tirant parti des technologies 3D pour un accès rapide aux données, une réduction locale et une réponse adaptée, tout en respectant les exigences des contraintes matérielles.

L'architecture du démonstrateur d'imageur intelligent 3-couches nommé J3DAI étudié dans le programme IRT Smart Imager s'appuie sur l'accélérateur hardware PNeuro du CEA-List, qui permet l'inférence de multiples réseaux IA à la dimension du capteur d'image. L'architecture de cet imageur est visible en figure 1. Des simulations réalisées sur un réseau de type Mobilenet V1 ont permis de montrer que cette architecture pré-

sente une consommation de 50 mW dans le cas d'un flux vidéo de 30 images par secondes. De plus, une comparaison de performances et de surface avec l'imageur IA de Sony publié en 2021 à la conférence ISSCC montre un temps

Gain de  
**3x**  
en efficacité MAC  
et surface silicium

1

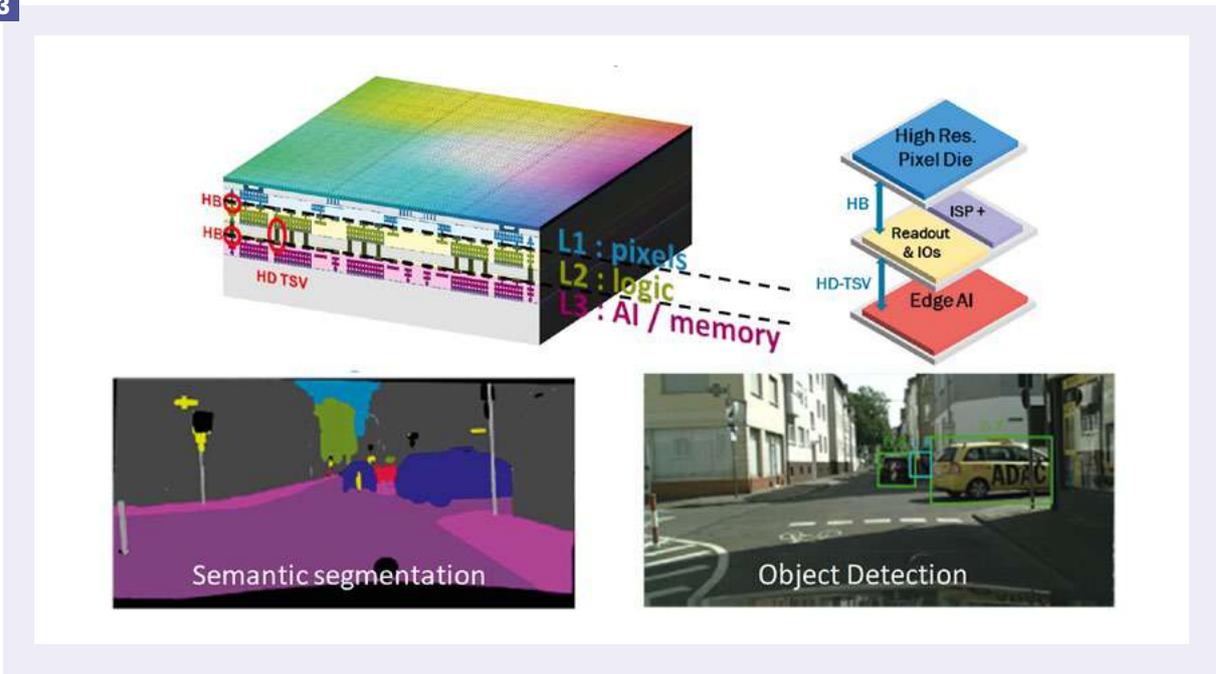


2

	CEA-List	SONY ISSCC 2021
Techno	28 nm	22 nm
Pixel	12MPX @ 1µm pitch	12MPX @ 1.55µm pitch
MACs	75K	230K
Chip size	35 mm <sup>2</sup> (4H3C/CLayers)	124 mm <sup>2</sup> (7.5C8H*6.200V*2Layers)
CNN + Internal Memory	36 mm <sup>2</sup> (on-chip result)	31 mm <sup>2</sup> (estimated 50% bottom chip)
Internal Memories (L1+L2)	3-5 MB	1-8 MB
Latency Mobilenet v1 @202.5MHz - (6B P1Q)	3.09 ms	3.1 ms / 4.8 ms
MAC/cycle	77%	30% / 26%

**1 brevet**  
Imageur intelligent pour analyse intensive d'images en temps réel

3

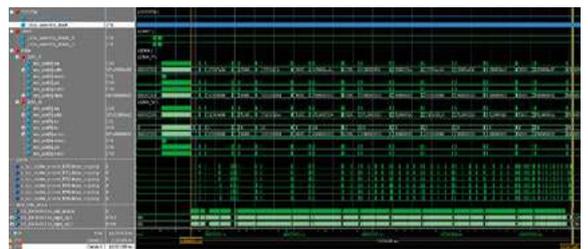
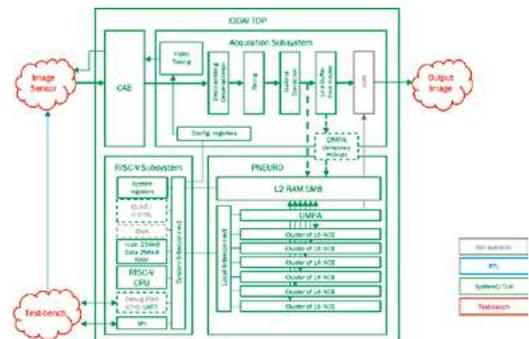


d'exécution similaire (3,69 ms vs 3,1 ms) mais avec trois fois moins d'unités de calcul MAC (*Multiply ACcumulate*), 768 vs 2304, et trois fois moins de surface silicium (36 mm<sup>2</sup> vs 124 mm<sup>2</sup>) comme le montre le tableau de la figure 2.

En parallèle, une plateforme virtuelle (Figure 4), s'appuyant sur les outils CAD SIEMENS a été développée. Cette plateforme basée sur un système PNeuro associé à un processeur de type RISC-V (32 bits) permet une simulation grandement accélérée (x2000 : 13 secondes vs. 7h et 45 minutes) de tâches complexes tout en garantissant un résultat équivalent à la simulation bas niveau.

Avec un ralentissement notable du marché dans le secteur des smartphones, les images s'adaptent aux besoins des marchés, où de nouvelles opportunités se présentent dans les domaines de l'automobile, de l'industrie et de la sécurité. Les approches développées dans le programme Smart Imager, basées sur les technologies d'empilement 3D multicouches, avec introduction d'intelligence artificielle au sein même du capteur, répondent parfaitement aux enjeux des marchés actuels et à venir, dans lesquels évoluent les partenaires industriels du programme.

4



**1 Architecture J3DAI.**

© CEA

**2 Performance J3DAI vs SONY ISSCC 2021 (Gain = 3x en efficacité MAC et surface).**

© CEA

**3 Les applications d'intelligence artificielle portée au plus proche (edge IA) des capteurs d'image grâce à l'intégration 3D multi plaques.**

© CEA

**4 Plateforme virtuelle J3DAI (SysC&RTL).**

© CEA



**CÉSAR FUGUET**  
CHARGÉ DE RECHERCHE INRIA  
© César Fuguet



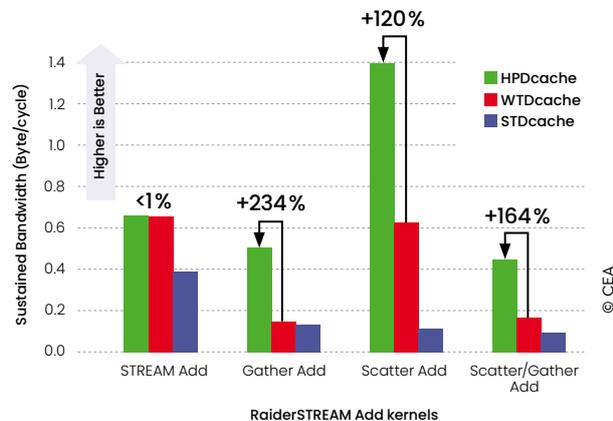
**TANUJ KHANDELWAL**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR

# Succès de la mise en Open Source du L1 Data Cache (HPDcache)

→ Les domaines du HPC (*High-Performance Computing*) et de l'intelligence artificielle sont souvent limités en performance par la latence et la bande passante mémoire. Ces contraintes affectent la rapidité et l'efficacité des calculs, rendant cruciale l'optimisation des systèmes mémoire pour améliorer les performances globales.

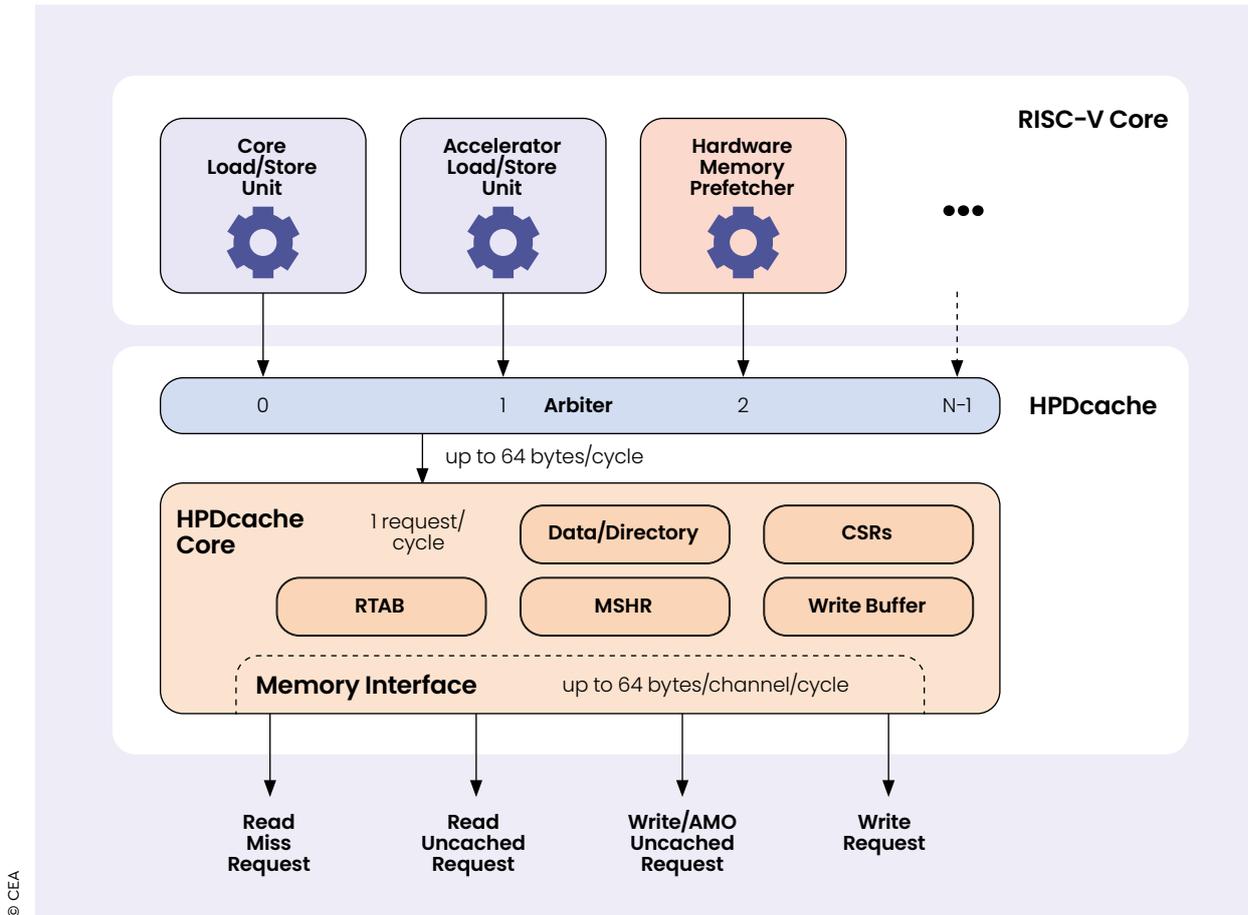
Dans ces domaines, les applications utilisent une quantité croissante de données et réalisent des motifs d'accès mémoire irréguliers. Ces motifs d'accès diminuent l'efficacité des mémoires caches, ce qui constitue un défi important pour l'optimisation des performances. Le HPDcache a été conçu pour pallier ce problème, en permettant l'exécution simultanée de plusieurs requêtes mémoire. Cette approche permet de masquer la latence d'accès mémoire et fournit une bande passante élevée, améliorant ainsi les performances globales des systèmes.

Le HPDcache a été mis en open-source via le catalogue d'IP de l'OpenHW Group, ce qui le rend accessible à une large communauté de développeurs et d'ingénieurs. Il est actuellement utilisé avec le cœur CVA6, un cœur open-source RISC-V 64-bits largement adopté en Europe pour ses applications variées telles que le HPC et l'intelligence artificielle. Les tests ont montré un facteur d'accélération allant jusqu'à 3,3x par rapport aux caches précédemment utilisés avec le CVA6, menant à une amélioration significative des performances.



La qualité industrielle du HPDcache est assurée par le plan de test complet et un « testbench UVM ». Ces outils permettent de vérifier et de valider les performances et la fiabilité du cache, garantissant ainsi qu'il répond aux exigences des applications industrielles. Cette approche rigoureuse en matière de tests est essentielle pour garantir que le HPDcache fonctionne de manière fiable dans des environnements de production. Le HPDcache a été intégré dans des circuits intégrant l'accélérateur VRP/VxP dans deux circuits (EPAC et RHEA) de l'European Processor Initiative (EPI). Cette intégration sur silicium démontre la maturité et la robustesse du HPDcache, le rendant prêt pour une utilisation industrielle. En résumé, le HPDcache représente une avancée majeure dans les domaines du HPC et de l'intelligence artificielle, offrant des solutions innovantes pour surmonter les défis de la latence et de la bande passante mémoire.

Les mises en open-source de cette IP et de son « testbench » ont permis au CEA d'intégrer des projets collaboratifs tels que le projet européen TRISTAN qui vise la diffusion des solutions à base de RISC-V. Cette initiative apporte des collaborations de recherche, en particulier par l'intermédiaire de l'Open Hardware Group pour l'écosystème RISC-V CVA6.



© CEA

### Cas d'usage, application, transfert

Plusieurs acteurs européens, dont Bosch et Thales, utilisent le couple CVA6-HPDcache pour leurs processeurs automobiles et systèmes embarqués. Le HPDcache est d'ailleurs utilisé dans la configuration de base du CVA6. Le BSC a intégré le HPDcache avec des processeurs RISC-V haute performance, développés en interne, avec l'objectif qu'ils fassent partie de la prochaine génération de supercalculateurs Marenostrom.

### Projets majeurs

"HPDcache: Open-Source High-Performance L1 Data Cache for RISC-V Cores"

Cesar Fuguet  
(2023) 10.1145/3587135.3591413, Conférence CF-OSHW

Liens vers les dépôts Open Hardware Group github





# Instrumentation et usine du futur



© Cyrille DUPONT/CEA (Dupont Productions)

→ Le CEA-List mène des recherches dans le domaine de l'instrumentation et de l'usine du futur sur l'ensemble de la chaîne, du capteur aux équipements de décision et d'action en interaction avec le monde réel. Cela inclut le traitement automatisé des données, le contrôle non destructif, la fabrication additive, la robotique intelligente, les interfaces sensorielles, la réalité virtuelle et augmentée.

