



2023

Rapport d'activité **Scientifique**



Alexandre Bounouh
Directeur du CEA-List

« Nous avons lancé un nombre important de projets structurants qui reflètent notre positionnement thématique dans le numérique en lien avec les stratégies nationale et européenne. »

L'année écoulée n'a pas manqué de nous rappeler la persistance des crises, climatique, énergétique, géostratégique, mais aussi des bouleversements inattendus comme l'explosion des usages de l'IA qui questionne légitimement notre rapport à la science et la technologie. Ce qui est sûr, c'est qu'à l'heure de toutes les

transitions, la recherche et l'innovation sont, plus que jamais, essentielles et la technologie reste un enjeu de progrès, à condition évidemment d'inventer un nouveau modèle de croissance soutenable et respectueuse de notre environnement.

En 2023, les équipes du CEA-List ont continué à se mobiliser fortement pour développer des technologies numériques qui répondent aux grands défis socio-économiques actuels. Nos technologies pour l'industrie du futur, le jumeau numérique holistique, l'intelligence artificielle ou encore la confiance numérique, contribuent de façon importante à la compétitivité de l'industrie française et européenne, par l'innovation et le transfert technologique.

Nous avons lancé un nombre important de projets structurants qui reflètent notre positionnement thématique dans le numérique en lien avec les stratégies nationale et européenne, tout en s'inscrivant dans un socle programmatique solide qui nous assure un cap et une stratégie claire en soutien à l'innovation, pilier de la souveraineté et de la renaissance industrielle durable et inclusive en France et en Europe.

À cet effet, les équipes du List participent à une quarantaine de projets des programmes PEPR (Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche) de France 2030. Cela concerne aussi bien les PEPR purement numériques (quantique, cybersécurité, cloud, 5G, robotique, santé numérique ou IA) que d'autres PEPR tels que Agroécologie et Numérique ou encore les Technologies Avancées des Systèmes Énergétiques. Nos chercheurs sont également impliqués dans les Grands Défis des Straté-

gies d'Accélération, dont deux grands programmes sur le quantique : le Défi HQL, doté d'un budget de 72,3 M€ qui vise à réaliser le premier supercalculateur hybride au monde, et le Défi LSQ (*Large Scale Fault Tolerant Quantum Computing*) doté d'une subvention de 45 M€, qui ambitionne de développer le premier ordinateur quantique européen qui passe à l'échelle.

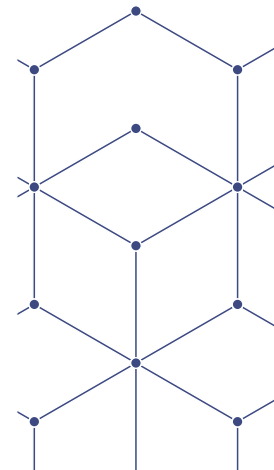
Par ailleurs, nos résultats à l'Europe sont exceptionnels. Sur la centaine de projets proposés chaque année, le taux de succès est toujours aussi élevé, de l'ordre de 30 %. Dans ce contexte, deux grandes initiatives coordonnées par le List ont été formellement lancées :

1/ le E-DIH (*European Digital Innovation Hub*) Paris-Saclay dont la vocation est d'accompagner les PME dans leur transformation numérique ;

2/ le projet AI-Matters de la TEF (*Test and Experimental Facilities*) IA for Manufacturing rassemblant sept nœuds européens dont le nœud français représenté par notre plateforme PRISM des technologies pour l'usine du futur.

La cohérence de la stratégie programmatique de l'institut à l'horizon 2030 avec les priorités stratégiques de la France et de l'Europe fera partie des éléments proposés en 2024 au Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres), où l'accent sera mis sur les résultats scientifiques et la gouvernance de notre recherche. L'évaluation de notre positionnement est particulièrement importante dans le contexte actuel de la recherche publique qui aborde une profonde transformation, via la création des Agences de Programme et la réforme des Pôles Universitaires récemment annoncées par le Président de la République.

C'est avec un grand plaisir et une immense fierté que je vous présente le rapport scientifique 2023 de l'institut. C'est un concentré remarquable des résultats de nos recherches qui traduisent l'excellence scientifique de nos équipes que je remercie chaleureusement.



0

3 ÉDITORIAL**5 LE LIST****6 VISION STRATÉGIQUE**

- 8 • Les plateformes d'innovation et nouvelles modalités de collaboration
- 10 • Le Nuclear Digital FactoryLab
- 11 • L'éco-innovation, une stratégie responsable
- 12 • Une stratégie européenne
- 13 • Écosystème académique
- 14 • Nos chiffres clés
- 15 • Prix et distinctions

16 PROGRAMMES DE RECHERCHE**18 L'organisation de recherche****Nos axes de recherche****20 INGÉNIERIE DES SYSTÈMES ET JUMEAUX NUMÉRIQUES**

- 22 • La programmation quantique
- 24 • Une plateforme logicielle pour la création de jumeaux numériques fonctionnels dans l'Industrie 4.0
- 26 • Un framework industriel pour le développement de contrôleurs robotiques temps réel
- 28 • La reconstruction 3D pour la téléimmersion en Live Stream à 360°

30 TECHNOLOGIES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

- 32 • Génération de scénarios de test pour la sécurité des véhicules autonomes
- 34 • Une plateforme de caractérisation de la robustesse et de la sûreté des IA
- 36 • Un environnement pour superviser la sûreté des systèmes autonomes
- 38 • Inspection visuelle des ouvrages d'art fondée sur l'Intelligence Artificielle
- 40 • Suivi des joueurs de football dans des vidéos
- 42 • ExpressiF® Materials, un assistant de laboratoire virtuel pour la science des matériaux
- 44 • NeuroCorgi, vers une nouvelle génération d'accélérateurs matériels pour l'IA

46 CALCUL ET SYSTÈMES DISTRIBUÉS

- 48 • Les méthodes formelles au service de la blockchain
- 50 • Continuum, de l'objet au cloud, pour une convergence IT/OT
- 52 • Chaîne de perception multi-capteurs embarquée
- 54 • Graph Convolutional Neural Networks (GCNN) pour capteurs événementiels en imagerie
- 56 • VXP, le processeur à précision étendue
- 58 • Le List au cœur de la révolution quantique

60 INSTRUMENTATION ET USINE DU FUTUR

- 62 • Robothon® 2023 : l'équipe du CEA monte sur le podium
- 64 • Robotique d'assistance aux opérateurs pour la manipulation précise de charges lourdes
- 66 • La plateforme logicielle CIVA
- 68 • Le potentiel de la réflectométrie électrique

Nos domaines applicatifs**70 CYBERSÉCURITÉ**

- 74 • Prise en compte des modèles d'attaquants actifs dans l'analyse de programmes pour la sécurité
- 76 • Vers une certification formelle de produits de sécurité
- 78 • Première mise en œuvre d'une application de chiffrement sur un circuit utilisant le calcul proche mémoire

80 SANTÉ NUMÉRIQUE

- 84 • Les outils de TAL pour aider à répondre à des questions de faisabilité d'études cliniques
- 86 • Logiciel d'évaluation personnalisée des doses d'imagerie par rayons X

88 NUCLÉAIRE DU FUTUR

- 92 • Contribution à la chaîne d'ingénierie de Framatome pour la conception des systèmes de contrôle-commande EPR
- 94 • Une instrumentation et des outils numériques avancés pour la caractérisation de colis de déchets radioactifs
- 96 • Discrimination neutrons/gamma à basse énergie par scintillateur plastique : un défi relevé par l'apprentissage automatique

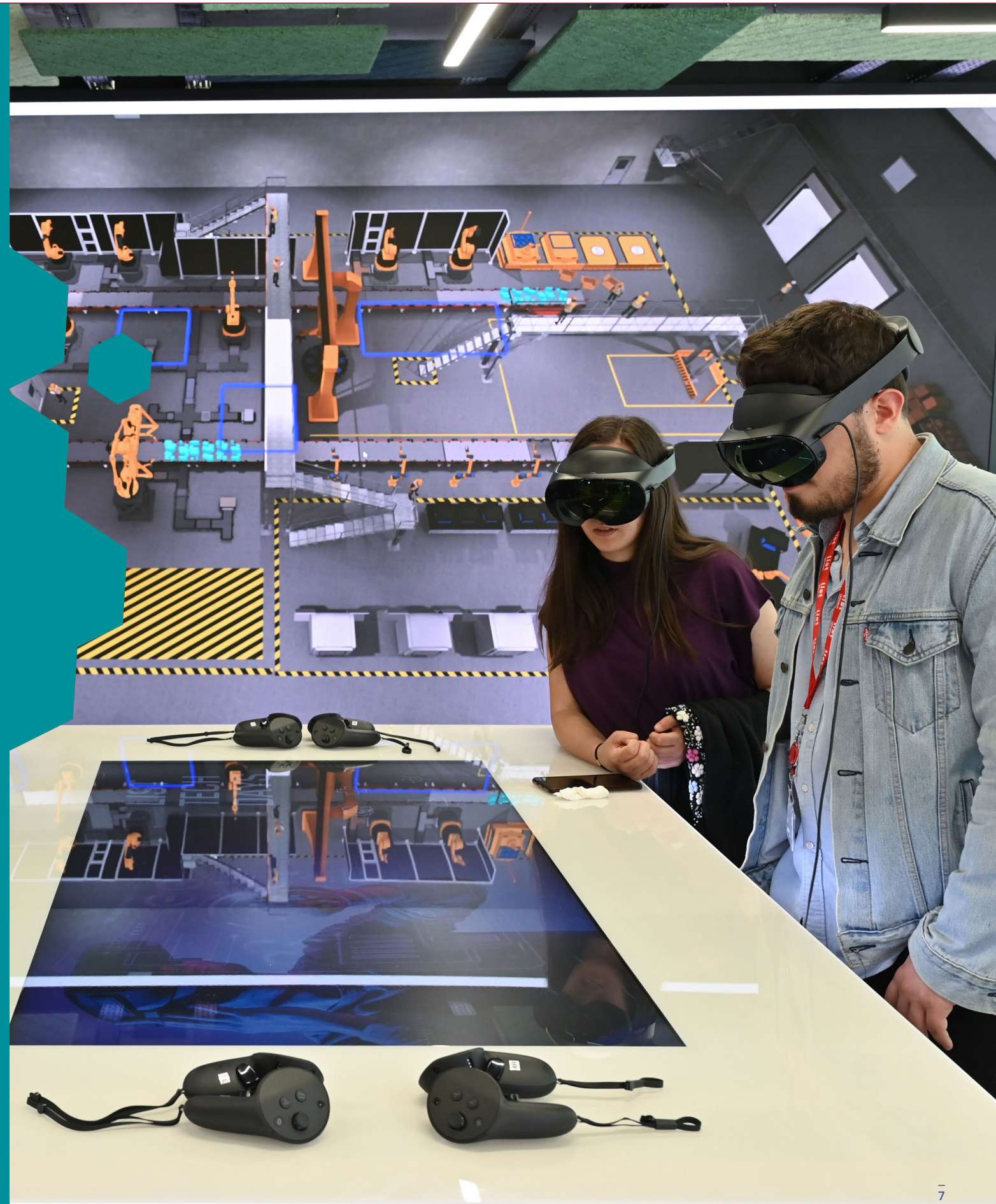


L'institut CEA-List

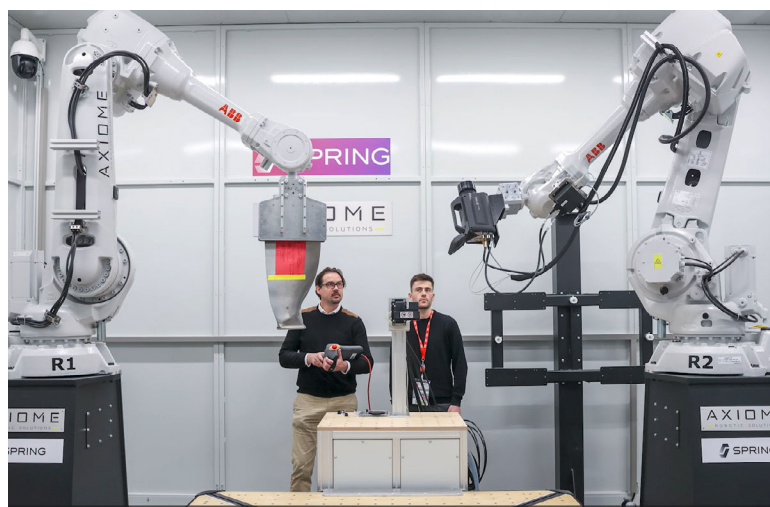
Le CEA-List, implanté sur les centres CEA Paris-Saclay et Grenoble, est l'institut de recherche technologique du CEA dédié aux systèmes numériques intelligents. Structurés autour des thématiques de l'intelligence artificielle, la confiance numérique et l'industrie du futur, ses programmes de R&D se déclinent dans plusieurs domaines applicatifs au service de la compétitivité industrielle.

Les 1 000 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^e fois consécutive depuis 2006.

VISION STRATÉGIQUE



Les plateformes d'innovation et nouvelles modalités de collaboration



Des modalités de collaboration adaptées aux besoins

Face à une concurrence toujours plus intense et aux attentes croissantes des consommateurs en matière de produits et de services, les industriels sont confrontés à l'impérieuse nécessité d'intégrer des innovations de plus en plus disruptives pour maintenir leur compétitivité. Dans cette quête d'excellence et d'adaptation, la collaboration avec un institut de recherche technologique comme le nôtre permet de faire émerger des solutions novatrices, capables de servir la vision stratégique de nos entreprises partenaires.

DES PARTENARIATS DE R&D POUR DES INNOVATIONS DE RUPTURE...

En nous appuyant sur nos expertises scientifiques et nos plateformes technologiques de pointe, nous concevons et développons des solutions

correspondant aux cas d'usage des industriels. Nous leur offrons un cadre collaboratif adapté, s'inscrivant dans la durée, pour améliorer leur outil de production ou travailler sur des sauts technologiques ambitieux. Ces partenariats se construisent au sein de projets collaboratifs nationaux ou européens, qui constituent un cadre propice à la maturation des briques technologiques développées dans nos laboratoires. Ils permettent de cofinancer des développements pour atteindre des niveaux de maturité technologique (TRL 3-4) autour de cas d'usages proposés par nos partenaires, au sein de consortiums d'acteurs académiques et industriels.

...ET DES SOLUTIONS INDUSTRIALISABLES À MOYEN ET COURT TERMES

Nous traitons les développements technologiques jusqu'à la preuve de concept industriel, selon des modalités permettant le partage des risques et bénéfiques, au sein de communautés de R&D ou de collaborations bilatérales visant pour nos partenaires un différenciant technologique exclusif.

Deux exemples illustrent cette flexibilité :

- l'accord de collaboration bilatérale, qui vise à mobiliser spécifiquement nos experts et nos plateformes de R&D au bénéfice d'actions singulières, définies annuellement avec le partenaire, lui assurant une exploitation exclusive des résultats pour les produits et domaines définis.
- le club affilié FactoryLab, qui regroupe des industriels autour d'enjeux communs de l'usine du futur. Basé sur le partage de cas d'usages industriels et couplé à un engagement sous forme d'une adhésion d'une durée de trois ans, ce club permet de produire des solutions concrètes, en prise directe avec les sujets industriels de ses membres.

LE CONCEPT DE CLUB AFFILIÉ FACTORYLAB

En réduisant et mutualisant le coût d'accès à l'innovation, ce modèle collaboratif favorise les échanges entre des acteurs issus de divers secteurs industriels et encourage la créativité et le partage de connaissances.

Les membres utilisateurs finaux du club bénéficient :

- d'un effet de levier financier par le co-investissement,
- d'une industrialisation accélérée des solutions par les fournisseurs de technologies,
- d'une montée en compétences sur des technologies numériques innovantes.

Les intégrateurs et techno-providers bénéficient également de cette montée en maturité ainsi que d'un fort potentiel d'industrialisation des technologies, au travers :

- d'une aide au financement de la montée en maturité des technologies,
- d'une mise sur le marché accélérée des technologies numériques innovantes,
- d'un accès privilégié aux grands donneurs d'ordre et à des chantiers pilotes.

Les plateformes d'innovation inédites

Pour transformer nos avancées en solutions opérationnelles, nous élargissons notre offre et diversifions nos moyens d'expérimentation au sein de nouvelles plateformes d'innovation. Celles-ci permettent à nos technologies d'atteindre un niveau de maturité technologique élevé, tout en offrant à nos partenaires des capacités opérationnelles (infrastructures et ressources *ad hoc*) pour les tester et les évaluer dans des contextes représentatifs de leurs cas d'usage industriels.

UN CONCEPT OPÉRATIONNEL ET ÉVOLUTIF

Dans le domaine de l'industrie du futur, notre première initiative est la plateforme Spring, dédiée à l'inspection numérique robotisée, opérationnelle depuis janvier 2023. Notre partenaire Safran y a déjà réalisé plusieurs projets répondant à ses enjeux de numérisation des contrôles. Les passages aux TRL 5 et 6 prévus en 2024 constituent un jalon important dans la stratégie de l'industriel qui projette les premiers déploiements de systèmes préséries dès 2025. Dans cette même dynamique, nous avons construit la plateforme PRISM autour de quatre axes principaux :

- l'usine numérique connectée,
- la production agile et flexible,

- l'usine durable,
- les machines intelligentes.

À titre d'exemple, nos capacités technologiques en Fabrication Additive (FA), incluant un nouvel équipement robotisé multi procédés, sont regroupées au sein de la plateforme Prisma, en vue de développer la continuité numérique de la FA.

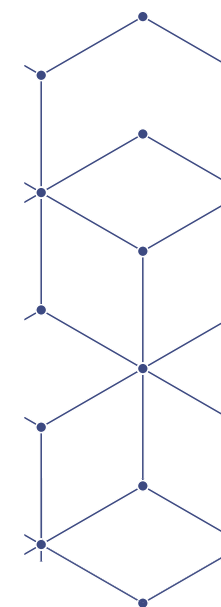
Le déploiement opérationnel de la plateforme PRISM s'appuie largement sur le projet européen AI-Matters de TEF (*Test & Experimentation Facilities*), via de nouveaux équipements ainsi qu'une offre de services pour accompagner les entreprises dans l'adoption des technologies numériques. Ces équipements élargissent nos capacités en robotique intelligente interactive, jumeau numérique, connectivité et partage de la donnée. Des services spécifiques au projet AI-Matters, combinant financement public et privé, fourniront par ailleurs un accès privilégié à la plateforme PRISM. Le projet AI-Matters nous offre ainsi une opportunité unique de développement partenarial à l'échelle européenne, avec des acteurs majeurs du manufacturing, en particulier en Allemagne, aux Pays-Bas et en Italie.

Ces plateformes d'innovation jouent un rôle important dans la structuration d'écosystèmes thématiques, à l'instar du modèle de club affilié FactoryLab, que nous souhaitons développer autour des différents axes de PRISM.

Les startups, acteurs dynamiques et agiles de notre écosystème

Enfin, la création de startups constitue également un vecteur de valorisation et de diffusion de nos technologies, lorsque celles-ci répondent à des critères de maturité et de différenciation propres à répondre aux besoins du marché. Ce sont ainsi plus de 30 startups qui ont été créées en 21 ans, portées pour la plupart par nos ingénieurs.e.s-chercheur.euse.s.

Au-delà de l'accompagnement « de l'idée à la création », nous intégrons nos startups dans notre écosystème partenarial, notamment en position de fournisseurs de technologies dans le cadre de consortiums.



Le Nuclear Digital FactoryLab

L'innovation numérique pour la performance opérationnelle de l'industrie nucléaire



Dans le cas spécifique de la filière nucléaire, le CEA porte une initiative destinée à accélérer la montée en maturité de technologies numériques répondant aux enjeux de performance opérationnelle dans les domaines de la conception, la construction, la fabrication, l'exploitation et le démantèlement. Le « Nuclear Digital FactoryLab » vise ainsi à développer des démonstrateurs sur des cas d'usages réels, afin de favoriser le transfert des technologies numériques adressant ces enjeux.

Inspiré par la réussite du concept FactoryLab pour le *manufacturing*, qui s'est traduit par la réalisation de 70 projets et de nombreux transferts vers l'industrie, le club affilié Nuclear Digital FactoryLab réunit des industriels utilisateurs finaux pour accélérer la maturation de technologies numériques et leur industrialisation, via un écosystème de fournisseurs de technologies.

Les enjeux spécifiques à la filière nucléaire seront adressés selon quatre thèmes :

- outils de conception et de monitoring,
- automatisation des chantiers,

- opérateur augmenté,
- confiance numérique.

Avec ses expertises numériques, le CEA apportera à la filière les fonctionnalités nécessaires à sa performance opérationnelle, en s'intégrant dans les systèmes et infrastructures existantes.

À la fois exploitant nucléaire et organisme de recherche expert du numérique, le CEA offre aux partenaires du consortium un accès privilégié à :

- ses technologies numériques innovantes,
- ses plateformes technologiques pour le développement et la qualification des technologies,
- des lignes pilotes pour tester les technologies en conditions réelles.

Cette initiative permet également aux acteurs de la filière nucléaire de rencontrer ceux d'autres filières industrielles, comme l'automobile, l'aéronautique ou l'*Oil & Gas* qui partagent des besoins et enjeux communs.

L'éco-innovation, une stratégie responsable

Le respect des contraintes environnementales et sociétales est l'un des défis auxquels sont confrontées les entreprises. Début 2024, la directive européenne « *Corporate Sustainability Reporting Directive* », dite CSRD, est entrée en application : les entreprises doivent désormais mesurer et réduire les impacts, risques et opportunités matérielles sur leurs activités propres. Elles doivent également intégrer les conséquences environnementales et sociétales de l'ensemble de leur chaîne de valeur. Il leur faut quantifier les impacts indirects de l'entreprise, en aval par l'usage de ses produits par ses clients, et en amont par l'activité qu'elle génère auprès de ses fournisseurs et partenaires. Ce contexte, aiguillonné par la mise en œuvre de nouvelles réglementations, nourrit une activité forte en éco-innovation et est à la source de nombreux projets industriels et européens au List.

UNE MISE EN ŒUVRE CONCRÈTE

L'obligation de réduction des impacts directs de l'activité manufacturière s'est traduite par le lancement de plusieurs projets mutualisés avec nos partenaires industriels, notamment dans le cadre de FactoryLab. Le projet Optimenergie vise ainsi à réduire la consommation d'énergie par une planification intelligente des procédés énergivores. Cette optimisation est rendue possible par la réalisation d'un jumeau numérique – du procédé ou de la ligne d'assemblage industriel – qui combine notamment des outils d'ordonnancement et des modèles de consommation.

TRAÇABILITÉ ET TRANSPARENCE

Quantifier les impacts indirects est aussi un véritable challenge pour les entreprises. Les données à collecter sont inhomogènes, granulaires, et dispersées chez les acteurs de la chaîne de la valeur. L'accès

aux données, leur véracité et leur interopérabilité accentuent la difficulté à faire un reporting fiable. De plus, chaque filière a développé empiriquement un vocabulaire et les relations sémantiques associées qui lui sont propres, ce qui rend plus complexe l'exploitation des données des fournisseurs et de leur propre chaîne de valeur. Par exemple, de grands groupes peuvent être amenés à manipuler des données issues de secteurs aussi variés que la chimie, la construction, l'électronique... C'est à ces défis que nous nous attaquons au travers du projet européen CIRPASS-2 que nous coordonnons, en tant que responsable du volet « plateforme numérique » du Digital Product Passport.

De plus, l'analyse des impacts environnementaux des activités industrielles doit couvrir l'ensemble du cycle de vie des produits. Plusieurs types d'impact sont à prendre en compte, au-delà de la production de CO₂, comme la consommation d'eau ou les effets sur la biodiversité. Appréhender et quantifier ces contraintes dès le début d'un cycle de conception implique de construire des modèles de données et des ontologies, avec des approches qui garantissent la fiabilité et la confiance. C'est tout l'enjeu de notre démarche d'éco-innovation.



Une stratégie européenne

Acteur engagé de la recherche au niveau européen, nous contribuons à la dynamique de la recherche européenne en déposant plus d'une centaine de projets chaque année, avec un taux de réussite supérieur à 30 %. Nous pilotons et contribuons ainsi à 110 projets européens chaque année, au sein des programmes Horizon 2020, Horizon Europe, Digital Europe, le Fonds européen de défense, Euratom, EuroHPC ou d'autres « *Joint Undertakings (JU)* ». Dans une démarche de responsabilité, nous mettons nos expertises au service de défis sociétaux tels que l'économie circulaire, via les projets de passeport numérique des produits CIRPASS, ou le partage sécurisé et souverain de données industrielles au niveau européen, via les projets Data Sp4ce et sm4rtanence.

Cette légitimité et cette reconnaissance croissantes nous ont permis d'intégrer de nombreuses instances stratégiques de R&D européenne. Nous représentons ainsi le CEA au sein de plusieurs associations et réseaux d'excellence dans nos domaines d'expertise.

DES RECHERCHES DE POINTE AU SERVICE DE TOUTES LES ENTREPRISES



Au niveau régional, nous accompagnons la transformation numérique des startups, PME et ETI au sein du European

Digital Innovation Hub (EDIH) Paris-Saclay, hub de référence de la Région Île-de-France. L'EDIH s'appuie sur l'écosystème territorial pour répondre aux enjeux de la transformation numérique et écologique dans cinq secteurs : l'aérospatial, la mobilité, le numérique et la sécurité, l'agroalimentaire, la santé et l'énergie.