Nos équipes conçoivent ainsi des systèmes de mesures intégrant des capteurs innovants, des capacités de traitement et d'exploitation de la donnée de plus en plus avancées, au plus près des capteurs. Ces avancées ont un large champ d'application dans l'industrie, notamment pour la détection d'anomalies, la sanction automatique et la prise de décision. Les travaux en robotique et machines intelligentes se concentrent sur le développement de systèmes modulaires et agiles, faciles à programmer, et sur l'amélioration des capacités d'interaction du robot. Cela implique la conception de technologies de manipulation

fines et intelligentes par le robot, de capacités de perception de l'environnement par le robot pour la prise de décision et de systèmes d'interaction fiables homme-robot. Ces recherches s'appuient sur des plateformes d'expérimentation et de recherche dédiées et ouvertes aux collaborations avec les partenaires industriels (cf. encart PRISM en page 7).

## Quatre résultats marquants illustrent nos recherches dans ce domaine :

- 44 **Manipulation dextre bimanuelle**
- 46 **Détection et discrimination en temps réel de mélanges de gaz radioactifs à l'aide d'aérogel de scintillateurs inorganiques**
- 48 **Diagnostic des câbles électriques par apprentissage automatique : une innovation primée à AUTOTESTCON**
- 50 **L'imagerie X révèle l'impact de la foudre sur les composites carbone**



**MATHIEU GROSSARD**  
DIRECTEUR DE RECHERCHE  
© CEA



**CLÉMENCE DUBOIS**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

# Manipulation dextre bimanuelle

→ Automatiser des tâches manuelles complexes de pièces variées dans des environnements non structurés est un enjeu industriel et scientifique majeur. Pour y répondre, le CEA-List a développé un système de manipulation dextre bimanuelle. Ses doigts reconfigurables, dotés d'une perception multimodale, offrent 80 prises différentes avec une maîtrise fine des efforts, tout en détectant les glissements des objets.

Depuis plusieurs années, le CEA-List travaille sur la conception et la commande de préhenseurs dextres pour diverses applications industrielles. L'objectif est d'automatiser des tâches nécessitant la dextérité des deux mains humaines, notamment dans des environnements non structurés. Ce défi scientifique répond à des enjeux sociétaux essentiels, tels que l'amélioration des conditions de travail et la réduction de la pénibilité.

Le système développé a été validé dans le cadre du projet européen H2020 Tracebot au regard de ses performances en contexte de manipulation bimanuelle, démontrant une efficacité similaire au travail manuel.

Il comprend des préhenseurs pluridigitaux reconfigurables, chacun constitué de 4 doigts à 3 phalanges, équipés de capteurs tactiles hybrides piézoélectriques/piézo-résistifs. Cela offre 18 degrés de liberté, dont 14, sont actionnés. Le CEA-List a conçu les préhenseurs et leur commande, les capteurs tactiles provenant du CEA-Leti.



4 doigts à 3 phalanges

18 degrés de libertés au global, dont 14 actionnés.

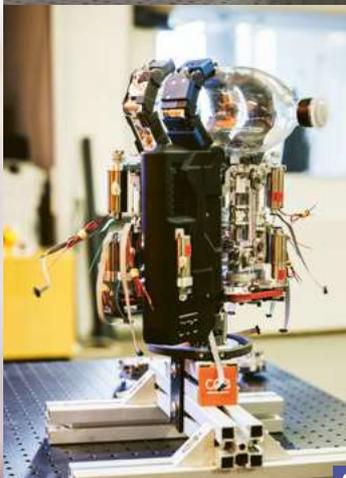
80 prises

«L'avènement de cette génération de préhenseurs pluridigitaux ouvre la voie à l'automatisation de tâches qui demeureraient jusqu'alors manuelles en raison de leur complexité.»

— MATHIEU GROSSARD

«La perception multimodale d'un système de préhension favorise sa capacité à interagir finement avec son environnement.»

— CLÉMENCE DUBOIS



2

**1** Zoom sur un doigt de la main robotisée Tracebot.

© R.Poulverel/CEA

**2** Une capacité exceptionnelle de force de serrage : 20N au niveau de la phalange (le préhenseur soulève un poids de 2 kg avec un seul doigt).

© CEA

**3** Le préhenseur peut saisir des objets aux formes et aux tailles variées en adaptant la configuration de sa prise et en conservant sa précision sur de petits objets.

© R.Poulverel/CEA

3

La perception multimodale combine des informations kinesthésiques, tactiles et visuelles. Les capteurs tactiles détectent des événements critiques comme les glissements d'objets, l'insertion et l'assemblage. Des algorithmes d'apprentissage supervisé classifient ces événements, permettant une interaction plus sûre et plus efficace avec l'environnement.

La manipulation dextre est au cœur du développement, avec une capacité à effectuer des mouvements précis et adaptables. Grâce à des actionneurs à hautes performances et faibles frottements, le système peut réaliser 80 prises différentes, attestant de sa flexibilité et de sa capacité à manipuler une grande variété d'objets. Le contrôleur assure un pilotage précis en position et en effort, contribuant à une automatisation plus intelligente et moins contraignante pour les travailleurs. L'association de ces technologies offre un potentiel important pour la transformation des secteurs comme la fabrication, la logistique et la santé, en réduisant la charge de travail physique et en améliorant la qualité des produits. Elle ouvre également la voie à des applications dans des domaines où la manipulation précise est cruciale, comme la robotique médicale et l'assistance aux personnes âgées.

### Partenariats majeurs

Dans le cadre du projet européen H2020 Tracebot, le CEA a développé une station de manipulation bimanuelle composée de deux préhenseurs équipant des bras collaboratifs. Cette station a été intégrée dans un démonstrateur chez ASTECH, un partenaire du projet. Les performances du système ont été validées dans un contexte réel - des tâches de manipulation de matériel médical - visant un enjeu actuel majeur : la production automatique de kits stériles.

Les prochaines étapes techniques incluent le développement de stratégies de planification pour la manipulation robotique bimanuelle, notamment via l'apprentissage par renforcement.

Le transfert technologique de composants HW & SW est prévu dans le cadre d'un partenariat avec la société FINRIP.

### Brevet DD24102 CJ

**Manipulation robotique et glissement,**  
Grossard Mathieu, Aloui Saïfeddine,  
Ayrat Theo

### Publication majeure

**"Comprehensive analysis of human gesture: application for the specification of dexterous robotic grippers"**

J. M. Escorcía, M. Grossard, F. Gosselin  
*ASME Journal of Mechanical Design*, pages  
041408, vol. 145-2023

**"Spectro-temporal RNN structure for object slip detection using piezoelectric tactile sensor in robotic grasping"**

2023: T. Ayrat, S. Aloui, M. Grossard  
*IEEE/ASME AIM 2023*



**DR. BENOÎT SABOT**  
EXPERT  
© CEA



**CHRISTOPHE DUJARDIN**  
PROF. UNIVERSITÉ CLAUDE  
BERNARD LYON 1 (UCBL)



**FRÉDÉRIC CHAPUT**  
PROF. ÉCOLE NORMALE  
SUPÉRIEUR DE LYON (ENS)

## Détection et discrimination en temps réel de mélanges de gaz radioactifs à l'aide d'aérogel de scintillateurs inorganiques

→ Un dispositif utilisant un aérogel scintillant, permettant des mesures en temps réel des gaz radioactifs, a été développé et testé par une équipe pluridisciplinaire du CEA, de l'ENS Lyon et de l'UCBL. Une proposition alternative aux méthodes actuelles, plus rapide, plus compacte qui, de plus, permet de séparer les radionucléides.

Le  $^3\text{H}$ , le  $^{85}\text{Kr}$  et le  $^{14}\text{C}$  sont des gaz radioactifs produits par l'industrie nucléaire. Bien qu'ils ne présentent pas de risque majeur, leurs rejets sont réglementés et leur mesure précise constitue un indicateur essentiel pour surveiller le bon fonctionnement des installations. Cependant, ces radionucléides sont des émetteurs bêta purs et nécessitent des procédés de détection et de mesure spécifiques.

Les technologies de mesure actuelles, qui reposent principalement sur des principes de mélange gaz-liquide ou gaz-gaz, sont coûteuses, complexes et lentes. De plus, elles nécessitent souvent la mobilisation d'un laboratoire d'analyse et produisent des déchets. Enfin, ces méthodes ne permettent pas de discriminer facilement les émetteurs bêta purs sans recourir à des mesures croisées impliquant plusieurs appareils ou techniques.

Des recherches menées conjointement par l'Institut Lumière Matière (UCBL), le Laboratoire de Chimie de l'ENS Lyon (ENS Lyon) et le Laboratoire National Henri Becquerel (CEA) ont abouti au développement d'une technologie innovante pour la détection en temps réel des gaz radioactifs. Elle est fondée sur la synthèse d'un aérogel scintillant inorganique. Le composite obtenu, transparent, est ultra-poreux (pores d'environ 100 nm) avec seulement 15 % de matière solide. Cette architecture singulière facilite la diffusion des gaz à



*«De longues années de construction et de conception de nouvelles méthodes fondées sur la scintillation ont mené à un résultat très gratifiant.»*

— DR. BENOÎT SABOT

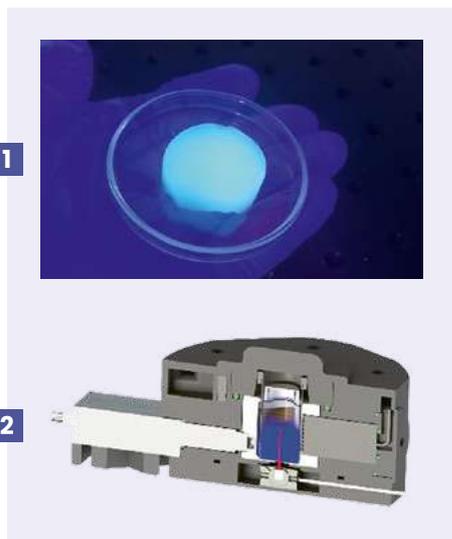
*«Une collaboration riche en échanges, dynamique et pluridisciplinaire, ouvrant la voie à de nouvelles façons de faire de la métrologie des radionucléides par scintillation.»*

— CHRISTOPHE DUJARDIN ET FRÉDÉRIC CHAPUT

travers l'aérogel. Lorsqu'un gaz pénètre dans ce scintillateur, l'énergie des rayonnements bêta est convertie en lumière visible.

Le nouveau scintillateur a été intégré dans différents dispositifs compacts et très sensibles, capables de détecter les flashes lumineux et de mesurer chaque photon presque instantanément. Le premier dispositif, dédié à la métrologie, repose sur une nouvelle méthode appelée Compton-TDCR. Il utilise trois photomultiplicateurs et un détecteur gamma associé à un faisceau mono-énergétique, ce qui permet de mesurer le rendement de scintillation et ainsi de quantifier précisément les radionucléides. Le deuxième dispositif, un prototype plus opérationnel, utilise deux photomultiplicateurs. Bien qu'il nécessite un étalonnage, il permet une mesure en ligne des gaz radioactifs et représente un prototype réellement utilisable sur le terrain, faisant déjà l'objet de brevets.

Avec ces nouveaux dispositifs et méthodes, les chercheurs ont repensé la manière d'analyser les impulsions lumineuses. Contrairement aux approches classiques de scintillation, ils exploitent les propriétés temporelles des signaux, et pas uniquement les comptages. Cette analyse fine des émissions lumineuses a permis de développer une méthode innovante capable de distinguer et de mesurer en ligne les émissions bêta pures de différentes énergies. Il a ainsi été possible de quantifier un mélange de  $^3\text{H}$  et de  $^{85}\text{Kr}$  en seulement 100 secondes de mesure. Ces avancées ont été validées tant théoriquement qu'expérimentalement.



**1** Photographie du premier prototype de scintillateur poreux sous lumière ultraviolette.  
© ENS Lyon

**2** Représentation CAO du dispositif Compton-TDCR avec le scintillateur en son centre.  
© B. Sabot

### Résultats

**Un prototype étalon, un prototype de mesure de terrain Une détection de tritium en ligne en 100 s sur un premier prototype non optimisé à  $1 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$  Une séparation de mélange bêta pur en ligne avec une simple mesure de 100 s.**

### Brevets

**Trois brevets ont été déposés portant sur la méthode de discrimination, un prototype de dispositif de mesure des émetteurs bêta purs, un dispositif de mesure de radon avec la discrimination thoron.**

### Projets

**FET-OPEN SPARTE (2020-2024), EPM RadonNET (2024-2027), LNE SCINTI+ (2024- 2028).**

### Publications majeures

**“Real-time detection and discrimination of radioactive gas mixtures using nanoporous inorganic scintillators”**

Raphael Marie-Luce, Pavlo Mai, Frederic Lerouge, Yannis Cheref, Sylvie Pierre, Benoit Sabot, Frederic Chaput & Christophe Dujardin  
(2024) *Nature Photonics* 18, 1037-1043

**“Experimental facility for the production of reference atmosphere of radioactive gases (Rn, Xe, Kr, and H isotopes)”**

B. Sabot, M. Rodrigues, S. Pierre  
(2020) *Applied Radiation and Isotopes* 155,108934

**“A compact detector system for simultaneous measurements of the light yield non-linearity and timing properties of scintillators”**

Benoit Sabot, Chavdar Dutsov, Philippe Cassette, Krasimir Mitev, Matthieu Hamel, Guillaume H. V. Bertrand, Kheirredine Lebbou & Christophe Dujardin  
(2024) *Nature Scientific Reports* 14, 6960





**HANANE SLIMANI**  
DOCTORANTE  
© CEA

# Diagnostic des câbles électriques par apprentissage automatique : une innovation primée à AUTOTESTCON

→ Le CEA-List a reçu le *Best Paper Award* lors de la conférence AUTOTESTCON, événement mondial sur le test automatique, organisé par l'IEEE pour les décideurs des secteurs militaire et aérospatial. Cette récompense valorise une méthode innovante et bas coût de diagnostic précis des défauts des câbles électriques. Une avancée importante vers une maintenance préventive plus efficace et plus accessible.

Afin de surmonter les difficultés liées à la reconstruction de données compressées de l'OMTDR (*Orthogonal Multi-tone Time Domain Reflectometry*), le CEA-List propose de nouvelles approches basées sur l'apprentissage automatique. Ces méthodes permettent de diagnostiquer les défauts à partir des mesures compressées de l'OMTDR, sans passer par une étape de reconstruction.

Le diagnostic des défauts s'articule en deux étapes : tout d'abord la détection, qui consiste à estimer leur impédance, puis la localisation, qui estime leur position à partir des défauts détectés. Ces estimations sont effectuées à l'aide de deux modèles d'apprentissage automatique : l'algorithme KNN (*K-Nearest Neighbors*) et un CNN (*Convolutional Neural Network*).

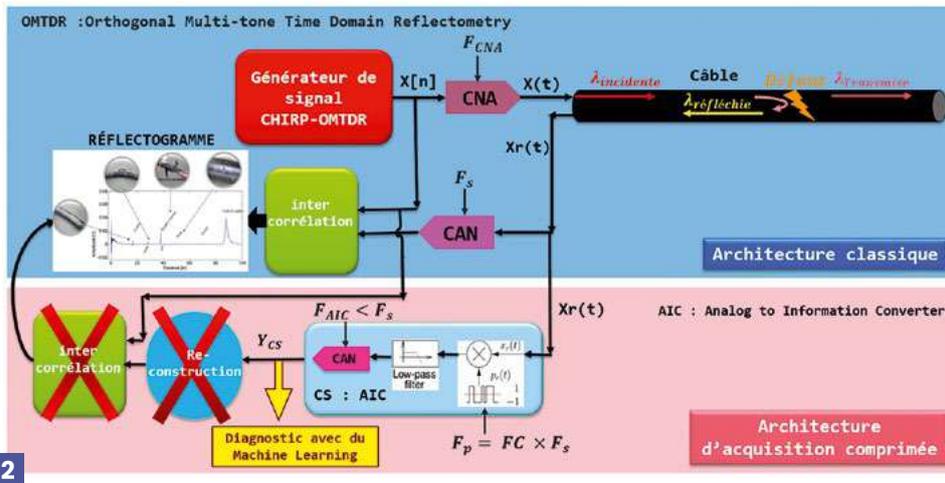
Cette technique évite le recours à des algorithmes itératifs et complexes de reconstruction du signal compressé, ouvrant ainsi la voie à la conception d'architectures de réflectométrie mieux adaptées aux applications embarquées nécessitant une faible latence ou un traitement en temps réel. Les résultats obtenus démontrent une excellente précision pour l'estimation d'impédance et de la localisation de

- 1 Cérémonie de remise du *Best Paper Award* par Michael Seavey (*Technical Program Chair*) et Bob Rassa (*Chair*) lors de la conférence IEEE AUTOTESTCON.  
© J. Reisman/AUTOTESTCON
- 2 Architecture classique de la réflectométrie et architecture d'acquisition compressée de la réflectométrie.  
© H.Slimani/CEA
- 3 Exemple de mesures simulées d'acquisition compressée de la réflectométrie OMTDR pour différents types de défauts.  
© H.Slimani/CEA



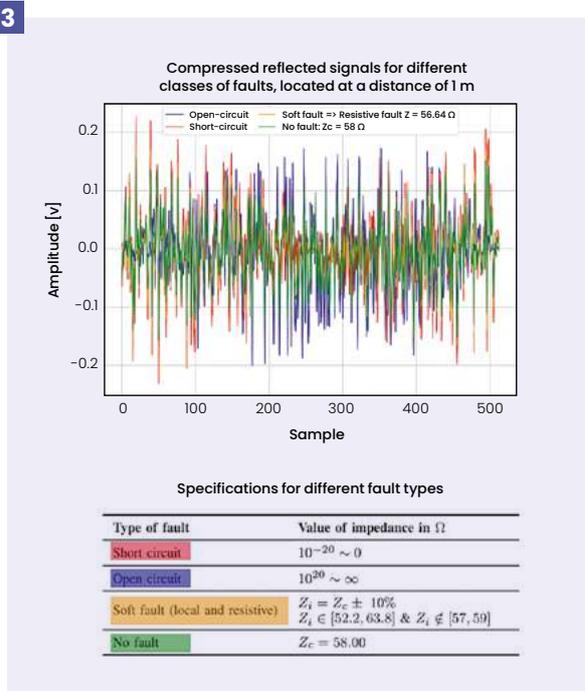
« Quand la complexité des signaux compressés devient un défi, l'IA prend le relais pour révéler les défauts cachés des câbles en un instant. »

— HANANE SLIMANI



défauts. Le CNN excelle dans l'estimation de l'impédance, tandis que le KNN s'avère plus performant pour la localisation des défauts. Le choix entre ces deux modèles dépend des exigences spécifiques de l'application, notamment des ressources disponibles, de la précision requise et du niveau de bruit. L'étude a également révélé des résultats prometteurs pour des facteurs de compression élevés dans la localisation des défauts.

La distinction obtenue illustre le potentiel de l'IA pour traiter directement les données compressées dans le cadre d'un diagnostic efficace des défauts dans les câbles.



**Brevet**

*Diagnostic de défauts dans les câbles électriques via des méthodes d'apprentissage automatique et de la réflectométrie.*

**Publications majeures**

*“Machine Learning Approach for Classification of Faults in Cable via Compressed Sensing Time-Domain Reflectometry”*

H. Slimani, Y. Gargouri, F. Ngolé and N. Ravot  
979-8-3503-6058-5/24/31.00 ©2024  
IEEE/DOI:10.1109/PHM61473.2024.00061  
(finalist Best Paper Award)

*“Detection, Localization and Characterization of Fault in Cable via Machine Learning Approach Based on Compressed Sensing Time-Domain Reflectometry”*

H. Slimani, Y. Gargouri, F. M. Ngole Mboula and N. Ravot  
2024 IEEE AUTOTESTCON, National Harbor, MD, USA, 2024, pp. 1-9, doi: 10.1109/AUTOTESTCON47465.2024.10697515 (Best Paper Award)





**DR. ADRIEN STOLIDI**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR ET EXPERT  
© CEA



**DR. AMÉLIE JARNAC**  
INGÉNIEURE DE RECHERCHE À L'ONERA  
© Amélie Jarnac

# L'imagerie X révèle l'impact de la foudre sur les composites carbone

→ Prisés par le secteur aéronautique pour leur légèreté et leur efficacité énergétique, les composites carbone sont sensibles aux impacts de la foudre. Le CEA-List et l'ONERA développent des méthodes d'imagerie X innovantes pour modéliser, analyser et caractériser ces dommages, assurant ainsi la fiabilité des aérostructures.

Les matériaux peu absorbants comme les composites renforcés en fibres de carbone (CFRP), légers et robustes, sont de plus en plus utilisés dans l'industrie aéronautique. Leur faible conductivité thermique et électrique les rend cependant plus vulnérables aux dommages causés par la foudre, tels que la délamination ou la rupture des fibres. Pour contrôler précisément ces éléments composites, le CEA-List développe en collaboration avec l'ONERA de nouvelles méthodes d'imagerie exploitant l'information de déphasage portée par les rayons, ou imagerie par rayons X en contraste de phase. Fournissant des données complémentaires à celles issues de l'absorption des rayons X classiquement utilisée, elle se révèle particulièrement adaptée aux contrôles des composites.

Des travaux récents, notamment ceux de la thèse de Laureen Guitard menée au CEA-List, proposent une méthode robuste de diagnostic quantitatif pour caractériser les CFRP endommagés par des impacts de foudre. Une plaquette CFRP (Figure 1), dimensionnée en laboratoire, est soumise à une décharge électrique transitoire générée par un courant représentatif des normes des tests de foudre. Après l'impact, une image de l'échantillon est obtenue grâce à une méthode d'interférométrie à décalage multilatéral (Figure 2), technique co-développée par l'ONERA et le CEA-List sur un banc d'imagerie par rayons X.

# 50%

C'est la part des matériaux composites dans le poids d'un avion actuel.

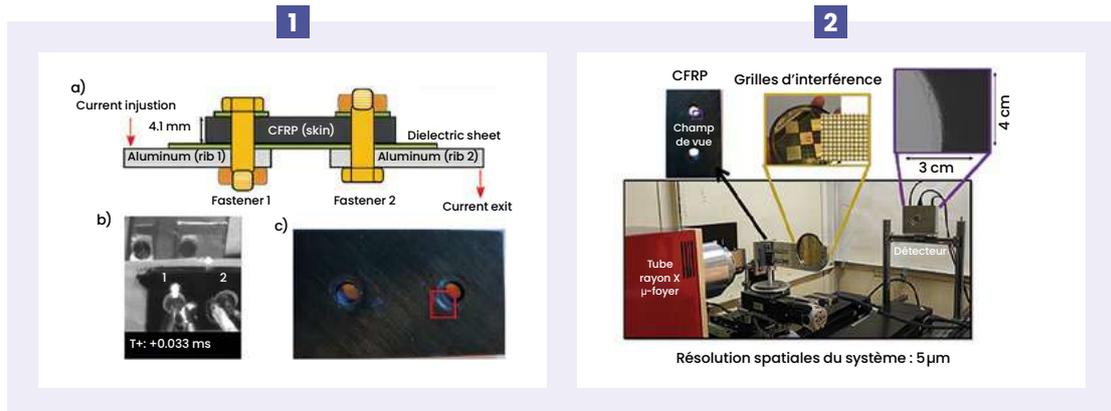


«Le CEA-List peut apporter une forte valeur à l'imagerie par rayons X en contraste de phase, qui progresse surtout en médecine, mais demeure sous-exploitée en CND.»

— DR. ADRIEN STOLIDI

«L'association des expertises du CEA-List et de l'ONERA permettent de développer des méthodes de CND à l'avant-garde avec des applications dans des domaines multiphysiques.»

— DR. AMÉLIE JARNAC

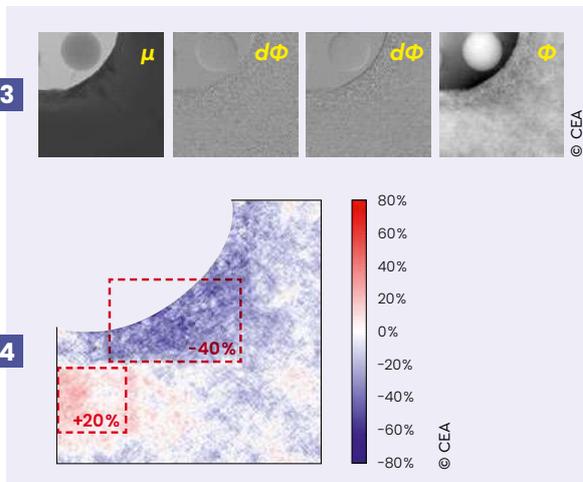


© CEA

La figure 3 présente les images d'absorption ( $\mu$ ), de gradients de phase ( $d\Phi$ ) et de phase ( $\Phi$ ) d'une zone du CFRP proche du point d'injection du courant. Les informations obtenues sont complémentaires : l'image d'absorption met en évidence des zones localement absorbantes, tandis que l'image de phase révèle une zone plus large et hétérogène (environ  $750 \mu\text{m}$ ) autour du trou. Les images des gradients de phase, selon les directions des nappes des fibres de carbone ( $\pm 45^\circ$ ), permettent de visualiser leurs orientations. Ces images sont globalement homogènes, sauf à proximité du trou, où l'écart type des valeurs de gris double, indiquant une désorientation des fibres.

Pour quantifier précisément les dommages, les valeurs de phase du CFRP sont liées à des variations relatives de masse volumique grâce à un objet étalon. La figure 4 présente une carte montrant les variations de masse volumique en pourcentage : les zones blanches indiquent une densité inchangée, les zones bleues une densité plus faible et les zones rouges une densité plus élevée. En convertissant les données de phase en variations de masse volumique, il est possible de localiser et de quantifier précisément l'étendue des dommages, tout en fournissant de nouvelles données pour les modèles numériques d'interaction foudre-matériaux développés à l'ONERA.

Ces travaux visent à développer une méthode innovante de contrôle non-destructif des composites carbone.



© CEA

© CEA

## Cas d'usage, application, transfert

*Aéronautique, composites*

### Projets

*Le travail se poursuit sur deux axes principaux : l'applicatif, avec une étude paramétrique des foudroiements sur composites carbone, et la méthodologie avec trois volets majeurs :*

- 1) la transition de l'imagerie 2D à la 3D grâce à une nouvelle thèse Onera/CEA-List ;*
- 2) le développement d'un modèle numérique d'imagerie en contraste de phase (Carnot OSIRIS) ;*
- 3) la conception de méthodes adaptées aux phénomènes transitoires rapides, comme le foudroiement (ANR DyXPLAY, PTC MOVIE).*

### Partenariats majeurs

*Collaboration ONERA/CEA-List : PREPEND-X (Plateforme de recherche en imagerie de phase dédié aux essais non-destructifs par rayons X)*

### Publication majeure

*"Robust quantitative X-ray phase diagnostic for carbon composite characterisation in the context of lightning induced risk"*

Laureen Guitard, Adrien Stoldi, Georges Giakoumakis, Rafael Sousa Martins, Jérôme Primot & Amélie Jarnac  
*Scientific Reports volume 14, Article number: 21803 (2024)*



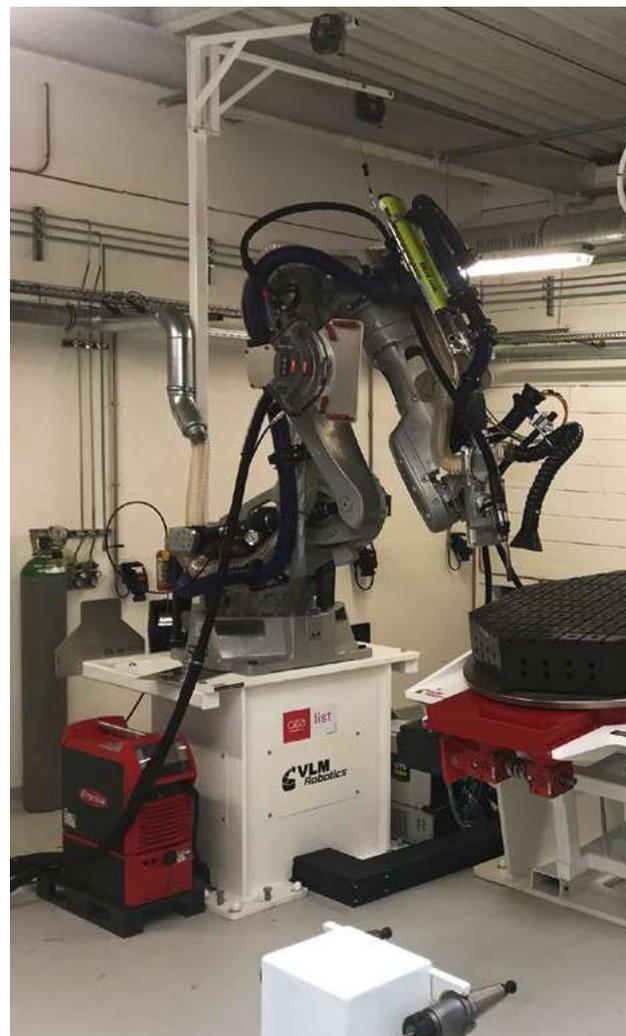
# Nos technologies en soutien à l'industrie

→ Accélérer la transformation numérique de l'industrie par le développement et le transfert de technologies vers les industriels, telle est notre mission. En s'appuyant sur nos plateformes d'innovation ouverte, nous favorisons de nouvelles modalités de collaboration interfilières et multipartenaires.



Convaincus que l'innovation technologique numérique est un moteur essentiel de la compétitivité, un atout pour la société et un catalyseur de la transition écologique, notre mission est d'accélérer la transformation numérique de l'industrie et de la société.

Nos ingénieurs-chercheurs de haut niveau mobilisent leur expertise pour tirer le meilleur parti de leurs avancées scientifiques et technologiques au service des enjeux de nos partenaires industriels, comme le souligne notre avancée majeure pour exploiter les mémoires spintroniques de TDK pour l'IA probabiliste. L'exploitation des résultats de nos recherches et innovations pour la conception de produits et services novateurs concrétise notre mission. Le déploiement industriel du drone Predire par SARP Veolia illustre parfaitement cette mission. Pour accélérer l'efficacité opérationnelle des produits et processus industriels,



nous mettons en place de nouvelles modalités de collaboration centrées sur l'innovation numérique et la mutualisation inter-filières.

Nous nous appuyons sur un atout unique : notre plateforme technologique PRISM d'innovation ouverte. Cette plateforme offre aux industriels une infrastructure facilement adaptable pour développer de nouveaux produits et solutions répondant aux besoins de

Cellule expérimentale PRISMA, une des capacités de PRISM, notre plateforme technologique d'innovation ouverte.

© CEA



la transformation industrielle. S'appuyant sur PRISM, le DEFI Lab regroupe les acteurs académiques et industriels du numérique. L'objectif est de réduire les coûts de R&D par la mutualisation des besoins et efforts afin, grâce à des solutions technologiques de rupture, de gagner en efficacité pour accélérer l'innovation, d'optimiser la qualité des produits, moyens de production et processus.