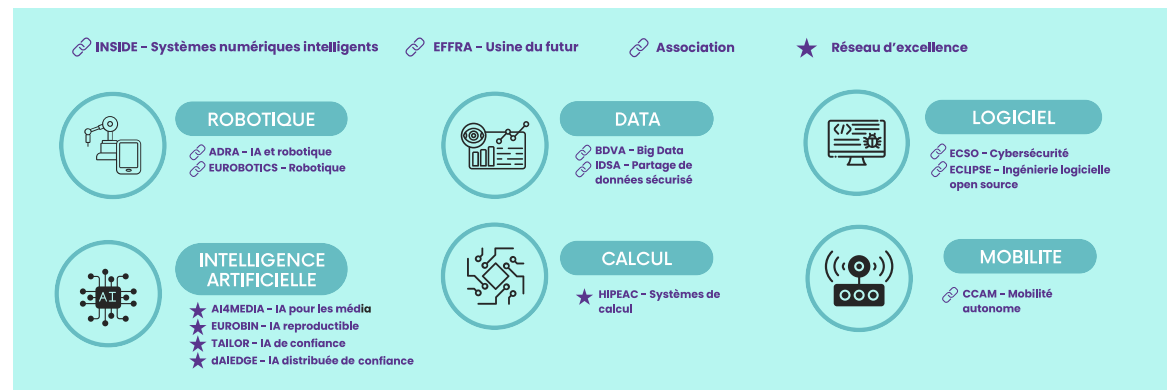
Ces secteurs, à forte implantation locale, sont au cœur de la stratégie de spécialisation de la région. Les entreprises concernées souhaitant s'engager dans une démarche de modernisation bénéficieront d'une Intelligence Artificielle (IA) opérationnelle et efficace, d'outils de cybersécurité et d'infrastructures de calcul. Le catalogue des services de l'EDIH Paris-Saclay couvre les compétences et la formation, les tests avant investissement, l'écosystème d'innovation, la mise en réseau et le soutien à la recherche d'investissements. Ces services seront pilotés par le CEA-List au sein d'un consortium de 17 membres, acteurs majeurs de la recherche et de l'innovation et industriels. L'EDIH Paris-Saclay est membre du réseau français des EDIHs et du réseau européen EDIH4Manu.



Notre rôle dans la transformation digitale à l'échelle européenne s'illustre également dans le pilotage du projet

AI-Matters (« *AI in Manufacturing Testing and experimentation facilities for European SMEs* »). Son objectif est d'accroître la résilience et la flexibilité du secteur manufacturier européen, grâce au déploiement des derniers développements en matière d'IA et de robotique, ainsi qu'au développement de systèmes intelligents et autonomes.

L'Europe a besoin d'installations de référence de classe mondiale et à fort impact pour permettre aux entreprises industrielles de toute taille de tester de nouveaux concepts basés sur l'IA et des technologies innovantes dans des conditions représentatives de la production. Avec les actions d'envergure, EDIH Paris-Saclay et AI-Matters, c'est le leadership de l'ensemble de l'industrie manufacturière européenne que nous contribuons à renforcer.



Écosystème académique

Le recrutement de nouveaux talents est aujourd'hui un réel défi pour de nombreuses entreprises, dans un marché pénurique, et constitue un enjeu majeur pour l'Institut. Le CEA-List a été créé en 2003 avec, pour mission, de réaliser des recherches sur les technologies logicielles et systèmes en accompagnement des besoins industriels, dans le contexte très dynamique de la transition numérique via les technologies de l'information et de la communication. Son activité de recherche et d'innovation s'est construite sur un large socle de compétences complémentaires qui va de l'instrumentation au génie logiciel et à l'ingénierie de systèmes complexes en passant par les solutions de calcul haute performance ou embarquées. Il peut ainsi aborder des thématiques essentielles comme le traitement des signaux et l'analyse des données, la conception de systèmes robotiques, l'intelligence artificielle (décision, apprentissage, analyse de données, vision, traitement des langues), la conception et la vérification de logiciels de confiance (au sens de la sûreté et de la cybersécurité) et l'intégration de l'intelligence artificielle.

Le large spectre de compétences du List et sa culture de projet au service de l'industrie lui ont permis de développer des technologies innovantes pour la conception et la maîtrise de la complexité de systèmes à haut niveau d'intégration. Pour cela, il s'appuie sur l'ensemble de l'écosystème académique en développant son implication dans les grandes structures, en particulier au sein de l'Université Paris-Saclay (conseil des écoles doctorales, institut DATIA), de l'Université Grenoble Alpes, avec l'Institut Polytechnique de Paris, Inria Grenoble et avec des collaborations auprès de plus de plus de 30 universités ou écoles au niveau national à travers la participation à des enseignements (+100 vacataires) et le co-encadrement de thèses (+100).

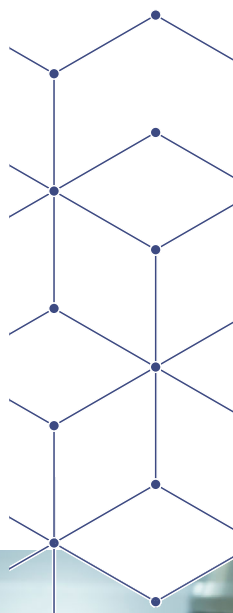
Les effectifs du List ont fortement évolué ces dernières années, avec un fort rajeunissement et une croissance des recrutements. Cette évolution est le fruit d'une politique volontariste de recrutement, ciblée sur les jeunes techniciens, ingénieurs, chercheurs.

Concrètement, sur l'année 2023, le List a réalisé plus de 200 recrutements, CDI, CDD sur projets mais également CDD formation (doctorants,

post-docs), ou contrats d'alternance... Si la question du recrutement est avant tout une question d'attractivité, celle-ci ne s'entend pas uniquement au niveau de l'organisation, mais aussi du territoire et de sa dynamique.

Rejoindre les équipes de recherche du List, c'est évoluer dans les meilleurs écosystèmes d'innovation français et européens. C'est coopérer avec les acteurs les plus innovants du territoire pour tester de nouvelles idées et repousser les limites. C'est la raison pour laquelle le List est engagé dans une politique active de relations avec les écoles et les universités, notamment au cœur des écosystèmes des Universités Paris-Saclay et Grenoble Alpes.

Depuis 2022, un réseau d'ambassadeurs a été constitué. Des relations suivies ont été mises en œuvre avec les responsables pédagogiques et responsables des relations entreprises d'un certain nombre d'écoles et universités cibles. Ces relations se matérialisent par la participation à des forums, des événements au sein des écoles, des enseignements dispensés par nos enseignants-chercheurs (plus de 3 000 heures d'enseignement dispensées) mais aussi par des visites de nos plateformes et infrastructures à destination des étudiants, afin de leur faire découvrir nos métiers.



Nos chiffres clés

COLLABORATEURS

1 000
personnes

dont

37 HDR
148 doctorants

3 senior fellows
(intelligence artificielle,
architectures de calcul,
ingénierie système)

10 fellows
79 experts

46 experts senior

31 directeurs
de recherche

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

300 publications
de rang A

2 044 brevets

78 nouveaux
brevets en 2023

VALORISATION INDUSTRIELLE

127 licences

28 startups

200 partenaires
industriels par an

ACTIVITÉ PARTENARIALE

500
projets
par an

> 120 M€
de budget
annuel

>80%
de ressources externes

Prix et distinctions

Médaille d'or aux Innovation Awards du salon SITEVI 2023 pour le jumeau numérique Ampélos (projet VINUM).

1^{re} place au Challenge Soccernet Multiple Object Tracking.

1^{re} place au Challenge dacl.ai sur la reconnaissance de défaut dans les structures en béton.

3^e place au Challenge international Robothon (robotique intelligente pour l'économie circulaire).

Prix HUBBELL 2023 remis à Xavier Mougeot pour ses travaux sur la radioactivité bêta, par la revue internationale « *Applied Radiation and Isotopes (Elsevier)* », remis lors de la 23^e Conférence Internationale sur la Métrologie des Radionucléides (ICRM 2023, mars 2023, Bucarest, Roumanie).

Grant du France-Berkeley Fund 2023 attribué à Guillaume Bertrand et Thibault Laplace pour leurs travaux sur les scintillateurs organiques pour la détection de neutrons.

Prix de thèse de la Eurohaptics Society reçu par Ayoub Ben Dhiab pour « *Confinement of vibrations of localized surface haptics.* »

Distinguished paper award décerné à Matthieu Lemerre à l'ACM SIGPLAN « *Symposium on Principles of Programming Languages* » (POPL 2023).

Best paper award

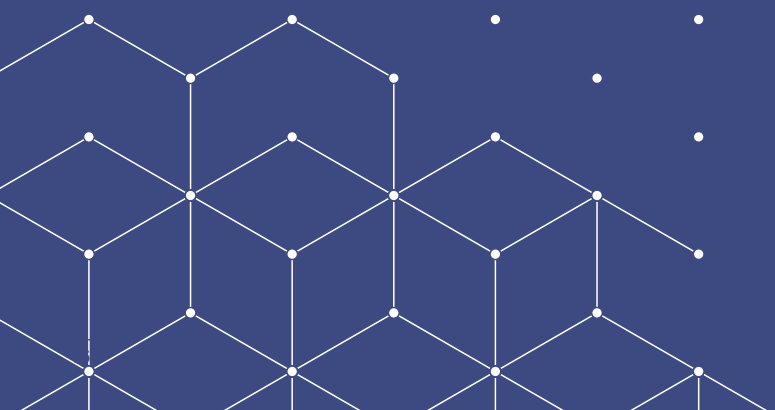
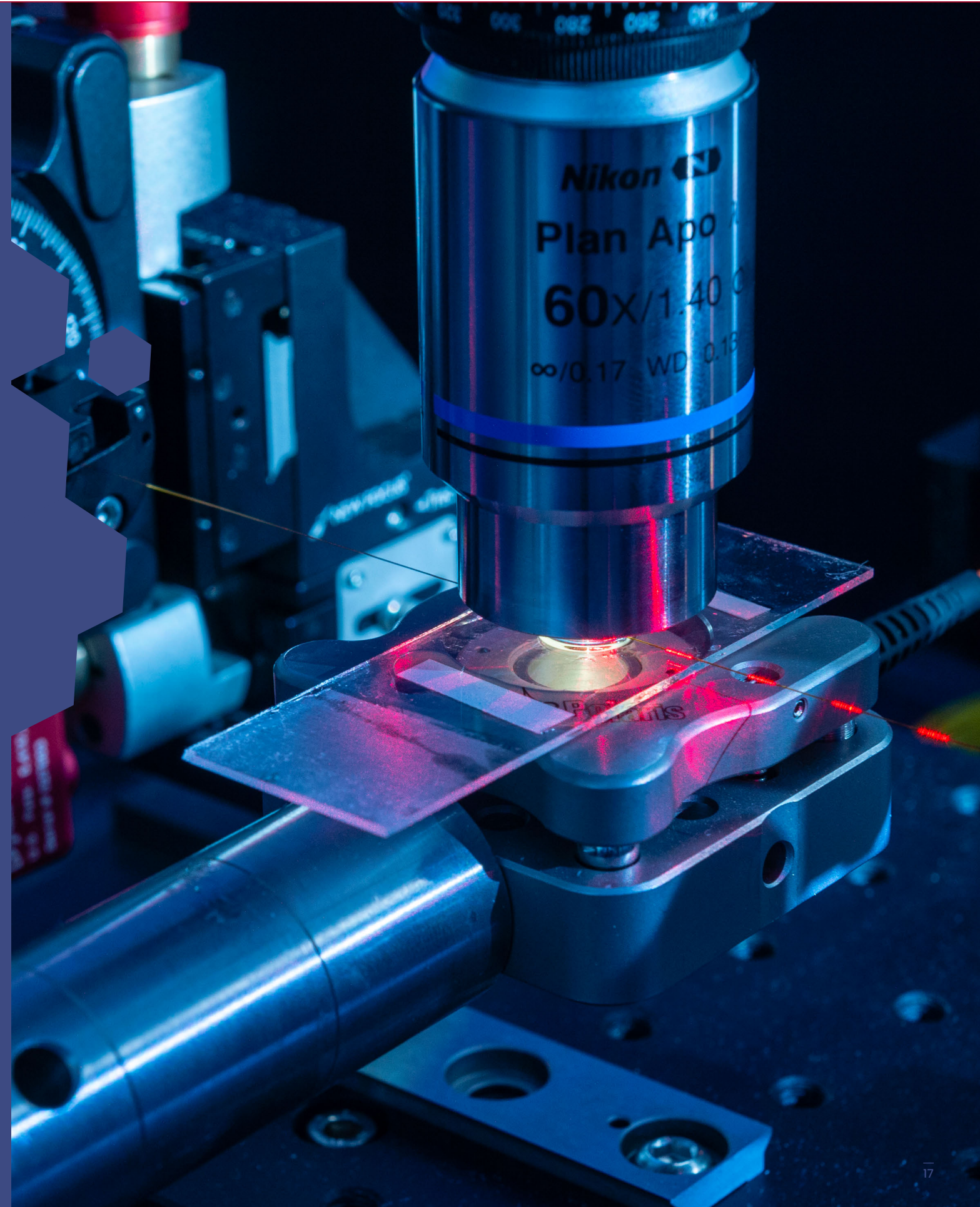
- Fabiola Espinoza Castellon, Deepika Singh, Aurélien Mayoue et Cédric Gouy-Pailler pour l'article « *FUBA: Federated Uncovering of Backdoor Attacks, a defense against targeted backdoor attacks in a federated learning context* », lors de la « *5th IEEE International Conference on trust, privacy and security in intelligent systems, and applications.* »

- Eiji Kawasaki pour l'article « *Scaling-up memristor Monte Carlo with magnetic domain-wall physics* » au workshop ML with New Compute Paradigms (MLNCP) de la conférence NeurIPS 2023.
- Romain XU-Darme pour l'article « *On the stability, correctness and plausibility of visual explanation methods based on feature importance* » lors de la conférence CBMI2023.
- Thibaut Benjamin et Julien Signoles pour leur article « *Abstract Interpretation of Recursive Logic Definitions for Efficient Runtime Assertion Checking* » lors de l'International Conference on Tests and Proofs (TAP 2023).
- Prix du papier le plus lu et cité de la revue MDPI Robotics Journals pour la période 2022-2023: « *A Comprehensive Survey of Visual SLAM Algorithms* » by Andréa Macario Barros, Michel Maugan, Yoann Moline, Gwénoélé Corre et Frédéric Carrel.