## 1

### Innovation pour l'industrie

- 54 **DGA et CEA-List, une collaboration fructueuse sur l'analyse de codes de sécurité**
- 56 **Nouvelles technologies de vision pour la robotique & le contrôle automatisé avec Siemens**
- 58 **Une avancée majeure vers l'exploitation des mémoires spintroniques de TDK pour l'IA probabiliste**
- 60 **Accélérer la détection de matières radioactives aux frontières**

## 2

### Transfert technologique

- 55 **ExpressIF® : une intelligence artificielle symbolique contribue au développement des artisans**
- 57 **Un jumeau numérique pour l'inspection robotisée avec SAFRAN**
- 59 **Fabrication d'aciers : une simulation ultrasonore haute performance pour une production optimisée**
- 61 **AIHERD intègre nos technologies d'IA pour analyser le comportement des bovins**
- 62 **Pour augmenter la performance du contrôle-commande EPR, Framatome intègre un outil d'optimisation dans sa chaîne de conception**
- 63 **Un robot autonome pour inspecter les canalisations de SARP Veolia**

avancées 2024



**ALLAN BLANCHARD**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
RESPONSABLE DE L'ÉQUIPE FRAMA-C  
© CEA



**SÉBASTIEN BARDIN**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
RESPONSABLE DE L'ÉQUIPE BINSEC  
© CEA

# DGA et CEA-List, une collaboration fructueuse sur l'analyse de codes de sécurité

→ La Direction générale de l'armement (DGA) emploie les outils du CEA-List pour analyser formellement le code des produits de sécurité qu'elle et ses fournisseurs utilisent. Conçus historiquement pour l'analyse de sûreté de fonctionnement, les logiciels du CEA-List sont adaptés aux nouveaux besoins de sécurité de la DGA, dans le cadre de l'accord-cadre signé fin 2022 entre les deux partenaires.

L'objectif de la collaboration est d'étendre les outils d'analyse formelle Frama-C (code source C) et BINSEC (code binaire) du CEA-List pour prendre en compte de nouvelles structures de code ou fonctionnalités spécifiques à la sécurité, selon les demandes de la DGA et de ses fournisseurs. Pour BINSEC, deux démonstrateurs ont été réalisés :

- un vérificateur d'effacement sécurisé des données confidentielles (mot de passe, clé de chiffrement...) après exécution d'un programme ;
- un décompilateur de binaire vers du code C, qui vérifie du code binaire embarqué dans un code C.

Pour Frama-C, les travaux ont porté sur l'outil de validation de la conformité d'un programme à sa spécification. Ils consistent en une modélisation mixte de la mémoire qui permet d'analyser finement les opérations bas-niveau sans que le temps d'analyse total ne soit rédhibitoire. Cette analyse du programme est effectuée sur deux modèles de fonctionnement du code : un modèle haut niveau des opérations usuelles et un modèle des opérations bas niveau complexes qui agissent directement sur la mémoire de travail du programme [1].

Deux études de faisabilité ont été réalisées sur Frama-C, pour la vérification de propriétés de flot d'information (pas

*«L'expertise du CEA-List en analyse formelle de logiciels répond au besoin de la DGA pour la validation de codes de produits de sécurité.»*

— ALLAN BLANCHARD ET SÉBASTIEN BARDIN



de fuite de données secrètes) et la détection de nouveaux comportements indéterminés sur les accès mémoire. Ces résultats concluants ont incité la DGA à lancer de nouveaux projets : l'implantation dans Frama-C des résultats ainsi qu'une extension de BINSEC sur la détection de failles de type canaux cachés dans les primitives de cryptographie post-quantique, c'est-à-dire les algorithmes de sécurité face à un attaquant opérant avec un ordinateur quantique.

[1] Jérémy Damour, Allan Blanchard, Loïc Correnson, Frédéric Loulergue.  
**Formalisation d'une analyse de région pour Frama-C/WP. 36es**  
Journées Francophones des Langages Applicatifs (JFLA 2025),  
Jan 2025, Roiffé, France. fflal-04859489



**LAURENCE BOUDET**  
PHD  
© CEA



**SOFIANE MADANI**  
COFONDATEUR DE BPARTNERS  
© BPartners

# ExpressIF® : une intelligence artificielle symbolique contribue au développement des artisans

→ La start-up BPartners enrichit son offre de services aux artisans avec une solution d'analyse des opportunités de développement. Grâce à l'intégration d'ExpressIF®, la plateforme d'IA symbolique du CEA, cette solution permet aux artisans de trier des dizaines d'opportunités pour cibler les prospects les plus pertinents.

Les artisans consacrent une grande partie de leur temps à des tâches chronophages (relance des clients, prospection, etc.) au détriment de leur cœur de métier. Pour répondre efficacement à leurs besoins spécifiques, BPartners a mené plus de 300 entretiens avec des artisans de divers secteurs (dépanneurs, couvreurs-zingueurs, etc.). L'entreprise a ainsi pu appréhender les raisonnements métiers propres à chaque secteur, se traduisant par un ensemble de règles complexes.

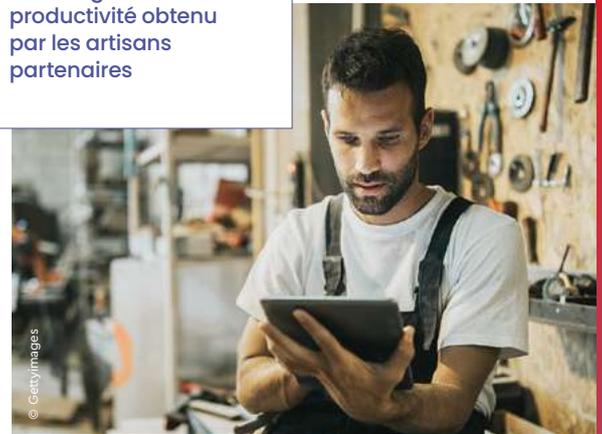
Les spécialistes en IA symbolique du CEA-List ont rapidement modélisé ces entretiens, réalisés en langage naturel, les transformant en règles intégrées à sa plateforme ExpressIF®. Celle-ci simule le raisonnement humain pour livrer des décisions explicables à partir de données hétérogènes, notamment spatio-temporelles. La collaboration a porté ses fruits : le raisonnement métier des artisans est désormais automatisé.

BPartners commercialise aujourd'hui une chaîne de traitement complète, commençant par la collecte d'informations sur le web ou dans des bases de données, passant par le criblage automatique de prospects potentiels grâce à ExpressIF®, et s'achevant par la visualisation des résultats sur une interface graphique, conviviale et intuitive.

L'utilisation d'une approche fondée sur les connaissances a permis de surmonter la problématique du démarrage à froid (sans données). De nombreuses perspectives s'ouvrent désormais, que ce soit pour affiner les règles métier avec de nouveaux critères, les optimiser à partir des données acquises, ou encore justifier les recommandations effectuées.

**20 %**

C'est le gain de productivité obtenu par les artisans partenaires



« Cette collaboration est la première application de notre technologie en criblage pour une start-up, marquant notre volonté de transfert technologique vers tous les acteurs économiques. »

— LAURENCE BOUDET

« Avec ExpressIF®, nous avons encapsulé le raisonnement des artisans dans une IA, leur permettant de déléguer l'analyse client et de se concentrer sur leurs chantiers. »

— SOFIANE MADANI



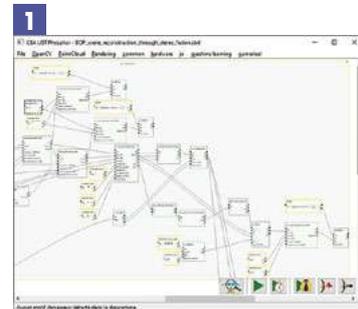
**FABRICE MAYRAN DE CHAMISSO**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
EN VISION & IA  
© CEA



**BORIS MEDEN**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
EN VISION & IA  
© CEA

# Nouvelles technologies de vision pour la robotique & le contrôle automatisé avec Siemens

→ Renforcer les capacités de perception des robots est un enjeu clé pour le contrôle industriel. Les travaux menés par le CEA-List en collaboration avec Siemens visent à optimiser les étapes de manipulation robotique de pièces industrielles et leur contrôle visuel, en intégrant plusieurs technologies avancées de vision par ordinateur, pour réaliser des tâches complexes d'inspection en temps réel.



**2020-2027**  
un partenariat de confiance avec Siemens

**5**  
facteur de gain en frugalité des données d'apprentissage

Notre partenariat avec Siemens sur la vision pour la robotique a pour objectif d'améliorer la compréhension de l'environnement et les actions d'un robot. Les recherches adressent un large spectre de cas d'usage industriels (robotique manufacturière et agricole, tri des déchets, démantèlement d'installations...) qui requièrent adaptabilité, précision et temps de cycles maîtrisés.

Le couplage fin de la manipulation d'une pièce et de son contrôle visuel par l'IA est particulièrement intéressant pour optimiser la préhension et la présentation de l'objet devant une caméra, et ainsi repérer les défauts éventuels avec la plus grande fiabilité.

Trois technologies ont été développées :

- L'approche brevetée HC6D de localisation zero-shot (sans exemple d'apprentissage) d'objets dans l'espace 3D ;
- Le calcul des configurations de saisie dynamique des objets, quelle que soit leur position initiale ;
- La détection d'anomalies avec une approche *one class*, pour détecter des défauts de nature inconnue en apprenant à modéliser la normalité. Cette approche est très frugale par rapport aux approches classiques (<200 images au lieu de >1000+ images).

L'intégration des technologies a été réalisée grâce au logiciel Phosphor du CEA-List, et a été testée avec succès sur

plusieurs scénarios d'inspection d'objets. Les prochaines étapes de la collaboration porteront sur l'extension des technologies à la manipulation fine d'objets déformables avec des préhenseurs pluri-digitaux, et la généralisation à d'autres contextes applicatifs.

**1** Le logiciel Phosphor développé par le CEA-List.  
© CEA

**2** À gauche : détection d'anomalies « *one class* » par vision. Sur une brosse à dents, il est possible de détecter les poils déformés ou manquants. À droite : la tâche du robot est de saisir les brosses à dents précédemment localisées, de les présenter à la caméra pour inspection puis de les trier dans deux bacs « conforme », « non conforme ».  
© CEA



« Concevoir des systèmes robotiques intelligents force à imaginer de nouvelles solutions technologiques de perception. »

— FABRICE MAYRAN DE CHAMISSO  
ET BORIS MEDEN



**ADRIEN GIRARD**  
INGÉNIEUR-  
CHERCHEUR  
© CEA



**VINCENT GOUDIER**  
PILOTE DIGITALISATION DES INSPECTIONS  
SAFRAN AIRCRAFT ENGINE  
© CEA

# Un jumeau numérique pour l'inspection robotisée avec SAFRAN

→ Installée dans les locaux du CEA-List, la cellule **SPRING** est dédiée au contrôle non destructif (CND) robotisé par thermographie infrarouge.

Pour répondre aux besoins d'optimisation de Safran, nous avons réalisé un jumeau numérique de la cellule. Celui-ci permet de calculer automatiquement toutes les « poses » de contrôle et les trajectoires robots via un algorithme breveté, à partir des données CAO (conception assistée par ordinateur) de la pièce à contrôler.

La thermographie infrarouge active est une méthode de CND numérique surfacique qui peut être utilisée en alternative

aux méthodes traditionnelles par voie chimique (ressuage ou magnétoscopie). L'un des avantages de ce procédé est sa capacité à être entièrement robotisé. Aujourd'hui, chez Safran, la programmation de cellules d'inspection robotisée est effectuée manuellement : toutes les « poses » de contrôle des robots sont programmées par un roboticien dans la cellule réelle, ce qui constitue une

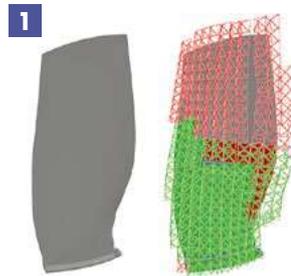
## 1 brevet

conjoint CEA-Safran issu de ce projet  
Automatisation de la tâche de programmation des robots

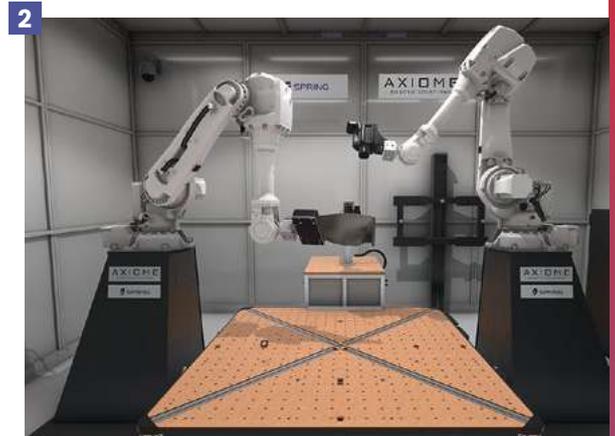
tâche longue et fastidieuse, notamment parce que les pièces à inspecter sont très complexes (surfaces gauches par exemple). Par ailleurs, toute erreur éventuelle de programmation peut avoir un impact négatif important, pouvant aller jusqu'à une dégradation matérielle de la pièce à inspecter. L'enjeu industriel est donc de supprimer cette phase manuelle en utilisant un Jumeau Numérique fonctionnel et physique de la cellule d'inspection robotisée, pour une programmation plus rapide et plus sûre de la séquence d'inspection. Ce jumeau numérique, nommé ADRA, intègre une représentation 3D de la cellule, le moteur physique temps réel XDE Physics (CEA-List), et un modèle fonctionnel intégrant des émulateurs de contrôleurs de robots (ABB), un émulateur de l'automate (Siemens) et un superviseur Mastermind, protocole standard de communication développé par Safran. Grâce à ADRA, le temps de programmation des robots de la cellule est réduit de manière importante. ADRA permet également de diminuer le temps d'immobilisation de la cellule réelle et de réduire les risques d'endommager la pièce ou la caméra.



En savoir plus sur XDE Physics



**1** À gauche : Visualisation d'une aube de réacteur avant inspection. À droite : Visualisation de l'aube après inspection avec ADRA.  
© Axione, Safran et CEA



**2** Jumeau numérique de la cellule SPRING en cours de simulation de trajectoires robots.  
© Axione, Safran et CEA

« Les fonctionnalités développées dans le cadre du jumeau numérique ADRA seront indispensables pour accompagner la digitalisation et l'automatisation des inspections chez Safran Aircraft Engines. »

— VINCENT GOUDIER



**THOMAS DALGATY**  
EXPERT  
© CEA

# Une avancée majeure vers l'exploitation des mémoires spintroniques de TDK pour l'IA probabiliste

Une approche en rupture des modèles de calcul en IA

Gain de consommation énergétique d'un facteur 1000

→ En partenariat avec TDK, le CEA explore de nouveaux paradigmes de calcul probabiliste matériel exploitant la physique stochastique intrinsèque des « spin-memristors » de TDK. Une technologie clé de mémoire, qui permet aux futurs systèmes d'IA d'apprendre et de s'adapter plus efficacement, avec une consommation d'énergie divisée par cent au regard des composants précédents.

L'objectif de TDK était d'étendre sa technologie de memristors à base de spin magnétique aux applications d'intelligence artificielle, notamment à l'apprentissage en périphérie (edge). Le bruit intrinsèque des memristors rend leur programmation précise difficile. Les techniques d'apprentissage automatique standard conduisent ainsi à un apprentissage sous-optimal, même avec des stratégies coûteuses de réduction de la variabilité.

Au lieu d'essayer d'éliminer le bruit, les ingénieurs-chercheurs du CEA ont choisi d'exploiter la nature intrinsèquement bruyante des memristors. Depuis 2020, le CEA est pionnier dans le calcul en mémoire bayésien (IMC), utilisant le comportement aléatoire des memristors pour implémenter des algorithmes probabilistes efficaces. Nous avons ainsi développé une stratégie de programmation associant une méthode probabiliste avancée à la physique des dispositifs mémoire de TDK.

Les gains de puissance et de latence obtenus atteignent deux à trois ordres de grandeur par rapport aux matériels numériques actuels. Cette approche permet également d'augmenter la taille des modèles de cinq ordres

de grandeur, avec une frugalité énergétique remarquable. Notre approche en rupture nous a permis de transformer une limitation en une force puissante, révolutionnant la façon de penser l'informatique pour l'IA de demain. La collaboration CEA-TDK a été reconnue internationalement, avec un prix du meilleur article à la conférence NeurIPS, et a conduit au dépôt de deux brevets.



*«L'IMC bayésien est un domaine en pleine émergence. Ce partenariat de recherche ouvre de nouvelles perspectives pour développer des solutions plus durables, plus fiables et plus efficaces qui répondront aux exigences croissantes des applications modernes de l'intelligence artificielle.»*

— THOMAS DALGATY

*«Cette proposition du CEA élargit les possibilités du spin-memristor, et est une solution pour notre objectif commun de développer des matériels IA à très faible consommation d'énergie pour l'avenir.»*

— THE TDK CORPORATION



**VINCENT DORVAL**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
ET EXPERT

© CEA



**GUILLAUME COUSIN & PHILIP MEILLAND**  
INGÉNIEURS DE RECHERCHE ARCELORMITTAL

# Fabrication d'aciers : une simulation ultrasonore haute performance pour une production optimisée

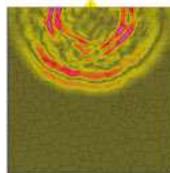
→ **Le comportement des ondes ultrasonores dans les microstructures des métaux est un phénomène clé pour de nombreuses applications industrielles. Comprendre l'influence de la structure interne complexe de certains métaux demeure néanmoins un défi scientifique.**

Le CEA-List a développé l'outil Microstruct, qui permet leur simulation et leur analyse. ArcelorMittal l'a adopté pour mettre au point des méthodes de contrôle de la production d'acier.

Microstruct associe des descriptions de microstructures, des calculs par éléments finis, ainsi que des analyses automatisées des champs ultrasonores, et les rend accessibles via une interface intégrée à la plateforme logicielle CIVA. Il permet à ses utilisateurs de bénéficier de méthodes développées pour la recherche en élastodynamique et de les appliquer directement à leurs besoins spécifiques.

Pour ArcelorMittal, l'objectif est de suivre l'évolution des propriétés d'aciers à hautes performances au cours de leur fabrication à l'aide de mesures par ultrasons laser. Un contrôle plus précis de ces procédés présente des avantages à la fois économiques et écologiques, car il permet d'en réduire le coût énergétique ainsi que d'incorporer davantage de matière première recyclée.

ArcelorMittal a fait partie des premiers utilisateurs de Microstruct, et continue à accompagner son développement dans le cadre du projet européen ANNEAL-LUS. Associé à d'autres modules déjà disponibles dans CIVA, Microstruct permet par ailleurs des approches de simulations multiéchelles qui peuvent être appliquées aux contrôles ultrasonores de différents matériaux hétérogènes. Des travaux sont en cours au CEA-List avec d'autres partenaires pour des applications de contrôle des soudures, des pièces issues de fabrication additive, ainsi que des bétons.



Simulation Microstruct du champ ultrasonore émis par laser dans un échantillon d'acier.  
© CEA

*« Cet outil de simulation ouvre de nouvelles perspectives à la fois pour la recherche amont en modélisation et pour des applications à des matériaux spécifiques correspondant à des problématiques industrielles très concrètes. »*

— VINCENT DORVAL

*« Microstruct est le maillon clé de la chaîne de modélisation qui permet d'interpréter des caractéristiques de propagation d'ondes ultrasonores dans les aciers pour en évaluer des propriétés microstructurales. »*

— GUILLAUME COUSIN & PHILIP MEILLAND



Fours de réchauffage du laminoir à bandes à chaud, Gand, Belgique.

© ArcelorMittal



**GWENOLÉ CORRE**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

# Accélérer la détection de matières radioactives aux frontières

→ Pour le contrôle aux frontières de matière radioactive dans les véhicules, les douaniers européens sont confrontés à deux problématiques : l'augmentation du nombre de véhicules à contrôler et la gestion des fausses alarmes. Le CEA-List a proposé des approches d'inspection permettant d'augmenter la vitesse de contrôle des véhicules et les a intégrées aux portiques de détection de Bertin Technologies.

En plus des menaces « traditionnelles » comme le trafic de drogue et d'armes, la contrebande de cigarettes et la fraude, les douaniers doivent gérer de nouveaux risques complexes. Ceux-ci incluent les produits contrefaits, les substances psychoactives, les technologies à double usage, ainsi que les matières nucléaires et radioactives.

Afin d'améliorer les performances de détection de matières radioactives (rayonnement gamma) et de réduire le nombre de fausses alarmes, les experts en instrumentation nucléaire du CEA-List ont collaboré avec Bertin Technologies, acteur majeur européen de la défense et de la sécurité. Le projet européen ENTRANCE leur a offert des conditions idéales d'essais, similaires à celles rencontrés lors des contrôles aux frontières, notamment dans des zones portuaires.

Les technologies développées au sein du CEA-List ont permis de tripler le flux de camions inspectés, tout en garantissant la qualité de détection des rayonnements ionisants et un taux de fausses alarmes inférieur à 1 pour 10 000. Ces résultats ont été obtenus grâce à la mise en œuvre de nouveaux algorithmes, qui permettent de corréler les informations de plusieurs détecteurs et de

mieux séparer les isotopes naturels des isotopes industriels. Les douaniers ont confirmé le bénéfice des technologies développées pour le contrôle des véhicules sans perturbation de l'activité. Ces solutions, une fois intégrées aux nouvelles générations de portiques, permettront de contrôler la totalité des véhicules en transit et d'équiper le réseau autoroutier au niveau des télépéages.

**Triplement**  
du nombre de  
camions inspectés

**Un taux de fausses  
alarmes réduit à  
moins de 1 pour  
10 000**

*« Une inspection efficace des risques nucléaires et radioactifs permet de contrôler les marchandises aux frontières sans perturber les activités. »*

— GWENOLÉ CORRE





**GUILLAUME LAPOUGE**  
INGÉNIEUR-  
CHERCHEUR  
© CEA



**BERTRAND LUVISON**  
INGÉNIEUR-  
CHERCHEUR  
© CEA



**QUENTIN GARNIER**  
PRÉSIDENT D'AIHERD

# AiHerd intègre nos technologies d'IA pour analyser le comportement des bovins

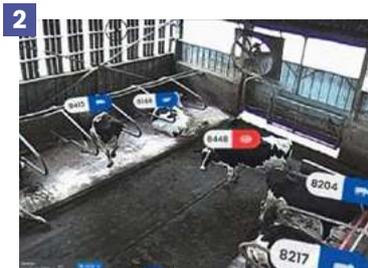
**80%**  
Taux de détection  
de chaleurs

Déploiement de  
la solution dans  
**plus de 20 fermes**

→ Afin d'aider les éleveurs à évaluer avec précision l'état de santé de leur cheptel, la société AiHerd propose une solution de monitoring performante fondée sur l'IA. La technologie issue des recherches du CEA-List est capable, en temps réel, de suivre et réidentifier chaque individu, et d'analyser son comportement.

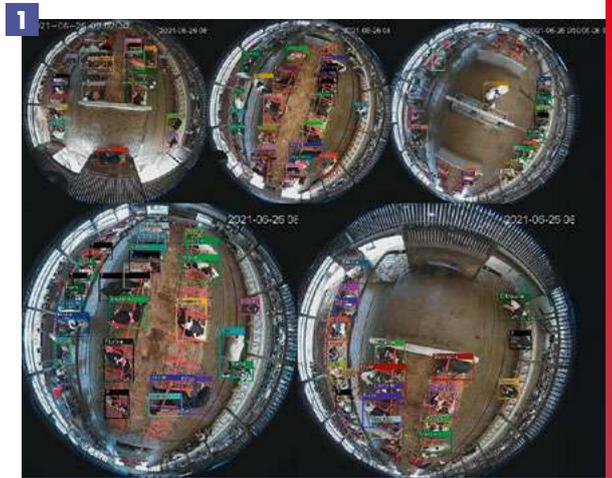
La solution développée par AiHerd vise à aider l'éleveur à identifier les raisons du comportement de ses bêtes et à le prévenir très rapidement de comportements inhabituels (par exemple : chaleurs ou pathologie) de l'une de ses bêtes. Les algorithmes d'IA et de vision du CEA-List calculent une signature comportementale individualisée des animaux, avec une grande robustesse sur de longues périodes de temps.

L'une des innovations majeures issues de ces travaux est l'apprentissage des modèles d'IA sans annotation humaine, ce qui a permis d'exploiter en très peu de temps le volume colossal de données acquises par AiHerd [1]. Grâce à ce procédé, la solution est d'ores et déjà capable de détecter les chaleurs des animaux avec une précision de plus de 80 %, performance bien supérieure à celles des technologies concurrentes basées sur le port de bracelet.



**1** Suivi de vaches 24/7 depuis un réseau de caméras dans un environnement indoor.  
© CEA

**2** Exemple d'interface du produit AIHERD.  
source : www.aiherd.io  
© AIHERD



«Ce projet illustre la capacité du CEA à transformer des résultats de recherche en une solution technologique répondant aux besoins applicatifs les plus exigeants.»

— GUILLAUME LAPOUGE & BERTRAND LUVISON

«Notre devise, c'est : apporter du bien-être à l'élevage, rapporter à l'éleveur.»

— QUENTIN GARNIER

[1] Cumulative unsupervised multi-domain adaptation for Holstein cattle re-identification. Fabian Dubourvieux, Guillaume Lapouge, Angélique Loesch, Bertrand Luvison, Romaric Audigier. Artificial intelligence in Agriculture, December 1st, 2023.



**XAVIER ZEITOUN**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

## Pour augmenter la performance du contrôle-commande EPR, Framatome intègre un outil d'optimisation dans sa chaîne de conception

→ Framatome propose une solution de contrôle-commande de secours analogique pour ses centrales nucléaires EPR. Cependant, l'allocation des fonctions logicielles de contrôle sur le matériel est complexe.

Le CEA-List a développé l'outil HALlo pour assister les ingénieurs dans cette tâche. Basé sur notre expertise en modélisation et recherche opérationnelle, l'outil calcule, à partir d'une description des fonctions et des circuits-cibles, l'allocation des composants sur les cartes. Après la validation et le transfert de la solution, Framatome a intégré HALlo à sa chaîne d'ingénierie pour les ERP et a défini avec le CEA-List les protocoles d'utilisation des outils par ses ingénieurs. Un processus de gestion des évolutions a également été mis en place. La solution fournit à Framatome une solution très flexible d'optimisation de ses systèmes de sécurité.

*«Le projet HALlo a permis d'appliquer notre expertise en modélisation de systèmes complexes et en recherche opérationnelle à un besoin concret de la filière nucléaire.»*

— XAVIER ZEITOUN



© Adobe Stock



**MEHDI BOUKALLEL**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA



**JÉRÔME TAUFOUR**  
DIRECTEUR TECHNIQUE ET DIGITALISATION  
OPÉRATIONNELLE CHEZ SARP VEOLIA

## Un robot autonome pour inspecter les canalisations de SARP Veolia

→ Fruit de 10 ans de collaboration entre SARP Veolia et le CEA-List, PREDIRE est une technologie disruptive en exploitation. Système autonome d'inspection des canalisations d'eaux usées, il permet des pré-évaluations rapides et fiables, facilitant ainsi des interventions ciblées et optimisées.

D'un coût réduit, PREDIRE permet des inspections fréquentes, en passant d'une maintenance curative à prédictive. Cinq unités sont en exploitation par Veolia France, et un déploiement est en cours au Japon et en Australie. L'exploitation a permis d'observer une réduction de moitié de CO<sub>2</sub> émis et de consommation d'eau pour le nettoyage des canalisations.

Predire concentre le meilleur de la technologie pour répondre aux enjeux de performance et de responsabilité environnementale : efficace en environnement complexe avec ses quatre vis motorisées, imagerie haute définition, acquisition automatisée, capteurs embarqués.

Robot autonome PREDIRE D150.  
© G. CHANGEON/CEA-List



**3**  
brevets déposés

**2700 km**  
inspectés

«PREDIRE génère des analyses approfondies de l'état des infrastructures, facilitant la mise en place de programmes de nettoyage optimisés et basés sur des données objectives.»

— MEHDI BOUKALLEL

# Accompagner les transitions majeures

→ Porteuses de forts enjeux économiques et sociétaux, nos activités de recherche apportent des réponses aux trois grandes transitions sociétales de notre siècle – numérique, climatique et démographique. Elles s’inscrivent dans une approche centrée sur l’humain, porteuse de responsabilité sociétale et environnementale.

## Au service des transitions

L’activité du CEA-List concourt à la performance de l’économie et à la découverte scientifique, tout en étant directement impliquée dans des enjeux sociétaux majeurs tels que la santé, l’intelligence artificielle, l’éco-responsabilité et l’énergie, qui sont au cœur de ses innovations.

En matière de santé, nos équipes utilisent le numérique pour répondre à différents défis : l’amélioration de la prévention et des diagnostics précoces, le soutien aux personnes avec un handicap, ainsi que l’optimisation de l’organisation des centres de soin.

Dans un autre registre, lutter contre la désinformation et la manipulation est une priorité pour nos chercheurs, confrontés aux défis posés par les intelligences artificielles génératives qui bousculent les modèles de production et de diffusion de l’information.

L’éco-innovation est également un levier stratégique pour nos innovations. Nos équipes proposent des solutions, tout en garantissant un cadre méthodologique, pour optimiser les ressources, réduire l’impact sur l’environnement de la production et garantir la traçabilité des produits via le passeport numérique. Enfin, l’innovation numérique joue un rôle clé dans l’énergie notamment nucléaire. Le CEA-List propose des solutions d’ingénierie système pour optimiser et sécuriser la performance opérationnelle des futures centrales nucléaires mais aussi des innovations technologiques pour le démantèlement et la gestion des déchets.

Ces exemples montrent que la recherche technologique, loin de se limiter à des besoins opérationnels des entreprises, est en prise directe avec la société, de l’innovation à l’économie.



# 1 Santé

- 66 Prendre en compte les facteurs humains dans le jumeau numérique fonctionnel de l'hôpital
- 67 Tomosynthèse mammaire : optimisation des doses et de la précision des dépistages
- 68 ABILITY, une révolution pour l'accessibilité numérique des non-voyants
- 69 Des capteurs ultrasonores embarqués pour le monitoring en santé

# 2 Vers une IA plus respectueuse

- 70 Analyse approfondie des actualités politiques dans la presse
- 71 Détection des textes générés par Intelligence Artificielle

# 3 Éco-responsabilité

- 72 EECONE : un projet européen d'envergure sur le développement soutenable de l'électronique
- 73 Comment qualifier l'éco-innovation dans un projet de recherche technologique ?
- 74 Le passeport produit numérique devient une réalité en Europe

# 4 Enjeux technologiques de la filière nucléaire

- 75 Atelier d'Ingénierie Système pour l'aide à la conduite des futures centrales nucléaires
- 76 Des innovations technologiques pour le démantèlement nucléaire
- 78 L'ingénierie des modèles pour la maintenance des réacteurs à fusion nucléaire
- 79 Diamant monocristallin : un détecteur pour le recyclage de combustible nucléaire

avancées 2024





**FLORIAN NOYRIT**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA



**VICTOR LAVAIRYE**  
DOCTORANT  
© CEA

# Prendre en compte les facteurs humains dans le jumeau numérique fonctionnel de l'hôpital

→ Les jumeaux numériques fonctionnels (JNF) permettent d'optimiser l'organisation au sein des systèmes complexes. Dans le domaine hospitalier, pour garantir la représentativité des modèles numériques et donc la pertinence des analyses et prédictions, les modèles doivent considérer la complexité et la richesse des comportements humains.