Prix du meilleur poster

- Aya Kanj lors de la conférence ANIMMA 2023.
- Arshjot Kaur lors de la conférence LTD20 (International Conference on Low Temperature Detectors) à Daejeon (Corée du Sud) pour son poster « *Determination of fractional electron capture probabilities of 59Ni by means of metallic magnetic calorimeter.* »
- Mostapha Lokman ZAHIR lors de la conférence IRRMA 2023 (International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications) pour son poster « *Energy non linearity correction of a high resolution metallic magnetic calorimeter.* »
- à Yaroslav Susaiev lors de la 7^e TechnoWeek à Barcelone.
- Mamy Razafintsialonina aux Journées Approches Formelles dans l'Assistance au Développement de Logiciels (AFADL 2023).

PROGRAMMES DE RECHERCHE



L'ORGANISATION DE RECHERCHE

Chercher des ruptures, développer des solutions numériques innovantes : nos ingénieur.e.s-chercheur.euse.s sont engagé.e.s dans leur mission de soutien et d'accélération de la transition numérique au bénéfice de notre société et notre économie. Nos recherches s'inscrivent ainsi dans la Mission numérique du CEA. L'institut CEA-List concentre plus particulièrement ses activités sur l'intégration de l'innovation logicielle dans les systèmes, à l'interface entre la machine, l'humain et son environnement.

Dans une approche de maîtrise de l'impact numérique sur l'environnement et de renforcement de la souveraineté nationale et européenne, nos programmes phares de recherches visent à répondre aux enjeux de nos partenaires industriels. Par construction, ces programmes évoluent et s'affinent en fonction des avancées scientifiques de leurs domaines, des verrous technologiques identifiés et des besoins exprimés par les entreprises industrielles.

Au sein de groupes de travail thématiques, nos chercheurs élaborent des visions scientifiques et techniques et identifient les sauts technologiques les plus pertinents. Autour des recherches associées à ces visions, nous construisons un écosystème intégrant des projets et des équipements d'envergure, dans lesquels nous sommes pleinement engagés. Nous pilotons notamment, aux côtés d'autres

organismes de recherche, les Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) Cloud, Intelligence Artificielle, Quantique et Cybersécurité.

Nous avons lancé des initiatives stratégiques comme la plateforme nationale DeepGreen pour l'IA embarquée, la plateforme européenne d'innovation pour l'industrie du futur (AI-Matters/PRISM), et participons au grand défi sur l'IA de confiance (confiance.ai) et sur l'informatique quantiques HQI et LSQ.

Ces actions sont complétées par nos « impulsions programmes », pour des recherches de rupture comme la robotique auto-apprenante, la blockchain verte, la sûreté des IA complexes, les accélérateurs de calcul pour l'IA embarquée ou les méthodes avancées de contrôle non destructif.

Dans les pages suivantes, nous vous proposons une revue sélective de nos avancées en 2023 sur les thèmes suivants :

▶ L'INGÉNIERIE SYSTÈME ET LES JUMEAUX NUMÉRIQUES

Au cœur de la transition numérique, elle vise à accélérer et fiabiliser le développement de systèmes numériques. Les verrous prioritaires portent sur :

- l'aide et l'automatisation de l'ingénierie basée modèles et le développement de capacités de travail collaboratif et décentralisé ;
- l'intégration forte dans l'ensemble des démarches d'ingénierie de la simulation au sein de jumeaux numériques fonctionnels et physiques. L'objectif à travers ce couplage est d'accéder à une vision holistique et dynamique de la structure et du fonctionnement des systèmes afin d'en effectuer une conception optimisée et sûre.

▶ L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE RESPONSABLE

Incontournable pour de nombreuses innovations, elle soulève des questions essentielles de :

- confiance et fiabilité des systèmes à base d'IA ;
- frugalité depuis la collecte des données jusqu'aux solutions électroniques pour l'IA embarquée ;
- sécurité, respect de la vie privée et éthique. S'appuyant sur une forte expertise sur les fondements algorithmiques et méthodologiques de l'IA, cet axe soutient également le développement de fonctions applicatives dans les différents usages de l'IA (vision, traitement des langues, analyse de données, etc.).

▶ LE CALCUL ET SYSTÈMES DISTRIBUÉS

De l'embarqué au cloud, les travaux du List visent à répondre aux besoins :

- des architectures logicielles et microélectroniques frugales et performantes pour l'embarqué ;
- de l'interaction avec le cloud, jusqu'aux composants pour le calcul haute performance ;
- des solutions décentralisées de partage et de gestion sécurisées des données. De manière plus prospective, le List soutient également des recherches pour la constitution de chaînes de développement et de mise en œuvre du calcul quantique.

▶ INSTRUMENTATION NUMÉRIQUE ET USINE DU FUTUR

La donnée est à la base de l'innovation des systèmes et procédés industriels. Les recherches portent, d'une part, sur les dispositifs de capture et de traitement avancé des données au sein de chaînes numériques continues, du capteur au contrôle des systèmes. Elles sont essentielles à la construction d'innovations fonctionnelles et techniques en soutien de la transition numérique dans l'industrie. D'autre part, en symbiose forte avec les chaînes numériques, l'usine du futur demande la capacité d'introduire de manière efficace et fluide la robotique avancée. Ses verrous concernent, notamment, la maîtrise des interactions humain-machine et la coopération machine-machine. Cela intègre les avancées de l'ingénierie système, de jumeaux numériques, ainsi que l'intelligence artificielle pour accéder rapidement à de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux modes d'interaction.



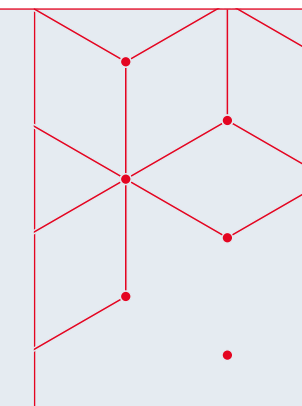
De par notre mission fondamentale de transfert d'innovation à l'industrie, notre vision englobe également des domaines clés d'application. Cybersécurité, santé numérique et nucléaire du futur portent ainsi une vision applicative issue des réflexions de nos équipes de recherche et de valorisation, et intègrent notre démarche d'éco-innovation. Ces visions/domaines favorisent les synergies et transversalités nécessaires entre nos équipes de recherche. Elles sont aussi les maillons qui relient nos recherches les plus innovantes aux besoins concrets et immédiats de l'industrie.



INGÉNIERIE DES SYSTÈMES ET JUMEAUX NUMÉRIQUES

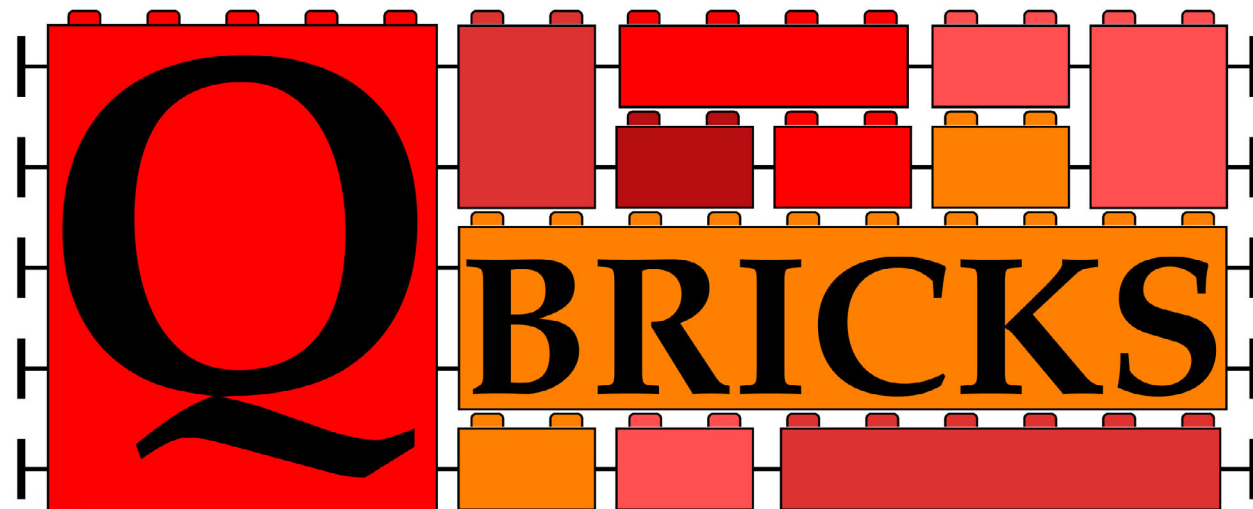
Les enjeux de développement durable sont au cœur de nos problématiques sociétales et de nos priorités d'action, et les principes de l'économie circulaire et sa digitalisation constituent un levier technologique puissant pour y répondre. Au travers de son axe de recherche et développement ingénierie systèmes et jumeaux numériques, le CEA propose un ensemble de technologies, adossées à des travaux scientifique à l'avant-garde, permettant de traiter de façon holistique l'ensemble du cycle de vie d'un système conformément aux principes de l'économie circulaire : de son écoconception, à sa mise au rebut, en passant par sa production, sa maintenance, ou encore sa réutilisation ou son retraitement.

Les approches d'ingénierie à base de modèles, couplées aux nouvelles technologies de réalité virtuelle et augmentée, facilitent la gestion de la complexité, le travail collaboratif, et plus généralement la continuité digitale. Elles permettent également d'intégrer de façon intuitive les spécificités et normes de chaque composante de la vie d'un système. Les méthodes formelles viennent fournir 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. L'intégration des outils d'ingénierie système basés modèles aux technologies du jumeau numérique permettent de couvrir tout le cycle de développement d'un système, facilitant sa mise au point et son maintien en opération, incluant sa maintenance. Enfin, l'incontournable intégration de l'IA dans ce panorama vient booster les technologies issues de cet axe, d'une part en améliorant leurs performances, et d'autres part en facilitant leurs usages. Les faits marquants présentés dans les pages suivantes illustrent tout cela. Dans un premier temps, le transfert de la technologie Cobomanip vers Kuka est un exemple d'intégration du jumeau numérique à un contrôle commande logicielle dans le domaine de la cobotique. Ensuite, la plateforme Papyrus4Manufacturing montre l'intérêt d'une approche d'ingénierie à base de modèles et jumeau numérique dans le domaine de l'industrie du futur. Puis, vient la présentation de CORTEX, une plateforme logicielle qui s'appuie sur le paradigme d'ingénierie à base de composants pour permettre des conceptions modulaires d'architectures logicielles de systèmes robotiques critiques. Enfin, les travaux consacrés au calcul quantique, par une approche de rupture, revisitent la question de la spécification et de la vérification des programmes, ainsi que les acquis des méthodes formelles.



NOS AVANCÉES 2023

- ▶ **La programmation quantique**
- ▶ **Une plateforme logicielle pour la création de jumeaux numériques fonctionnels dans l'Industrie 4.0**
- ▶ **Un framework industriel pour le développement de contrôleurs robotiques temps réel**
- ▶ **La reconstruction 3D pour la téléimmersion en Live Stream à 360°**



Christophe Chareton
Ingénieur-chercheur



« Vers des outils de vérification formelle pour une chaîne de développement et de compilation sûre. »

Sébastien Bardin
CEA Fellow



Ingénierie des systèmes

La programmation quantique

L'informatique requiert des outils de programmation, de vérification et d'analyse de code adaptés aux modèles de calcul sous-jacents. Le cas de l'informatique quantique est emblématique : alors que les développements matériels et algorithmiques progressent, il faut repenser toute la chaîne de développement logiciel pour l'adapter à ce nouveau paradigme.

Les développements matériels récents en informatique quantique annoncent des machines de calculs efficaces pour un futur proche. Cette situation appelle au développement d'un génie logiciel consacré à ce paradigme de calcul.

Un défi majeur consiste ici au développement de méthodes de débogage et de vérification de code, puisque les stratégies standards (basées sur le test et la vérification d'assertion) sont rendues impuissantes par les lois même de la physique quantique ici à l'œuvre (mesure destructrice, indéterminisme).

Fort de son expérience et de son expertise dans les domaines de l'analyse statique et de la vérification formelle de code dans le cas classique, le CEA adapte ces méthodes au cas quantique.

La solution repose sur un langage de programmation quantique associé à une sémantique formelle, permettant :

- d'annoter explicitement le code objet par des spécifications comportementales, de bonne formation et de ressources nécessaires à son exécution,

- de prouver mathématiquement la validation de ces différentes spécifications, (cf. figure 1).

Ces développements s'appuient sur la technique de vérification déductive, éprouvée dans le cas classique, et sur la représentation symbolique des calculs quantiques comme « sommes de chemins », version discrète des intégrales de chemins proposées par Richard Feynman (cf. figure 2).

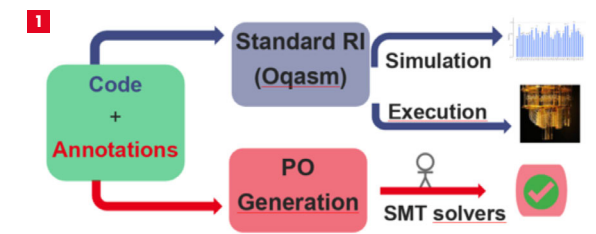
L'outil a été éprouvé par le développement entièrement vérifié d'algorithmes quantiques non triviaux, notamment la première implémentation prouvée de l'algorithme de Shor, et place Qbricks au premier rang dans la compétition internationale (cf. figure 3). Il a donné lieu à une publication dans ESOP 2021 ainsi qu'à l'édition d'un chapitre d'ouvrage en 2023.

Les développements en cours visent à intégrer Qbricks dans une chaîne complète de développement à usage pratique. Ceci passe notamment par :

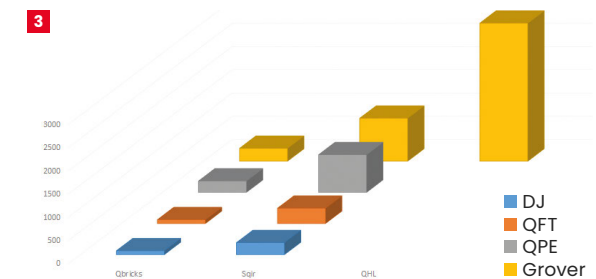
- le développement d'un langage de programmation et de spécifications utilisateur de haut niveau, combinant harmonieusement les meilleurs traits des langages industriels et académiques,
- l'extension des outils d'analyse au calcul hybride classique-quantique,
- l'extension des outils d'analyse et de vérification au cours de la chaîne de compilation.



Le projet Qbricks se concentre sur le problème du développement sûr et efficace de programmes quantiques, en adaptant au cas quantique les meilleures pratiques classiques en termes de langages, analyse de code et compilation.



$$|x\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2^r}} \sum_{y \in BV_r} e^{i\pi ph(x,y)} |k(x,y)\rangle$$



1 Compilation de code annoté en Qbricks : le code objet est traduit dans une représentation (symbolique) intermédiaire (RI) standard et directement recevable par un simulateur et/ou calculateur quantique. Les spécifications sont traduites en obligation de preuve (PO), prouvées correctes via une interaction entre des solveurs automatiques et l'utilisateur.

2 La représentation symbolique des sommes de chemins.

3 Mesure comparée de l'effort humain requis pour prouver des implémentations de différents algorithmes standards de la littérature (Deutsch-Jozsa – DJ, Quantum Fourier Transform – QFT, Quantum Phase Estimation – QPE, Grover) avec Qbricks et les solutions concurrentes.

Publications majeures :

• « *Formal Methods for Quantum Algorithms* ». Christophe Chareton, Dongho Lee, Benoît Valiron, Renaud Vilmart, Sébastien Bardin, Zhaowei Xu. Handb. Formal Anal. Verification Cryptogr. 2023: 319-422

• « *An Automated Deductive Verification Framework for Circuit-building Quantum Programs* ». Christophe Chareton, Sébastien Bardin, François Bobot, Valentin Perrelle, Benoît Valiron. ESOP 2021: 148-177



Saadia Dhouib
Ingénieure-chercheuse, experte senior en ingénierie de systèmes complexes



Ingénierie des systèmes

Une plateforme logicielle pour la création de jumeaux numériques fonctionnels dans l'Industrie 4.0

Pour répondre aux besoins de connectivité et de numérisation de l'usine et ainsi aux exigences de reconfiguration, supervision ou maintenance prédictive des lignes de production, la plateforme Papyrus4Manufacturing propose un outil de modélisation et de déploiement des interfaces numériques dans l'usine.

Le concept d'industrie 4.0 révolutionne l'organisation des moyens de production en introduisant la personnalisation des produits *Lot size 1* et l'approche « *Plug and Produce* », c'est-à-dire la mise en service d'une installation de production sans configuration poussée. Cela permet une grande flexibilité des chaînes de production et une meilleure résilience aux aléas.

Afin de concrétiser ce concept et de permettre, par exemple, la reconfiguration, la supervision ou la maintenance prédictive des lignes de production, il est nécessaire d'augmenter



la numérisation et la connectivité des composants de l'usine et, pour cela, de créer un jumeau numérique de l'usine. Celui-ci doit s'adapter en temps réel aux transformations de ses composants et aux reconfigurations des processus de production.

À ce jour, la seule norme indépendante de la technologie permettant d'effectuer la numérisation des usines est AAS (IEC63278-1). Pour chaque module matériel ou logiciel de l'usine, un *Asset Administration Shell* se décompose en :

- un modèle numérique fonctionnel du module,
- une interface programmée pour communiquer avec les autres modules de l'usine.

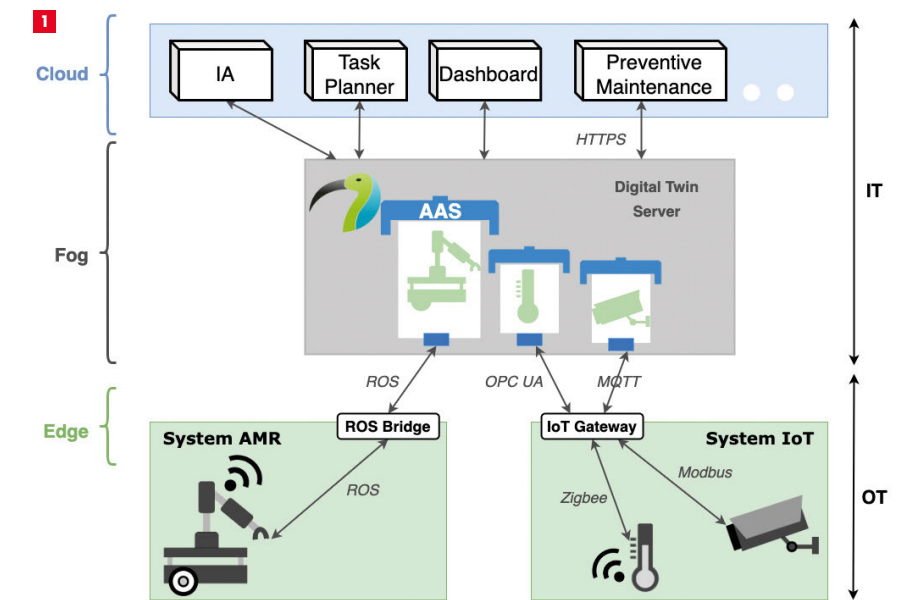
Cette norme du domaine du manufacturing, équivalente au standard USB, est soutenue par l'Italie (Industria 4.0), l'Allemagne (Platform 4.0) et la France (Alliance Industrie du Futur). Elle est en passe de devenir la norme internationale de l'industrie 4.0.

Cependant, les rares outils d'ingénierie permettant d'implanter des AAS sont incomplets : ils n'ont ni interface de modélisation graphique, ni fonctionnalité de déploiement automatique, ni connectivité standardisée aux équipements, ni vue graphique des modules connectés.

Pour y remédier, Papyrus4Manufacturing, basé sur le standard AAS, propose un outil de conception et de déploiement des interfaces numériques dans l'usine, qui permet de modéliser les ressources, produits et processus de production, de les déployer, de les piloter et de les superviser.

En collaboration avec le centre de recherche allemand DFKI, les chercheurs du CEA-List ont apporté leur expertise en ingénierie dirigée par les modèles (IDM) pour la création de Papyrus4Manufacturing qui offre :

- un langage de modélisation dédié au monde de l'Industrie 4.0,
- des interfaces graphiques pour la modélisation fonctionnelle des modules de l'usine,
- des générateurs automatiques de code pour la partie opérationnelle et la connectivité aux équipements réels avec des protocoles tels que OPC UA, MQTT ou ROS.



Intégration de Papyrus4Manufacturing dans l'usine

Cas d'usage, application, transfert :

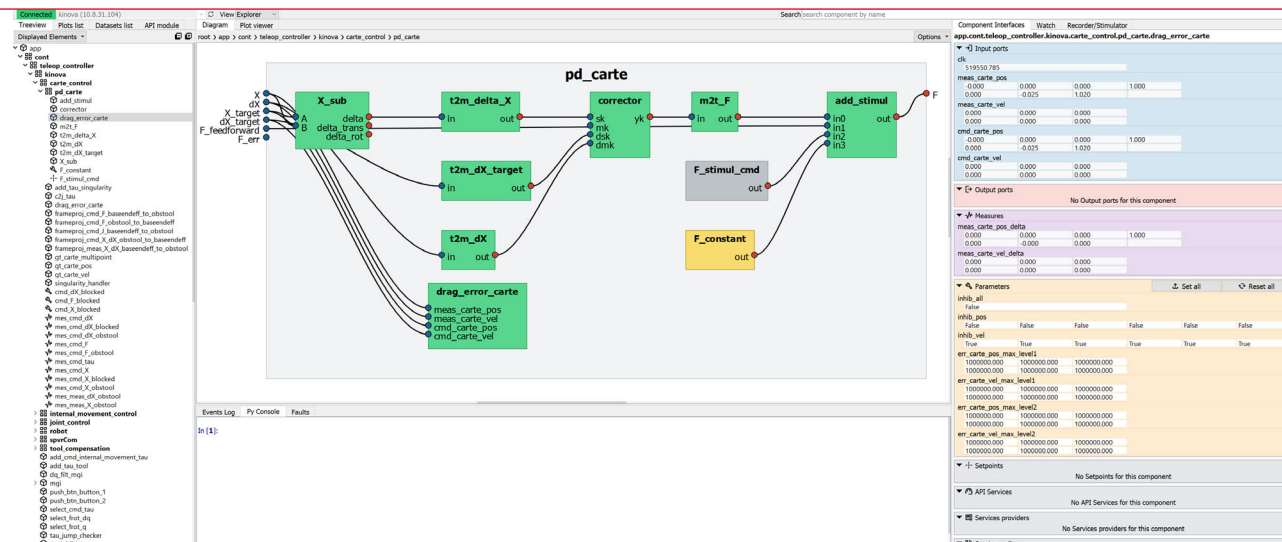
Papyrus4Manufacturing a été déployé sur des démonstrateurs pilotés par des partenaires industriels : gestion de déchets (DupliPrint), optimisation énergétique des ateliers de production (Stellantis) et dans un démonstrateur interne CEA : reconfiguration d'une cellule robotisée.

Partenariats :

Mise en open source afin de créer un écosystème de développeurs et d'industriels : eclipse.org/papyrus/components/manufacturing youtube.com/@PapyrusEclipseUML/playlists

Publication majeure :

S. Dhouib et al, « *Papyrus4Manufacturing: A Model-Based Systems Engineering approach to AAS Digital Twins* », IEEE ETFA 2023



Baptiste Gradusoff
Ingénieur-chercheur

«CORTEX permet d'accélérer et faciliter le développement de solutions robotiques flexibles et sur mesure, pour tous types de robots et d'applications.»