Un hôpital étant un système particulièrement complexe, le CEA-List a développé en collaboration avec l'hôpital Foch de Suresnes un premier JNF, centré sur un processus. Prenant en compte l'ensemble des étapes administratives et réglementaires associées, son objectif est d'évaluer l'impact des décisions prises par le chef de projet sur les indicateurs qualité des études cliniques.

Pour garantir la représentativité du JNF, les modèles de processus ont été enrichis avec des données stochastiques sur la durée des tâches et l'occurrence des événements, ainsi que des annotations sur les objectifs à atteindre par les agents humains. Notre plateforme Papyrus d'ingénierie système dirigée par les modèles a été adaptée pour simuler un ordonnancement humain piloté par l'atteinte des objectifs, à l'aide d'une heuristique de type *Monte Carlo Tree Search*. De plus, les modèles décrivent en logique floue certaines décisions, notamment pour l'ordonnancement des tâches, en s'appuyant sur notre technologie d'IA symbolique ExpressIF®.

Pour faciliter l'accessibilité du JNF, deux modules d'extraction de connaissances ont été développés. Le premier concerne l'extraction d'informations pertinentes dans des textes réglementaires qui utilise l'analyseur linguistique multilingue du CEA-List (LIMA). Il permet aussi d'explorer les bases de données légales telles que Légifrance et EurLex.



*«Les décisions humaines ne doivent pas être oubliées dans la modélisation et la simulation des systèmes.»*

— FLORIAN NOYRIT

Le second extrait les connaissances à partir de données de processus pour générer des logs d'exécution et un ensemble de contraintes en logique d'Allen.

L'approche proposée s'applique à tout domaine où il est pertinent d'établir une vue fonctionnelle, et où l'humain joue une place centrale dans la dynamique du système.



**JEAN-MARC BORDY**  
DIRECTEUR DE RECHERCHE  
© CEA



**ISABELLE FITTON & CLAIRE VAN NGOC TY**  
PHYSIENNES MÉDICALES HÔPITAL EUROPÉEN  
GEORGES POMPIDOU, AP-HP

# Tomosynthèse mammaire : optimisation des doses et de la précision des dépistages

→ **Méthode d'imagerie tridimensionnelle récente, la tomosynthèse mammaire est la dernière innovation technologique pour la mammographie de dépistage du cancer du sein. Intégrant de nouvelles sources de rayons X, elle nécessite l'établissement de références dosimétriques actualisées ainsi que de procédures de contrôle qualité des installations, afin de connaître précisément et optimiser les doses délivrées.**

**2,3**

millions de cas féminins de cancer recensés dans le monde en 2022.

**670 000**

décès enregistrés la même année.

Source : site de l'OMS

L'étude des nouvelles modalités de mammographie dans un cadre métrologique implique de parfaitement caractériser les faisceaux de rayons X cliniques utilisés. Nous avons ainsi reproduit dans nos installations (Laboratoire national Henri Becquerel, LNHB-MD) les caractéristiques des faisceaux mis en œuvre à l'Hôpital européen Georges Pompidou (AP-HP). En utilisant des procédures d'analyse et de correction des spectres bruts issus de la mesure, notamment les échappements dus à la fluorescence et les empilements imputables aux forts taux de comptage, les spectres cliniques ont été très précisément reproduits. Les faisceaux dont dispose désormais le LNHB-MD permettent d'étalonner les radiamètres utilisés en clinique pour vérifier, sur les installations de diagnostic, le niveau d'exposition des patientes lors des examens. Cet indicateur permet de trouver l'équilibre entre la qualité de l'image diagnostique et la dose de rayons X nécessaire à son obtention en fonction de l'anatomie mammaire.

Mammographe à l'Hôpital européen Georges Pompidou.

© CEA



*«La tomographie conduit à repenser la chaîne de traçabilité métrologique de la définition de la grandeur dosimétrique aux méthodes de mesure.»*

— JEAN-MARC BORDY

*«En améliorant notre connaissance des doses délivrées aux patientes, cette collaboration permet de sécuriser l'utilisation de la tomosynthèse mammaire dans le cadre du dépistage du cancer du sein.»*

— ISABELLE FITTON & CLAIRE VAN NGOC TY



**SABRINA PANÉELS**  
INGÉNIEURE-CHERCHEUSE  
COORDINATRICE DU PROJET ABILITY



**CHARLES HUDIN**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR

# ABILITY, une révolution pour l'accessibilité numérique des non-voyants

→ Dans un monde numérique où les interactions reposent principalement sur des retours visuels et auditifs, le handicap visuel génère de multiples défis d'accessibilité, notamment pour le contenu graphique. Pour rendre ces contenus numériques accessibles, nous avons développé au sein du projet européen ABILITY la première tablette multisensorielle, grâce aux technologies haptiques innovantes du CEA-List.

Ce résultat est obtenu en intégrant des retours localisés vibro-tactiles multipoints innovants dans une tablette standard, tout en associant des algorithmes d'intelligence artificielle pour l'analyse et la simplification d'images, l'extraction de texte ainsi que la saisie prédictive.

Ces retours vibro-tactiles sont effectués grâce à une matrice d'actionneurs piézoélectriques, sous forme de patch, collée directement sous l'écran grâce à des procédés industrialisables en salle blanche par l'équipe du CEA-Leti. Le premier démonstrateur tablette au format 10,5 pouces avec un écran OLED est prêt pour validation par les utilisateurs cibles.

Issus des travaux du CEA-List, les retours tactiles sont localisés et multipoints et permettent ainsi de créer des vibrations de confirmation, déjà communément utilisées, des sensations de clics de bouton en se couplant à la mesure de la force d'appui, jusqu'à des effets plus complexes et riches comme des textures.

Une personne non-voyante qui souhaiterait étudier un trajet peut afficher le plan sur la tablette et l'explorer avec ses deux mains (notamment pour utiliser un autre doigt comme référentiel). Elle ressent les différents éléments de la carte comme la route, les bâtiments, les espaces ouverts, etc., grâce à différentes textures assignées à chaque élément et déclenchées au contact, avec un effet attractif vers la cible. En utilisant les autres retours visuels et auditifs, cette tablette multisensorielle a pour vocation de s'adapter aux différents besoins et formes de déficience visuelle des utilisateurs.

À gauche : prototype de l'écran 10,5 pouces.  
À droite : image des zones de couleurs et leurs effets haptiques associés.

© CEA



## 1 brevet 3 publications

+ 1 brevet et 2 publications en amont du projet

**Collaboration en cours sur des sujets connexes :**  
*Continental Automotive Technologies* (tablette tactile pour le cockpit d'une voiture)

L'utilisateur localise les points d'intérêt d'une carte en l'explorant avec les doigts.

© CEA



**SYLVAIN CHATILLON**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA



**JEAN-LUC GENNISSON**  
DIRECTEUR DE RECHERCHE BIOMAPS  
© Jean-Luc Gennisson

## Des capteurs ultrasonores embarqués pour le monitoring en santé

→ En permettant à chacun de suivre sa forme et sa santé cardiovasculaire au quotidien, les montres connectées gagnent en popularité. Cependant, elles manquent de fiabilité et de robustesse pour la mesure de la pression artérielle. Le CEA-List a développé, en collaboration avec le CEA-Leti et BioMaps, une technologie ultrasonore qui devrait permettre d'augmenter la confiance dans ces outils.

La mesure fiable et robuste en continu de la pression artérielle nécessite de détecter les changements de volume du sang dans les artères liés à sa propulsion par le cœur. C'est pour répondre à ce besoin que nous avons développé une méthode de mesure ultrasonore de la variation du diamètre artériel. Associée à une mesure optique de la vitesse de l'onde de pouls, elle permet de déterminer la pression artérielle dans un système porté développé par le CEA-Leti. Le dimensionnement optimal de la sonde ultrasonore a été réalisé via les outils de simulation de notre plateforme logicielle CIVA Healthcare, afin d'atteindre le niveau de performances requis pour un système porté au poignet.

Nous avons également conçu des algorithmes permettant de reconstruire l'image de l'artère. Ils ont été optimisés pour une détection et une localisation précise et dynamique des « pics » d'échos provenant des parois proximale et distale, situées de part et d'autre de l'artère du bras. En évaluant l'écart de temps entre ces échos, nous avons pu mesurer en continu son diamètre et ses variations.

### 4 brevets

déposés sur cette technologie par ultrasons

Des acquisitions ont été réalisées par le laboratoire d'Imagerie biomédicale multimodale Paris-Saclay (BioMaps) à l'aide d'échographes et de sondes d'imagerie médicale dans un premier temps *in vitro*, sur des modèles d'artères en silicone de plusieurs diamètres, puis sur l'homme. Ces premières validations *in vivo* ont montré la capacité de ce système à réaliser des mesures dynamiques du diamètre artériel avec la fiabilité et la robustesse nécessaires pour un dispositif médical porté de mesure de la pression artérielle.



© debotdean sur Freepik

« Les excellents résultats obtenus sont très prometteurs et cette synergie a mis en évidence la complémentarité des compétences des différentes équipes du CEA impliquées. »

— SYLVAIN CHATILLON

« Ces travaux ouvrent la porte au développement de capteurs ultrasonores embarqués pour le monitoring en santé et le suivi du bien-être. »

— JEAN-LUC GENNISSON



**EVAN DUFRAISSE**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

# Analyse approfondie des actualités politiques dans la presse

→ Les actualités massivement publiées sur les réseaux sociaux contribuent significativement à façonner les opinions politiques, alors même que les algorithmes utilisés favorisent la polarisation des contenus. Pour améliorer la diversité des contenus proposés et permettre une meilleure compréhension des enjeux politiques, le CEA-List propose un algorithme automatisant l'analyse des contenus de presse.

Dans le cadre des projets BOOM (ANR) et AI4Media (Horizon 2020), nous avons développé une solution innovante pour les médias classiques et sociaux. Notre outil combine des algorithmes de traitement de la langue (détection d'entités, analyse de thèmes, classification de sentiments ciblée

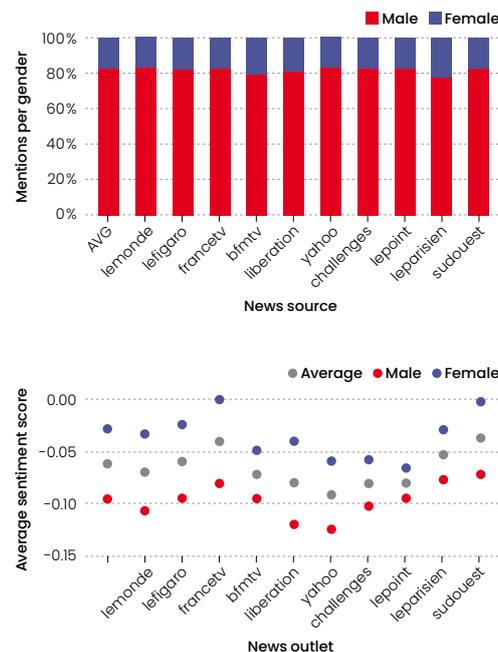
sur des politiciens) et des bases de connaissances politiques pour analyser de manière détaillée et flexible les contenus. Il permet de déterminer le positionnement éditorial des journaux, de comprendre le traitement de différents thèmes d'intérêt, de caractériser l'évolution temporelle des entités et de découvrir

**62%**  
des Français s'informent via les réseaux sociaux  
(Guénaëlle Gault, David Medioni, Enquête «Les Français et la fatigue informationnelle», L'ObSoCo, Fondation Jean-Jaurès, ARTE, juin 2022)

des biais démographiques. La méthode a été appliquée aux espaces médiatiques français et flamand (Belgique). Un résultat commun concerne le déséquilibre de genre dans les actualités politiques, avec une sous-représentation significative des femmes. Toutefois, le sentiment moyen leur étant associé est plus positif que celui de leurs homologues masculins.

Résultat de l'outil d'analyse du CEA-List : distribution des mentions et du sentiment par genre dans les principaux médias en ligne français.

© CEA



Nos travaux de recherche se focalisent désormais sur : (1) la quantification du biais de sélection, notamment pour mettre en avant les points de vue manquants pour un thème ou événement dans certains journaux, (2) la généralisation de la classification de sentiments à d'autres entités, (3) l'extension de l'analyse à des domaines socialement impactants et (4) l'intégration de la méthode dans des algorithmes de recommandation permettant de diversifier les actualités politiques.

«La caractérisation automatique des actualités est un outil utile pour naviguer dans la complexité des opinions exprimées dans la presse.»

— EVAN DUFRAISSE

«L'outil permet aux journalistes une analyse combinant des perspectives objectives et subjectives dans les articles de presse.»

— VRT (PARTENAIRE DU PROJET AI4MEDIA)



**SONDES SOUHI**  
INGÉNIEURE-CHERCHEUSE  
© CEA



**ROMARIC BESANÇON**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

# Détection des textes générés par intelligence Artificielle

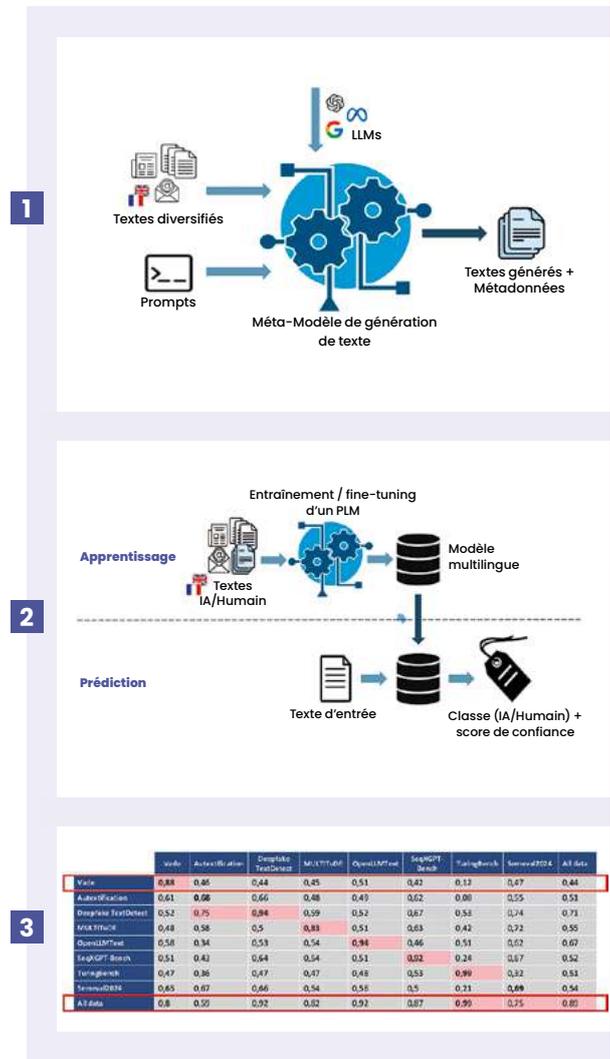
→ Les nouveaux modèles de langage de grande taille (LLM) peuvent aujourd’hui produire des textes personnalisés, semblables à ceux rédigés par des humains, conduisant à de nouvelles formes de cyberattaques. À la demande de l’entreprise Vade, éditeur de cybersécurité, le CEA-List a conçu une première ligne de défense *via* la détection des textes générés par l’intelligence artificielle.