Ingénierie des systèmes

Un framework industriel pour le développement de contrôleurs robotiques temps réel

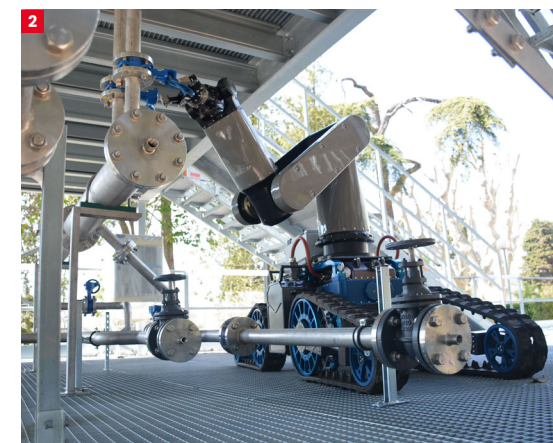
Les contrôleurs des robots commerciaux fournissent rarement les interfaces et modes de fonctionnement requis pour les activités de téléopération, cobotique et robotique menées par le CEA-List et ses partenaires industriels. Notre suite logicielle CORTEX y répond, par une solution modulaire et performante qui permet d'intégrer tout type de loi de commande sur tous types de systèmes robotiques, prototypes comme commerciaux.

Les développements robotiques du Service de Robotique Interactive se sont appuyés pendant environ 20 ans sur la plateforme TAO (Téléopération Assistée par Ordinateur). TAO est un outil mature, utilisé dans divers contextes industriels, mais qui souffre d'une conception monolithique rendant les évolutions fonctionnelles difficiles et coûteuses, notamment pour les applications robotiques sans rapport avec la téléopération. Sa prise en main est également complexe.

La suite logicielle CORTEX « *Component Oriented Real-Time Execution engine* » propose une approche totalement différente, basée sur une conception générique orientée « composant », qui permet de structurer le contrôleur robotique sous forme de schéma-blocs. Cette approche améliore sensiblement la lisibilité et la maintenabilité du logiciel, mais également sa modularité, puisque tout composant peut être capitalisé et réutilisé dans différents cas d'usage.

CORTEX n'est pas le seul framework robotique à s'appuyer sur la notion de composant, mais il se démarque de ses prédécesseurs tels que OROCOS et RT-MAPS par plusieurs avantages fondamentaux, qui le rendent plus apte à un usage industriel. D'une part, CORTEX permet une bien meilleure gestion de la complexité, grâce à des notions telles que les conteneurs (macro-composants qui permettent de réaliser des schémas à plusieurs niveaux) et la gestion de modes, qui permet de formaliser chaque mode de fonctionnement du robot par un schéma-bloc indépendant, et de changer de mode en temps réel. D'autre part, car CORTEX est une suite logicielle complète intégrant toutes les fonctionnalités et outils nécessaires à la mise au point, à l'exploitation et à la maintenance des contrôleurs robotiques.

CORTEX se démarque également du framework ROS, largement utilisé dans la communauté robotique, par un positionnement différent. ROS est un middleware conçu pour faciliter l'interconnexion d'équipements robotiques et de logiciels métiers, tandis que CORTEX est conçu pour réaliser des applications temps réel robustes et performantes. CORTEX est interconnectable avec ROS, ce qui garantit une grande compatibilité avec de nombreux outils tiers.



1 Tâche d'inspection et maintenance (manœuvre de vanne) réalisée en téléopération à retour d'effort

2 Système d'inspection et maintenance Cybernetix (Bras TENOR sur base mobile)

Projet ROB6, Cybernetix (Technip Energies)

«Cybernetix recherche une solution logicielle flexible et ouverte leur permettant de maîtriser totalement le contrôle commande de leurs robots.»

RÉFÉRENCES

Cas d'usage, application, transfert :

CORTEX est utilisé dans la quasi-totalité de nos applications robotiques. Son transfert industriel est en cours auprès de plusieurs partenaires, dont Orano (traitement des déchets nucléaires), KUKA

Systems (manufacturing), et Cybernetix, société du groupe Technip Energies (inspection & maintenance). Pour chacun, des projets d'industrialisation ont permis de développer des contrôleurs CORTEX à haut niveau de maturité (TRL 7/8), adaptés aux spécificités de

chaque application, et de les valider en conditions réelles.

Brevet :

CORTEX fait l'objet d'un brevet. La diffusion de la version industrielle 1.0 est prévue au début 2024, en synchronisation avec le premier accord de licence d'exploitation.



Jérémie Le Garrec
Ingénieur-chercheur, senior

Dr Jérémie Le Garrec est Ingénieur-chercheur senior au CEA-List depuis 2007. Titulaire d'un PhD de l'UPMC, ses sujets de recherche touchent à la réalité virtuelle, à la détection de collision, au traitement des nuages de points et plus récemment aux techniques de rendu basées sur l'Intelligence Artificielle.



Clément Dluzniewski
Doctorant

Doctorant sur la télé-immersion 3D collaborative de sites industriels basée sur des caméras VR 360 et des casques de Réalité Étendue.

Ingénierie des systèmes

La reconstruction 3D pour la télé-immersion en Live Stream à 360°

La télé-présence 3D et la simulation immersive par la 5G vont apporter de nouveaux moyens pour interagir en collaboratif et à distance, pour les besoins de l'Industrie 4.0. L'un des pas majeurs pour cela : disposer d'un système de télé-immersion « simple » à déployer qui se base sur la vidéo 360°.

Faciliter les interactions et les collaborations à distance pour les différents besoins liés aux jumeaux numériques (études produits/process sur des maquettes numériques, interactions collaboratives, formations des opérateurs, ...), tels sont les enjeux de la télé-présence 3D et de la simulation immersive par la 5G, pour l'industrie 4.0.

La plupart des systèmes actuels de télé-immersion volumétrique s'appuient sur plusieurs caméras pour capturer un lieu dynamique en 3D. Avec ces dispositifs d'acquisition complexes, concevoir un système mobile de télé-immersion facile à déployer semble compromis. Autre défi : la reconstruction 3D doit être temps réel et à faible latence, pour une réelle collaboration immersive à distance. Une piste prometteuse serait donc d'utiliser une seule caméra à 360° fixe, et de développer des moyens de reconstruire en 3D une scène dynamique en temps réel à partir d'un seul point de vue.

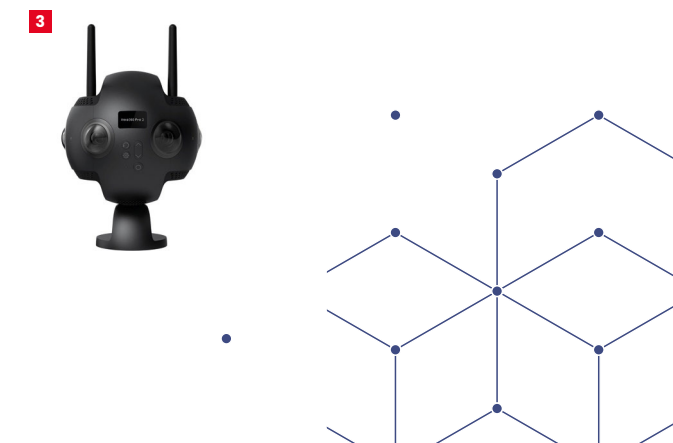
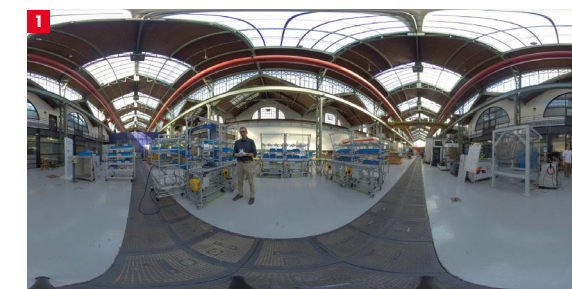
Nous proposons donc une nouvelle approche en ce sens.

Nous segmentons tout d'abord automatiquement la scène en trois classes d'éléments : l'environnement statique ou faiblement dynamique, les objets d'intérêt (machines, équipements, modèle d'un produit, etc.) et les personnes. Cette distinction permet ensuite d'adopter des méthodes temps réel de reconstruction dédiées, afin d'assurer pour chaque classe une reconstruction 3D optimale (qualité/temps de reconstruction) par rapport à la qualité du rendu ciblé suivant l'application.

- L'environnement statique 3D est reconstruit via une carte de profondeur estimée à partir d'un seul point de vue, par des algorithmes de « deep learning ». Les objets d'intérêt ont été préalablement effacés puis « inpaintés » (remplissage des zones effacées par des IA génératives).
- Les objets d'intérêt sont obtenus en détectant et en alignant leur modèle 3D, connu à l'avance, sur la vidéo 360°. Pour améliorer encore la latence du système, il est possible de ne transmettre que les variations d'état du jumeau numérique à travers la communication (positions/orientations des objets...), et de reconstruire l'état courant au niveau du client.
- Les personnes sont détectées et segmentées par des IA dédiées. La représentation 3D est choisie comme un plan 2D positionné dans l'espace 3D.

Cet ensemble de méthodes de reconstruction de la scène est conçu pour être temps réel et à faible latence ce qui offre aux utilisateurs en XR à distance un accès direct au flux diffusé.

- 1 Reconstruction 3D temps réel
- 2 Point de vue libre en réalité étendue
- 3 Caméra Insta360 Titan Pro 2, capable de réaliser des vidéos 360° en 8K grâce à ses 6 capteurs intégrés



RÉFÉRENCES

Cas d'usage, application, transfert :

La société Uptale intègre cette nouvelle technologie dans son offre logicielle pour des applications de formation 360°. Ce socle fort pour un système de télé-immersion mobile répondrait aussi à tout autre usage

de la télé-présence (réunions par exemple).

Publication majeure :
« 3D Reconstruction for Tele-Immersion in 360° Live Stream, Clément Dluzniewski »^{1,2}
Hakim Chekirou¹, Jérémie Le Garrec¹, Claude Andriot¹, and

Frédéric Noë², « International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments », (2023).

¹ CEA, List
² Université Grenoble Alpes, CNRS, G-SCOP



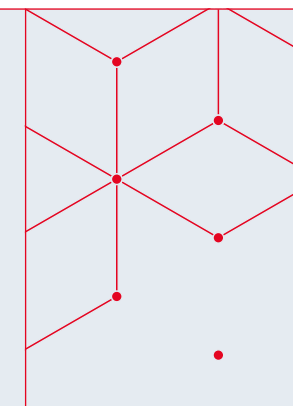
TECHNOLOGIES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Le programme transverse Intelligence Artificielle porte l'excellence scientifique sur deux enjeux clefs de la stratégie du List : **le numérique de confiance et le numérique frugal.**

Il s'ancre dans une recherche intense sur les fondements techniques et scientifiques de l'IA, visant à nourrir un vaste éventail de domaines d'applications variés. Un exemple notoire est la vision par ordinateur au service de l'industrie et de la société avec, par exemple : l'automatisation de l'inspection visuelle des ouvrages d'art et l'analyse de la performance dans les sports collectifs. L'analyse et la découverte des matériaux, est un autre exemple où le List se démarque via ses recherches en IA symbolique.

La question de la confiance numérique en IA constitue un axe fort du List qui trouve ses racines dans l'engagement historique du CEA sur la sûreté et la sécurité logicielle des systèmes critiques. Il est illustré par trois résultats marquants concernant : la caractérisation de la robustesse des IA ; la supervision des propriétés de sûreté des systèmes intelligents ; la génération automatisée de tests pour la sécurité des véhicules autonomes.

L'enjeu de la frugalité s'appuie sur une expertise unique en France sur l'IA embarquée. Elle couvre à la fois les aspects théoriques, logiciels et matériels pour atteindre les meilleures performances en environnement contraint en énergie, espace mémoire et temps de latence. De nouvelles générations d'accélérateurs pour l'IA illustrent les avancées majeures du List sur les enjeux complexes du sujet.