Le principe est de faire collaborer un système de génération de textes à partir de données cible avec un système de détection de textes générés par intelligence artificielle. Le système de génération de textes (figure 1) contient un méta-modèle de génération sur lequel des modèles à l’état de l’art peuvent se greffer. Il prend en entrée des textes sources cibles en français et anglais, et génère des textes similaires (LLMs utilisés : Llama2 7b Chat, Flan-T5 XXL, Bloomz 7b1 Mt, Falcon-7B Instruct, GPT4All 13B snoozy et OpenAI GPT3.5).

Le système de détection (figure 2) détecte les textes générés par intelligence artificielle avec une approche « *black-box* » qui fonctionne sur des modèles open-source et propriétaires. Ce système se base sur un modèle multilingue « *fine-tuné* » qui classe le texte d’entrée et y associe un score de confiance. Pour cette tâche, les modèles Transformer bidirectionnels semblent plus efficaces que les modèles autorégressifs. En terme de score F1, mDeBERTa V3 devance presque toujours mBERT et XLM-RoBERTa.

L’objectif étant de généraliser le système à de nombreux autres datasets, des expérimentations ont été menées avec mDeBERTa V3. Les scores F1 sont présentés sur la figure 3. Ces résultats démontrent l’efficacité de l’approche « *black-box* » et soulignent l’importance de diversifier les jeux de données d’entraînement pour renforcer davantage la robustesse de la détection.

- 1 Processus de génération de texte.  
© CEA
- 2 Processus de détection des textes générés par IA.  
© CEA
- 3 Expérimentations avec croisement des datasets : évaluation de la généralisabilité du modèle mDeBERTa V3.  
© CEA





**CHIARA SANDIONIGI**  
INGÉNIEURE-CHERCHEUSE  
ET EXPERTE  
© CEA



**BÉNÉDICTE ROBIN**  
RESPONSABLE DE PROGRAMME  
ÉCO-INNOVATION  
© CEA

# EECONE : un projet européen d'envergure sur le développement soutenable de l'électronique

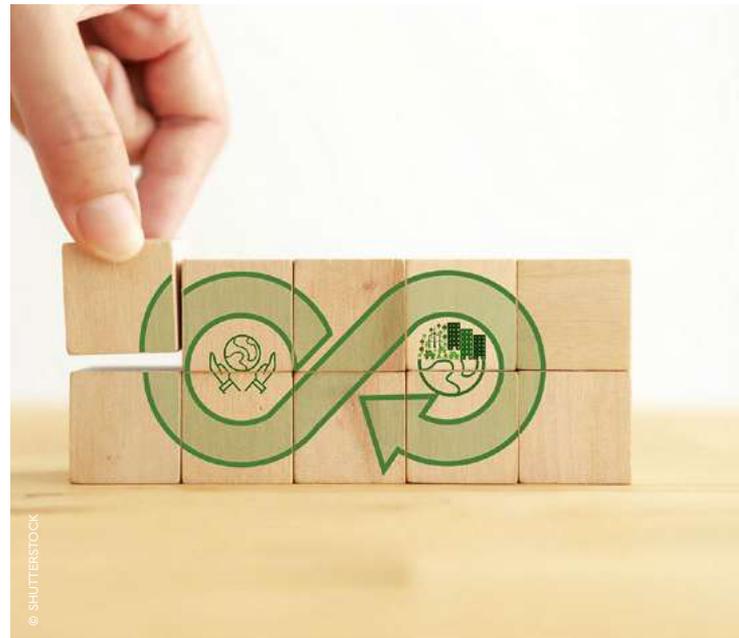
→ Les déchets électriques et électroniques sont l'une des catégories de déchets qui augmentent le plus vite dans l'UE, et seulement 40 % d'entre eux sont recyclés. Dans le cadre du projet européen EECONE, le CEA investit différentes stratégies pour réduire efficacement ces déchets : réduction des impacts environnementaux, fiabilité, réparabilité, reconditionnement, réutilisation ou recyclabilité.

Le projet EECONE vise à déployer un écosystème européen pour le développement de systèmes et composants électroniques à bas impact environnemental intégrant une réduction des déchets. Trois instituts du CEA (List, Leti, Liten) y contribuent, en particulier sur les métriques d'aide à la conception.

Parmi les stratégies de réduction des déchets électroniques, la performance environnementale des composants et systèmes électroniques et leur fiabilité en termes de garantie de durée de fonctionnement sont deux aspects complémentaires qui doivent être évalués conjointement. Pour quantifier cette contribution, le CEA a proposé deux nouvelles métriques. L'« éco-fiabilité » consiste en un rapport entre le temps de fonctionnement du système et une seconde métrique appelée « *System Earth equivalent Time (SET)* ». Le SET est définie comme le temps nécessaire pour régénérer ou récupérer les ressources consommées pour la production et l'utilisation du système ou composant électronique.

L'objectif principal de la métrique d'éco-fiabilité est la comparaison rapide de différentes conceptions d'un même système ou composant électronique. La métrique permet également de comparer différents produits électroniques pour un positionnement rapide de leur durabilité environnementale.[1]

[1] <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20201208STO93325/dechets-electroniques-dans-l-union-europeenne-faits-et-chiffres-infographie>



© SHUTTERSTOCK

## Publication

**«Eco-reliability: A new metric for the eco-design of electronic systems»**

C. Sandionigi  
IEEE SusTech 2024

## Vidéo d'introduction au projet EECONE





**CHIARA SANDIONIGI**  
INGÉNIEURE-CHERCHEUSE  
ET EXPERTE  
© CEA



**BÉNÉDICTE ROBIN**  
RESPONSABLE DE PROGRAMME  
ÉCO-INNOVATION  
© CEA

# Comment qualifier l'éco-innovation dans un projet de recherche technologique ?

→ Dans un contexte de prise de conscience des limites planétaires et une ambition de soutenabilité, l'éco-innovation devient un objectif pour les industriels et les académiques. Néanmoins, lorsqu'elle est évoquée dans le domaine technologique, divers concepts et termes aux définitions variées sont utilisés. Pour l'appliquer à ses projets, le CEA-List a mené une étude de clarification des termes et définitions associés et produit un cadre méthodologique.

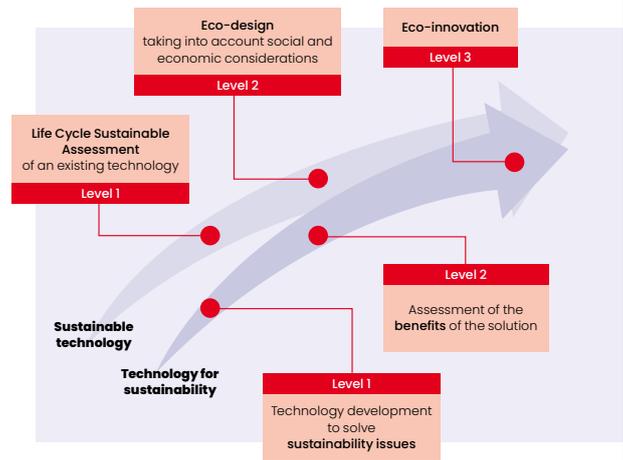
Malgré l'intérêt croissant de la société pour l'éco-innovation, son application au domaine technologique est freinée par la diversité des concepts et définitions. Nos ingénieurs-chercheurs ont mené une étude de clarification de la terminologie de l'éco-innovation après avoir analysé la littérature et les normes qui y sont associées. Les bénéfices visés par ce travail étaient multiples : définir un cadre pour positionner nos activités de recherche en développement soutenable, offrir des lignes directrices pour réaliser l'ambition d'éco-innover et contribuer à la cohérence des concepts connexes.

Le résultat principal de l'étude a été la définition d'un cadre méthodologique permettant de positionner et d'orienter les projets de recherche et les développements technologiques vers l'ambition finale d'une innovation soutenable. La méthode identifie deux axes et trois niveaux pour le positionnement des activités de recherche et développement. L'axe « Technologie soutenable » considère le développement soutenable orienté sur la technologie et la réduction de ses impacts directs. L'axe « Technologie pour la soutenabilité » met l'accent sur l'application et le cas d'usage, pour que la technologie soit au service de la soutenabilité. Les niveaux s'appuient quant à eux sur les normes, notamment ISO 14040 et ITU-T L.1480.

Cette vision partagée au sein du List a également été reconvenue hors du CEA, notamment par une publication acceptée à la conférence *Electronics Goes Green* (Berlin, juin 2024), qui rassemble les principaux acteurs du développement soutenable de l'électronique.

Les positionnements identifiés pour des activités de recherche et de développement technologique vers l'éco-innovation.

© CEA



## Publication

**«Sustainable technology and Technology for sustainability: The paths towards Eco-innovation»**

C. Sandionigi, J.-F. Berrée, M. Péralta, A. Piel, B. Robin  
*Electronics Goes Green 2024*



**CAROLYNN BERNIER**  
INGÉNIEURE-CHERCHEUSE  
ET EXPERTE

© CEA



**ILIAS IAKOVIDIS**  
DG CONNECT,  
EUROPEAN COMMISSION

# Le passeport produit numérique devient une réalité en Europe

→ **Mieux recycler, réparer et réduire l'impact environnemental des produits : l'Europe vient d'adopter le passeport produit numérique. Il facilitera l'accès à l'information des produits mis sur le marché européen, tout au long de leur cycle de vie. Le projet européen CIRPASS coordonné par le CEA-List a proposé une vision du système d'information associé qui contribuera à l'économie circulaire.**

Le projet s'est intéressé en priorité aux secteurs des batteries, de l'électronique et du textile, qui utilisent des ressources largement recyclables et ont un impact environnemental majeur. Le nouveau système d'information proposé pour l'étiquetage électronique des produits consiste en une base de données distribuées à l'échelle de la planète. De nombreux verrous techniques doivent être surmontés, dont le déploiement à large échelle, dans des secteurs souvent faiblement numérisés :

- Systèmes de partage des données interopérables ;
- Approches distribuées de gestion de l'identité et des autorisations d'accès aux données ;
- Outils permettant une finalité simultanément réglementaire et non-réglementaire du passeport.

Une spécification technique du système a été proposée, en collaboration avec le comité inter-DG de la Commission Européenne (GROW, CONNECT, ENV, DIGIT).

En tant qu'infrastructure numérique essentielle pour l'industrie européenne, le passeport ouvre de nouvelles possibilités dans les domaines de la gestion et de la modélisation des données, l'interopérabilité des espaces de données, les jumeaux numériques industriels, l'évaluation de l'impact environnemental de produits et services, et le développement de systèmes distribués de confiance.

Pour soutenir le déploiement des passeports dans quatre secteurs ciblés, le CEA-List pilote désormais le projet CIRPASS-2 (2024-2027), qui intègre une évaluation de l'impact environnemental du système dans sa globalité.



© Getty Images

*«Allier l'innovation technologique aux enjeux écologiques, voilà les ambitions de CIRPASS et de CIRPASS-2.»*

— CAROLYNN BERNIER

*«CIRPASS est l'un des projets les plus importants pour les objectifs de l'UE concernant la durabilité environnementale des produits, l'économie circulaire, la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement et le marché intérieur.»*

— ILIAS IAKOVIDIS

L'adoption du passeport produit numérique permettra des gains importants dans la quantité de matériaux recyclés de haute pureté :

**de 6%  
à 78%**

pour les plastiques

**de 13%  
à 84%**

pour l'aluminium

**de 24%  
à 81%**

pour l'acier

Source : [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ccd71fda-b1b5-11ec-9d96-01aa75ed71a1\\_0001\\_02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ccd71fda-b1b5-11ec-9d96-01aa75ed71a1_0001_02/DOC_1&format=PDF)



**JEAN-PIERRE GALLOIS**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA



**NICOLAS RAPIN**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
© CEA

# Atelier d'Ingénierie Système pour l'aide à la conduite des futures centrales nucléaires

→ **Le renforcement des règles d'exploitation post-Fukushima par les autorités de sûreté nucléaire a induit une surcharge de travail pour les opérateurs. Afin d'augmenter l'automatisation de la conduite de ses futures centrales nucléaires, EDF a fait appel au CEA-List. L'objectif de la collaboration est de réaliser un environnement d'ingénierie système pour la conception de ces nouveaux moyens de conduite.**

Au sein de l'Institut de recherche CEA-EDF-Framatome (I3P), ce projet vise à proposer un environnement intégré aux diverses équipes d'ingénierie (conduite, ergonomie...), et à l'exploitant. Il permettra de prototyper et évaluer des architectures de contrôle-commande au regard d'exigences variées : fonctionnelles, de sûreté... Il sera accompagné d'outils pour l'exploitation : monitoring temps réel vis-à-vis des règles d'exploitation, formation des opérateurs.

Le projet comprend quatre volets :

1. L'automatisation du monitoring d'exigences d'exploitation, basée sur notre outil ARTiMon, afin d'éviter des conduites non souhaitées ou non optimales ;
2. La transformation topologique de schémas mécaniques pour des usages métier dédiés à la conduite ; le modèle de données pivot est décrit dans notre outil Papyrus ;
3. Un langage de formalisation (algèbre de processus et logique floue) pour les consignes de conduite (actuellement en logigrammes ou en langage naturel), pour générer un opérateur virtuel et valider ces procédures ;
4. Un outil d'allocation de fonctions sur des systèmes de contrôle-commande.

L'environnement permettra de relier différents niveaux de modélisation et de mesurer l'impact d'une modification de conception sur les autres niveaux. Par ailleurs, son

*« Apport par le CEA-List de briques innovantes, au sein d'un atelier numérique destiné à nos concepteurs de futurs moyens de conduite pour nos centrales nucléaires. »*

— **LAURENCE PICCI,**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR, EDF R&D



interfaçage avec les outils existants de l'ingénierie nucléaire est à l'étude.

À la demande d'EDF, l'industrialisation d'ARTiMon est en cours. De plus, l'outil d'allocation de fonctions de contrôle-commande est en cours de déploiement interne chez EDF.



**MAUGAN MICHEL**

EXPERT

© IAEA

# Des innovations technologiques pour le démantèlement nucléaire

→ **Financement de trois thèses du programme FOCUSDEM, démonstration *in situ* de l'efficacité de ses technologies de mesures radiologiques dans le cadre du projet européen CLEANDEM : le CEA-List contribue aux progrès de l'instrumentation numérique pour les opérations d'assainissement/démantèlement, capitales pour la sûreté et l'acceptabilité de l'industrie nucléaire.**

Les résultats du programme FOCUSDEM et du projet CLEANDEM représentent un tournant important dans l'optimisation des opérations d'assainissement et de démantèlement (A&D), essentiels au cycle de vie des installations nucléaires, qu'elles soient anciennes ou en projet.

Les thèses du programme FOCUSDEM, soutenues par le CEA-List ont ainsi abordé trois défis majeurs dans la caractérisation radiologique des sites en démantèlement, cruciale pour garantir la sûreté des opérations. La thèse d'Andréa Macario Barros a porté sur un système modulaire de cartographie radiologique. Grâce à l'intégration de la technologie SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), ce dispositif offre une localisation automatique des capteurs, permettant ainsi une acquisition de données plus précise et une réduction significative des erreurs humaines. Cette avancée est essentielle pour cartographier les zones contaminées avec fiabilité, un enjeu majeur pour les équipes d'intervention.

La thèse de Dilan Tüzün, adossée aux travaux précurseurs du Laboratoire national Henri Becquerel (LNHB), a consisté à développer des sources moulables ou déformables, pour mieux correspondre à la diversité des surfaces et matériaux rencontrés sur le terrain, améliorant ainsi l'étalonnage des instruments.