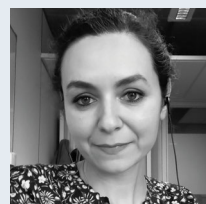


NOS AVANCÉES 2023

- ▶ **Génération de scénarios de test pour la sécurité des véhicules autonomes**
- ▶ **Une plateforme de caractérisation de la robustesse et de la sûreté des IA**
- ▶ **Un environnement pour superviser la sûreté des systèmes autonomes**
- ▶ **Inspection visuelle des ouvrages d'art fondée sur l'Intelligence Artificielle**
- ▶ **Suivi des joueurs de football dans des vidéos**
- ▶ **ExpressiF® Materials, un assistant de laboratoire virtuel pour la science des matériaux**
- ▶ **NeuroCorgi, vers une nouvelle génération d'accélérateurs matériels pour l'IA**



Boutheina Bannour
Dr Ingénieure-chercheuse



« Sur la base du modèle de conception du système, notre méthode génère des scénarios de test abstraits et représentatifs, en tenant compte des normes. »

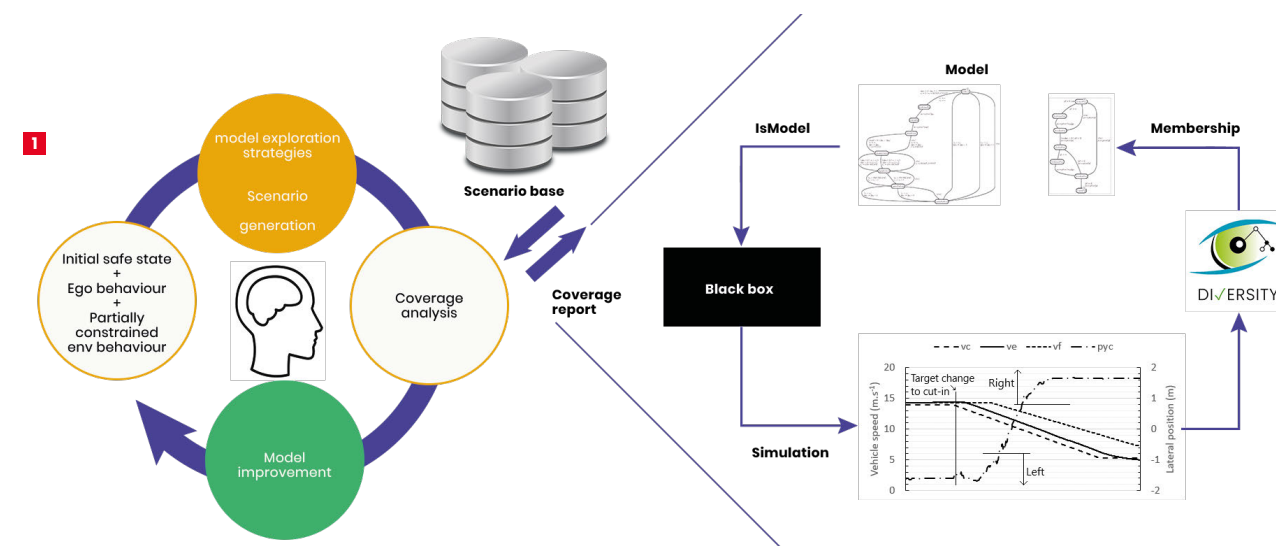
Technologies d'IA

Génération de scénarios de test pour la sécurité des véhicules autonomes

La sécurité des véhicules autonomes est difficile à garantir, du fait de la grande diversité des scénarios de conduite. Notre approche repose sur l'établissement d'une base de scénarios de conduite abstraits, variés et représentatifs, pour le test des véhicules autonomes.

Le projet IRT SystemX 3SA a abouti à la conception d'une méthode outillée pour établir une base de scénarios de tests représentatifs, afin d'évaluer la sécurité des Véhicules Autonomes (VA) dans divers environnements et situations de conduite. Trois catégories de scénarios sont prises en compte : ceux qui sont issus d'accidents réels, de tests sur route réelle et de simulations numériques. Le choix de tests aléatoires ne garantit pas une représentativité suffisante et la sélection des situations les plus courantes risque de négliger des scénarios rares mais dangereux (selon la norme ISO/PAS 21448 SOTIF).

Pour résoudre ce problème, nous proposons une approche utilisant un modèle abstrait du système au niveau des scénarios logiques. Ces derniers se présentent sous la forme de séquences temporelles de scènes de conduite, avec des paramètres définis dans un espace d'états discrets. Par exemple,

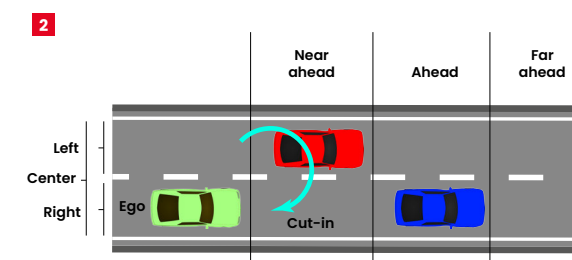


les espaces d'état discrets du paramètre « accélération » peuvent être « accélération constante », « ralenti faible » ou « ralenti fort », etc. Les scénarios de test concrets sont dérivés de ces abstractions en numérisant les paramètres, en vue de leur simulation.

Nous avons développé une méthode outillée pour générer ces scénarios logiques. Cela implique la construction d'un modèle abstrait dans l'outil Diversity du CEA-List, incluant le comportement du Véhicule Autonome (VA) et des autres acteurs routiers, puis l'utilisation d'un algorithme d'exécution symbolique pour explorer les chemins possibles du modèle. Ce dernier permet de générer un ensemble minimal de scénarios logiques abstraits couvrant l'ensemble des scénarios réels possibles à partir de la situation initiale.

La cohérence du modèle est vérifiée par comparaison avec la simulation. Cela inclut l'abstraction et la discrétisation d'une série temporelle de données simulant le VA réel, le test d'appartenance pour vérifier la correspondance avec le modèle abstrait et le raffinement du modèle abstrait en tenant compte des écarts avec les phénomènes physiques.

Cette méthodologie a été appliquée à une situation de conduite impliquant une manœuvre de *cut-in* (insertion d'un véhicule dans une voie de circulation).



1 Cycle d'un modèle

2 Situation de conduite *cut-in*

Projet 3SA

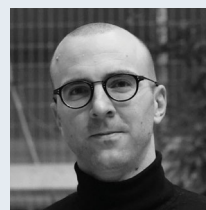
« Le projet vise à constituer une bibliothèque de scénarios de test en utilisant une plateforme de simulation du véhicule et de son environnement. Il complète les scénarios sur route ou d'accidents, pour établir des critères d'estimation de la couverture des tests. »

Projet majeur :
Projet IRT SystemX 3SA

Publication majeure :
« B. Bannour et al., *Symbolic Model-based Design and Generation of Logical Scenarios for Autonomous Vehicles Validation* », IEEE Symposium on Intelligent Vehicle IV



Michele Alberti
Ingénieur-chercheur,
Expert



« CAISAR est une plateforme open source qui combine différents outils de preuve et de test afin d'améliorer la confiance des IA via un langage de spécification formel et expressif. »



Technologies d'IA

Une plateforme de caractérisation de la robustesse et de la sûreté des IA

CAISAR (Characterizing Artificial Intelligence Safety and Robustness) est une plateforme open source qui fournit un environnement logiciel complet dédié à la spécification et à la vérification des systèmes à base d'Intelligence Artificielle (IA). CAISAR est actuellement utilisée dans deux grands programmes industriels et par deux partenaires académiques.

L'intégration de composants IA au sein de systèmes critiques nécessite une grande confiance dans leur sûreté ; cette confiance peut par exemple être assurée par l'usage de techniques de vérification formelle. Différents verrous sont identifiés pour permettre l'utilisation de ces dernières : tout d'abord, les programmes à base d'IA manipulent des données de grande taille (images, sons, textes), ce qui rend leur formalisation délicate. De plus, les programmes à base d'IA sont conçus suivant des algorithmes probabilistes qui donnent des structures de programmes qui dépassent la capacité actuelle des outils de vérification classiques.

La plateforme CAISAR a donc pour objectif de lever ces verrous suivant trois axes de travail :

- permettre une grande expressivité pour transcrire les spécifications complexes des systèmes à base d'IA en propriétés formelles effectivement vérifiables,
- passer à l'échelle sur la vérification en employant des prouveurs à l'état de l'art, dédiés aux composants IA,
- fournir des résultats de vérification explicables.

À ce titre, la plateforme CAISAR fournit un langage de spécification développé par le CEA-List qui permet une grande flexibilité de modélisation.

Le [site web CAISAR](#) fournit un manuel utilisateur accompagné d'exemples et de tutoriels. Il présente notamment deux cas d'usages gérés par CAISAR : la preuve de propriétés fonctionnelles d'un système anticollision d'avions (ACAS-Xu), ainsi que la robustesse de classifieurs face à des perturbations visuelles de la base de données de chiffres manuscrits fournie par MNIST (*Mixed National Institute of Standards and Technology*).

CAISAR évolue et s'améliore constamment pour répondre à des besoins de plus en plus complexes et réels. Le prochain véritable défi consistera à spécifier et à vérifier des modèles d'intelligence artificielle hétérogènes, tels que ceux composés de réseaux neuronaux et de machine à vecteurs de support. Pour ce faire, il sera nécessaire de concevoir un mécanisme de collaboration entre les différents prouveurs intégrés dans CAISAR, ce qui est ambitieux en matière de vérification formelle d'IA.

RÉFÉRENCES

Cas d'usage :

Livrée dans le cadre du programme Confiance.ai, la plateforme CAISAR a été appliquée aux deux cas d'usages présentés ci-dessus, ainsi que sur un cas d'usage porté par Renault, sur de l'inspection visuelle de soudures. La [plateforme CAISAR](#) est disponible en open source (licence LGPLv2).

Projets majeurs :

Ces travaux sont intégrés au programme DeepGreen, porté par le CEA, pour être appliqués à des réseaux de neurones embarqués. La plateforme CAISAR compte déjà des utilisateur·ice·s au sein de l'Université Technique de Dortmund et du Laboratory for AI Verification (LAIV) de l'Université d'Edimbourg.

Publication majeure :

La plateforme CAISAR a été présentée lors de conférences nationales et internationales du domaine (workshop AISafety à IJCAI).



Fabio Arnez
Ingénieur-chercheur

« Notre cadre de surveillance permet de superviser les composants basés sur l'IA dans des architectures robotiques hautement modulaires et distribuées au cours de tâches critiques pour la sûreté. »



ECSEL JU Project
Un cadre de technologies clés pour des drones sûrs et autonomes.

Technologies d'IA

Un environnement pour superviser la sûreté des systèmes autonomes

Notre environnement permet de superviser la sûreté à l'exécution de systèmes à base d'Intelligence Artificielle (IA). Il intègre l'incertitude liée au système et à son environnement pour identifier le niveau de sûreté et les situations à risque. Il a été appliqué avec succès pour la navigation autonome de drones.

Il est difficile de garantir la sûreté des systèmes autonomes à base d'IA, en raison de la complexité de leurs composants logiciels et de l'utilisation du deep learning lors de leur conception. Pour combler cette lacune, le CEA-List propose une architecture pour la supervision de ces systèmes en cours d'exécution.

Celle-ci contient d'abord des règles formelles de sûreté issues de l'analyse de risques du système, après identification des variables et des situations qui seront à risque au cours de l'exécution. Pour les variables du système, nous considérons les mesures de confiance fondées sur l'incertitude.

Sur la base de ces règles, un modèle des comportements sûrs est construit pour identifier l'état de santé du système et de son environnement. La santé du système est liée aux risques fonctionnels inhérents aux composants IA (comme le traitement

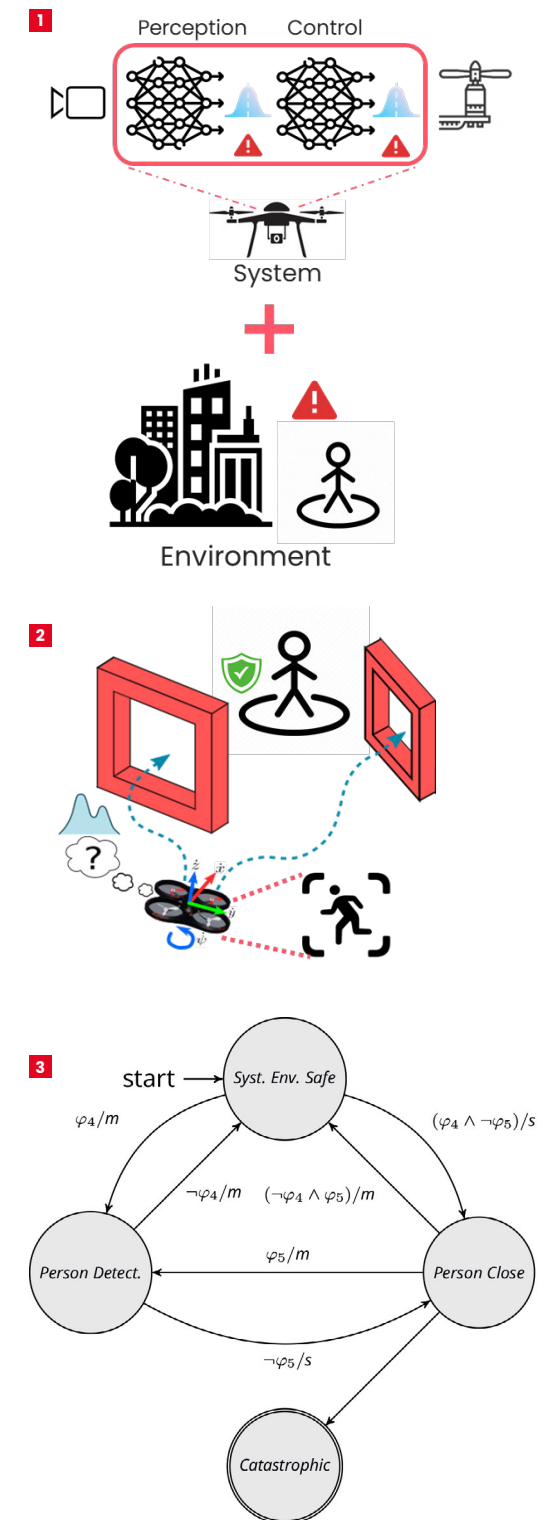
de données éloignées de ce qui a été appris), tandis que celle de son environnement est liée aux risques qui découlent de l'environnement à un instant donné (figure 1). En fonction de l'état de santé du système et de son environnement, différentes actions peuvent être entreprises pour maintenir le système dans son état ou le remettre dans un état sûr.