Enfin, la thèse d'Aya Kanj a porté sur un spectro-imageur neutronique transportable, conçu pour identifier les sources de rayonnement neutronique, ce système complète les imageurs gamma et s'avère particulièrement utile en présence de blindages empêchant la détection gamma.



« Des innovations de rupture pour améliorer la détection, la cartographie et l'identification des sources radioactives dans les opérations d'A&D. »

— MAUGAN MICHEL

Parallèlement à ces recherches, le projet européen CLEANDEM dédié aux technologies de mesure pour l'A&D embarquées sur un robot autonome, s'est achevé sur une démonstration en conditions réelles des performances exceptionnelles de trois technologies issues du CEA-List :

- Nanopix3, spectro-imageur gamma, testé avec succès sur le site Eurex de SOGIN à Saluggia (Italie), a permis de localiser une source radioactive d'Am 241 en moins de 10 secondes, à une distance de deux mètres (débit de dose à la caméra d'environ 0.2  $\mu\text{Sv/h}$ ), montrant ainsi son efficacité dans la détection rapide de points chauds.
- Conçu pour mesurer la contamination surfacique sur des formes complexes, le contaminamètre pixelisé s'adapte aux géométries irrégulières des structures en démantèlement pour une évaluation plus précise et plus rapide de la contamination.



• Enfin, le couplage des technologies de *shape sensing* et OSL/FO combine la luminescence stimulée optiquement en fibre optique avec la reconstruction 3D de la forme de la fibre pour effectuer des mesures de dose précises, même dans les zones les plus inaccessibles. Ces avancées témoignent de l'engagement du CEA-List à faire face aux défis du démantèlement nucléaire, un domaine où la sûreté, la précision et l'innovation technologique sont plus que jamais indispensables. Elles permettent de réduire l'exposition des travailleurs, d'améliorer la précision des mesures et de simplifier la gestion des chantiers. Elles favorisent également une automatisation accrue, rendant les processus plus efficaces et moins risqués pour les intervenants.

«Le système est également en mesure de fournir un modèle numérique de la zone étudiée, enrichi des informations radiologiques fournies par les capteurs, ce qui permet de créer un jumeau numérique.»  
— SOGIN

- 1 3 Le robot CLEANDEM, lors de la mesure *in situ*, à l'usine Eurex de Saluggia avec Nanopix3, d'une source radioactive d'<sup>241</sup>Am contenue dans un fût métallique et image reconstruite par spectro-imagerie.  
© CEA
- 2 Système modulaire de cartographie monté sur NuCoMo-100.  
© CEA

**Thèses et publications**

 **La thèse d'Andréa Macario Barros**

 **La thèse de Dilan Tüzün**

 **La thèse d'Aya Kanj**

 **Les publications et données de CLEANDEM disponibles en open access**

 À lire aussi dans la revue *Robotics* : **A Comprehensive Survey of Visual SLAM Algorithms**  
A. Macario Barros, M. Michel, Y. Moline, G. Corre et F. Carrel

**Cas d'usage**

En apportant une information radiologique fiable, ces technologies, ouvrent également la voie à la gestion de crise, en accélérant la collecte d'informations, voire, dans le cas de drones et robot autonomes, de libérer les primo-intervenants pour qu'ils puissent se consacrer à leur mission première, pendant qu'une flotte autonome collecte ces informations et leur éviter de s'exposer aux dangers radiologiques.

**Projet majeur**

Ces travaux s'inscrivent dans une dynamique de R&D continue, avec notamment la participation du CEA au projet européen XS-ABILITY, qui vise à améliorer et à miniaturiser Nanopix3 et un système de mesure neutron/gamma pour une meilleure caractérisation des sites nucléaires en démantèlement, notamment en les embarquant sur des drones et sur des robots autonomes.



**PAULINE DEVILLE**  
INGÉNIEURE-CHERCHEUSE  
© CEA

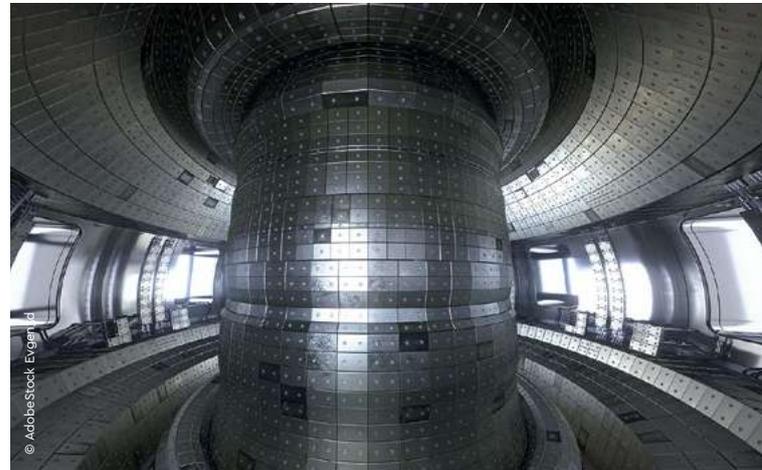
# L'ingénierie des modèles pour la maintenance des réacteurs à fusion nucléaire

→ Les installations expérimentales de fusion nucléaire intègrent de nombreux systèmes expérimentaux complexes. L'institut IRFM du CEA cherche ainsi à anticiper les exigences liées aux opérations de maintenance de l'installation ITER. Pour modéliser ces processus en environnements complexes, l'IRFM a fait appel à l'expertise du CEA-List en ingénierie dirigée par les modèles.

Les nombreuses données d'ingénierie générées par les opérations de remplacement des dispositifs expérimentaux et la prise en compte des multiples configurations des systèmes d'ITER requièrent une approche plus performante que celles basées sur la documentation. La plateforme open source Papyrus du CEA-List, combinant puissance et polyvalence, est bien adaptée à la modélisation fine de ces systèmes complexes.

Nos équipes ont proposé un nouveau langage, spécifique à la maintenance des systèmes de fusion nucléaire, pour permettre à l'IRFM de modéliser les phases de montage et démontage des dispositifs expérimentaux. Elles ont ainsi montré ses capacités à découper et visualiser un grand nombre de données, à deux échelles différentes :

- Des tableaux pour une vision globale, par exemple la séquence complète de remplacement ;
  - Des diagrammes pour une vision détaillée, montrant par exemple les actions des sous-parties de cette séquence.
- Une fois la modélisation réalisée, une simulation fonctionnelle des séquences de montage et de démontage peut être effectuée à l'aide de l'outil Moka de Papyrus, pour vérifier la cohérence du modèle et générer des traces de simulation. À terme, cette exploration pourra intégrer l'analyse de



*«L'ingénierie dirigée par les modèles numériques est essentielle pour le développement des futures centrales à Fusion, en particulier dans un contexte de collaboration internationale.»*

— JEAN-PIERRE FRICONNEAU, IRFM

risque, via notre logiciel Sophia, mais aussi la modélisation et la traçabilité des exigences. De plus, le couplage entre le modèle Papyrus et le modèle de réalité virtuelle du système dans son environnement permettra la continuité numérique entre les deux, pour améliorer la cohérence et la pertinence des analyses de scénarios.



**BAPTISTE TRUFFET**  
INGÉNIEUR-CHERCHEUR  
ET EXPERT  
© CEA

# Diamant monocristallin : un détecteur pour le recyclage de combustible nucléaire



→ **Choix stratégique de la France, le taux de recyclage du combustible nucléaire après quatre ans d'utilisation atteint aujourd'hui 96 %. Pour améliorer la mesure de la radioactivité alpha, cruciale pour séparer les matières réutilisables des déchets, le CEA-List a développé un détecteur en diamant monocristallin résistant aux conditions extrêmes de son utilisation.**

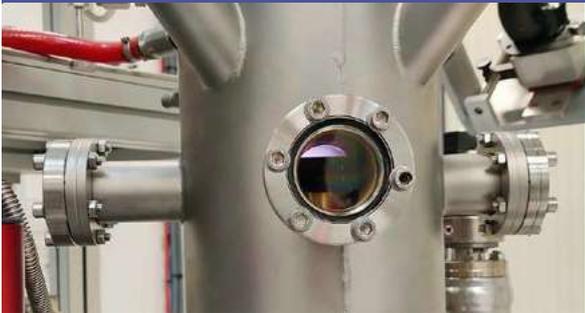
Le processus de recyclage du combustible nucléaire utilisé consiste en plusieurs étapes, de la dissolution de la matière dans de l'acide nitrique concentré jusqu'à la séparation des différents éléments. Ceux-ci présentant des niveaux de radioactivité alpha caractéristiques, leur mesure précise est essentielle au processus de séparation. Cette dernière phase fait l'objet d'une mesure *in situ* de la radioactivité alpha, via un capteur en diamant offrant des critères élevés de résistance aux conditions de pression, de température et d'acidité.

**x9**  
Efficacité de collecte de charges des détecteurs en diamant monocristallin comparée aux modèles précédents

La détection des particules alpha est réalisée par une couche active de diamant qui convertit l'énergie en signal électrique. Sa performance est directement liée à la pureté, l'homogénéité et l'absence de défauts du diamant. Un capteur optimal permet ainsi de combiner efficacité de détection, stabilité du signal, limitation du courant de fuite et fonctionnement jusqu'à 80°C sans perte de performance. De surcroît, la fixation du capteur assure l'étanchéité globale du système. En vue d'améliorer le processus industriel de séparation, nos équipes ont mené des recherches pour optimiser à la

*« Pour le recyclage de combustible nucléaire, un capteur de radioactivité alpha en diamant monocristallin offre une efficacité et une durabilité exceptionnelle. »*

— BAPTISTE TRUFFET



Réacteur MP-CVD pour la croissance diamant.  
© CEA

fois le capteur (en développant quatre types de diamant différents) et sa fixation sur le support (quatre méthodes ont été élaborées utilisant des joints, des résines et des brasures). Nos recherches ont abouti à un nouveau protocole de croissance du diamant monocristallin conjuguant critères de performance, simplicité, rapidité et coût maîtrisé. Un nouveau design de capteur a également été sélectionné, sur la base d'un joint polymère résistant et durable en termes d'approvisionnement. Le projet se focalise désormais sur la fabrication et la caractérisation d'un prototype complet en vue des tests en conditions réelles.

# Qualité de vie au travail

## Un engagement pour le CEA-List

→ Plusieurs actions ont été mises en place ces dernières années pour proposer à nos équipes un cadre de vie professionnelle à la fois accueillant, attractif et créatif. Création d'un espace de convivialité ouvert à tous, exposition permanente d'œuvres d'art, renforcement de la marque employeur, toutes ces initiatives ont un objectif central : améliorer le bien-être des collaborateurs au travail.

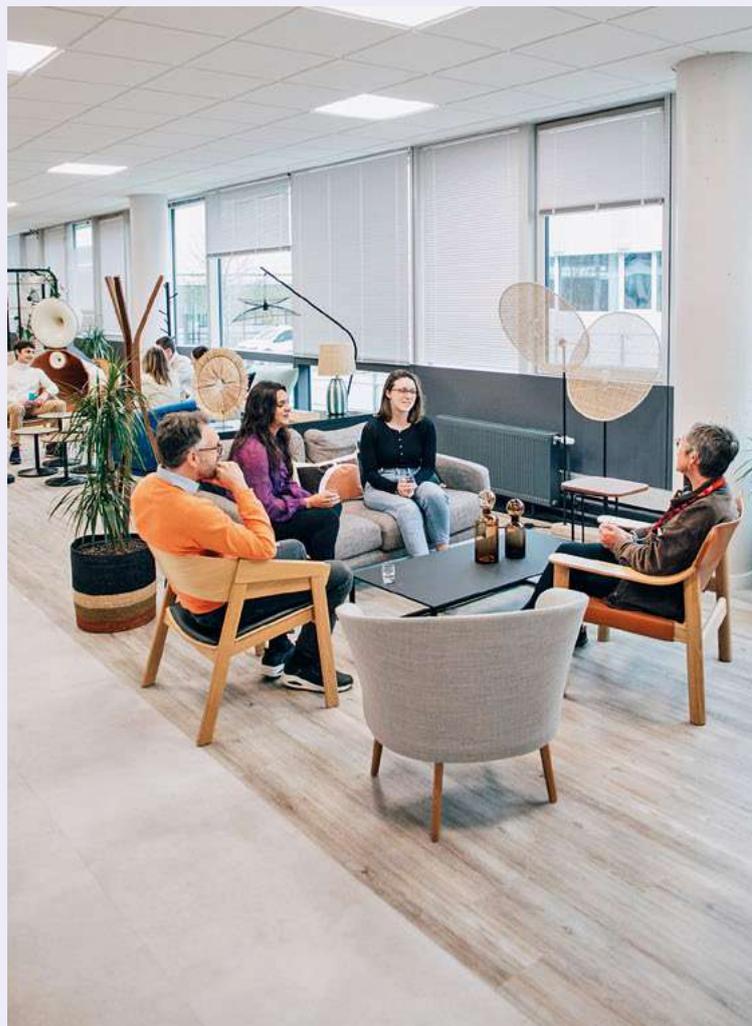
### L'Espace Campus : un lieu d'échanges et de détente au cœur de Nano-INNOV

Depuis deux ans, les équipes d'ingénieurs-chercheurs installées à Nano-INNOV bénéficient d'un nouveau lieu de convivialité, l'espace Campus. Encourageant les échanges informels, il participe à faire de notre cadre de travail un lieu propice à la créativité et la détente. Au cœur du site Nano-INNOV, il constitue un lieu de rencontre pour nos collaborateurs, les partenaires académiques et industriels qui y travaillent et les visiteurs.

Lieu de restauration, l'espace Campus dispose de moyens de restauration rapide, adaptés aux besoins des personnels, en complément de la restauration inter-entreprise. C'est également un lieu où chacun peut bénéficier d'espaces variés – table d'hôtes, boxes, salons – pour des moments de déconnexion et de jeux. Il accueille également des moments ludiques et des animations.

Largement utilisé par l'ensemble des personnels et visiteurs de Nano-INNOV, l'espace Campus est devenu un lieu incontournable mêlant harmonieusement travail et détente.

L'espace Campus à Nano-INNOV.  
© Welcometothejungle/CEA





Vernissage de l'exposition des œuvres de Claude Mercier à Nano-INNOV.  
© Philippe Ribeyrolles



## Donation exceptionnelle de 16 œuvres de l'artiste Claude Mercier

**En qualité de membre de l'Université Paris-Saclay, le CEA-List a bénéficié d'une donation exceptionnelle de 16 œuvres de l'artiste sculpteur et peintre français Claude Mercier (1924-2019), exposées sur les sites de Nano-INNOV et Digiteo.**

Cette donation, concédée par la veuve de l'artiste, Mme Colette Mercier, s'inscrit dans la politique d'acquisition d'œuvres d'art de l'Université Paris-Saclay, mise en place de longue date. Elle a déjà permis à d'autres instituts et organismes de recherche de l'Université, notamment le CEA, de bénéficier de donations. Outre le CEA-List, plusieurs institutions de l'Université, comme Neurospin et l'IUT de Cachan bénéficieront ainsi de l'importante collection Mercier.

### En savoir plus



L'artiste Claude Mercier est reconnu mondialement pour son approche novatrice et son exploration des formes et des matériaux, notamment métalliques. Il a marqué le paysage artistique mondial contemporain par ses créations uniques. Ses œuvres, qui allient sculptures et peintures, enrichissent ainsi l'environnement de travail de nos collaborateurs d'une dimension artistique nouvelle. Cette donation est une première étape, amenée à se poursuivre par l'accueil d'autres donations au fil du temps.



[list.cea.fr](http://list.cea.fr)