Lors de l'exécution, le superviseur de sûreté reçoit des informations venant des autres composants et les compare à son modèle de comportements sûrs, ce qui permet de déclencher des actions le cas échéant.

Nous avons appliqué notre architecture de supervision à la navigation autonome d'un drone au travers d'un ensemble de portes dont l'emplacement est inconnu à l'avance (figure 2). Nous avons pour cela utilisé l'environnement de simulation AirSim. Le drone est composé de trois blocs fonctionnels distribués utilisant le standard ROS2 pour la communication :

- 1 • bloc de navigation automatique. La fonction de navigation est réalisée au moyen de deux réseaux de neurones (perception et contrôle). Nous utilisons des méthodes de deep learning bayésien pour capturer l'incertitude associée aux prédictions de chaque réseau de neurones. De plus, dans le cas d'un pipeline de réseaux de neurones, l'incertitude est propagée d'un réseau de neurones à l'autre, ce qui permet une meilleure estimation de l'incertitude globale du système de navigation.
- 2 • bloc de détection de personnes et estimation de distance. Pour prendre en compte la sécurité des humains, nous avons utilisé une caméra de profondeur et entraîné un réseau de neurones Yolov5 pour la détection des personnes et l'estimation de leur distance. Cette fonction nous permet de représenter les situations où une personne entre dans le champ d'un drone pendant sa mission.
- 3 • bloc de supervision de sûreté (figure 3).

- 1 System Health and Environment Monitoring
- 2 System Automated Navigation Task
- 3 UAV Safe Behavior model for automated navigation



RÉFÉRENCES

Cas d'usage :

Navigation sûre de drones basés sur les réseaux de neurones.

Projets majeurs :

COMP4DRONES, ECSEL JU EU Project

Publications majeures :

• Arnez, Espinoza, Radermacher & Terrier, « *Towards Dependable Autonomous Systems Based on Bayesian Deep Learning Components* »

• Arnez, Ollier, Radermacher, Adedjouma, Gerasimov, Mraidha & Terrier, « *Skeptical Dynamic Dependability Management for Automated Systems* »



Nicolas Allezard
Ingénieur-chercheur

« Le projet SOFIA conjugue des travaux de recherche exigeants et un cadre applicatif fort. Il ouvre la porte à des avancées utiles aux inspecteurs. »



Didier Law-Hine
PhD, Chercheur R&D, chef du projet SOFIA pour Socotec Monitoring, Data & IA Hub

« La recherche et l'intégration de modèles deep Learning à l'état de l'art ont abouti à des avancées significatives dans un environnement applicatif solide. La variété des méthodes explorées tout au long du projet SOFIA a permis la sélection de celles démontrant des performances optimales. »

Technologies d'IA

Inspection visuelle des ouvrages d'art fondée sur l'Intelligence Artificielle

La France compte de nombreux ponts routiers qui doivent être régulièrement inspectés visuellement. Le projet SOFIA, associant le CEA et SOCOTEC, apporte une technologie innovante d'aide à l'inspection, basée sur l'intelligence artificielle.

Le CEA et SOCOTEC ont développé une panoplie d'algorithmes d'intelligence artificielle permettant de détecter et de caractériser automatiquement les défauts photographiés par l'inspecteur afin de guider ce dernier dans la saisie des informations et de lui proposer une note d'état pour les éléments inspectés.

Les algorithmes de deep learning s'appuient sur plusieurs centaines de milliers de notes d'inspection et d'images associées prises par les inspecteurs depuis 1996.

Pour exploiter cette base métier, nous avons tout d'abord mis en place des outils d'exploration et de pré-traitement des données, basés sur des techniques d'apprentissages non supervisés. Ces outils ont été utilisés pour nettoyer la base afin d'obtenir des données de qualité, nécessaires aux apprentissages ultérieurs. Ces techniques ont également permis un étiquetage semi-automatique des parties d'ouvrages ainsi qu'une aide

à la création d'étiquettes de segmentation de défauts, accélérant significativement ces tâches, généralement très chronophages.

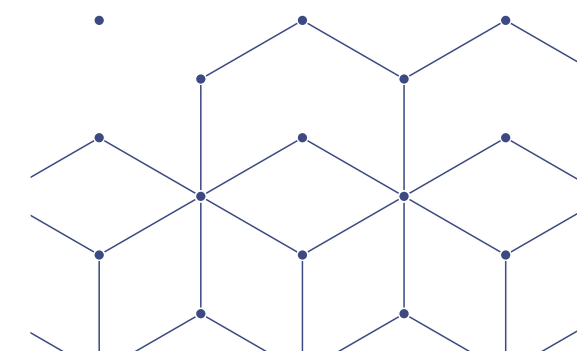
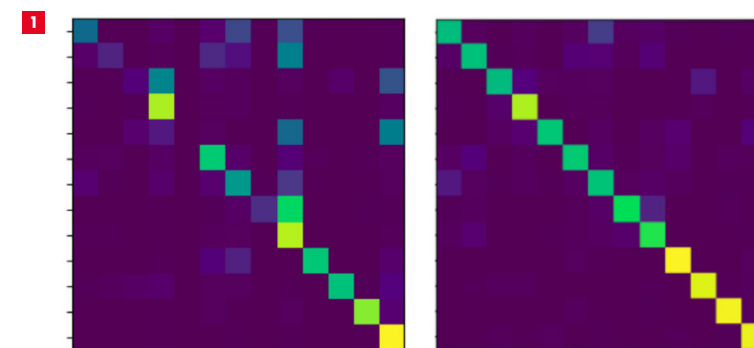
Les recherches conduites dans SOFIA sont basées sur les dernières architectures et les méthodes d'entraînement de l'état de l'art, ceci dans un cadre applicatif réel, et à partir de données non destinées à l'apprentissage (gestion des déséquilibres interclasses, filtrage par apprentissage des relations interclasses, Vision Transformers, DINO, SupMAE, iBot, SAM de Meta AI).

Les algorithmes développés permettent ainsi la classification de 13 classes de défauts et 13 classes d'éléments d'ouvrages d'art ainsi que la segmentation pixellique de 4 classes de défauts d'intérêt : fissure, corrosion, épaufrure (éclat de pierre dans le béton) et armature apparente.

Ces travaux ont été primés au Challenge CODEBRIM 2022 (deux premières places), pour la classification de défauts structurels.

Un outil final intègre tous les algorithmes dans une même chaîne de traitement hébergée sur le cloud. Il aide l'inspecteur à prendre une décision éclairée à partir d'une série de photos de défauts prises sur la caméra intégrée à sa tablette. Il lui propose aussi une note d'évaluation compte tenu de ce qui avait été fait auparavant dans des conditions similaires. L'inspecteur interagit avec l'outil et complète son rapport d'inspection plus rapidement. Les données sont mises à jour et stockées sur le cloud. Elles serviront notamment à nourrir l'historique des inspections et à des futurs réentraînements des modèles pour améliorer davantage les performances.

- 1 Amélioration des résultats entre un classifieur de défauts pré-entraîné (à gauche) et un classifieur réentraîné après apprentissage des caractéristiques visuelles (à droite).
- 2 Application SOFIA : segmentation de fissure, calibration automatique et calcul des caractéristiques géométriques du défaut.



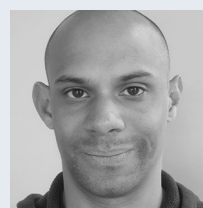
Publications majeures :

• « *Automatic Multi-label Classification of Bridge Components and Defects Based on Inspection Photographs* ». Matthieu Pâques, Didier Law-Hine, Otmane Alami Hamedane, Gauthier Magnaval, Nicolas Allezard, Eurostruct 2023.

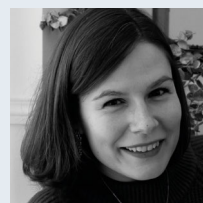
• « *Pretext Tasks in Bridge Defect Segmentation within a ViT-Adapter Framework* ». Matthieu Pâques, Didier Law-Hine, Otmane Alami Hamedane, Thanh-Tung Nguyen, Viet-Vu Tran and Nicolas Allezard. *18th International Symposium on Visual Computing (ISCV23)*, October 16-18, 2023.

Prix et distinctions :

- Challenge CODEBRIM 2022 1^{re} et 2^e place
- Nomination aux IMA France Corporate Innovation Awards 2024, catégorie coup de cœur.



Adrien Maglo
Ingénieur-chercheur



Astrid Sabourin
Ingénieure-chercheuse

« Le projet Team-Sports apporte des outils de mesures objectives de la dynamique de groupe aux entraîneurs d'équipes de sports collectifs. »

Technologies d'IA

Suivi des joueurs de football dans des vidéos

Dans le cadre du projet ANR Team-Sports, les équipes spécialisées en IA pour la vision du CEA-List ont développé une méthode de suivi de joueurs de sports collectifs dans des vidéos à point de vue dynamique. Elle a remporté les éditions 2022 et 2023 du challenge international de suivi de joueurs de football SoccerNet.

Le projet Team-Sports vise à apporter aux entraîneurs des outils de mesure objective de la cohésion d'une équipe de sport collectif en vue des jeux olympiques de 2024. L'analyse des attitudes individuelles et de groupe peut être faite à partir de données vidéo, facilement accessibles après un match et moins intrusives pour les joueurs qu'un dispositif porté.

Analyser finement la dynamique du groupe suppose de connaître la position des joueurs à chaque instant. Les technologies de suivi (ou « tracking »), largement étudiées en vidéo-protection, font face à de nouvelles difficultés dans le domaine sportif : déplacements beaucoup plus rapides, occultations mutuelles des joueurs, résolution faible dans l'image, maillots identiques pour une même équipe... Un atout complémentaire du suivi et de l'analyse vidéo est de pouvoir récupérer des données sur les adversaires. En effet, bien que les joueurs professionnels de sports extérieurs soient souvent

équipés de GPS, il est impossible de récupérer les données de positions de l'équipe adverse qu'il est pourtant tactiquement important d'analyser.

En 2022 et 2023, les Universités de Liège, KAUST et Baidu ont proposé un challenge international de suivi des joueurs de football, le « SoccerNet Tracking Challenge », en mettant à disposition des compétiteurs des séquences vidéo de matchs, filmés avec une seule caméra à point de vue dynamique.

Les chercheurs du List y ont proposé une nouvelle méthode de « tracking » de joueurs de sports collectifs, arrivée à la première place aux deux éditions du concours, où se sont affrontées respectivement 13 et 7 équipes du monde entier.

Pour la première édition du challenge, les boîtes de détection des joueurs étaient fournies par les organisateurs. Pour la seconde, les participants devaient aussi détecter les joueurs dans les images. Pour obtenir ces résultats d'excellence, nos experts ont enrichi un algorithme de suivi de piéton à l'état de l'art par :

- une correction du mouvement de la caméra qui réduit les erreurs d'associations des boîtes de détection de chaque joueur, entre les images,
- un algorithme de réidentification de personnes qui s'entraîne sans annotations sur la séquence vidéo à analyser. Cette étape permet de mieux reconnaître les joueurs portant le même maillot,
- un critère spatial d'association pour mieux gérer les joueurs qui sortent puis rentrent dans le champ de la caméra.

Suite à ces travaux, l'extension à d'autres sports collectifs est engagée (rugby, handball, volleyball et basketball). La Fédération Française de Rugby évalue ces nouvelles technologies, dans sa version multivues, et les premiers résultats sur des matchs complets de rugby à 7, sont prometteurs.



Participants	HOTA	DetA	AssA
Kalisteo	75.61	75.38	75.94
MTIOT	69.54	75.18	64.45
MOT4MOT	66.27	70.32	62.62
ICOST	64.67	73.07	59.17
SAIVA_Tracking	63.20	70.45	56.87
ZTrackers	58.69	68.69	50.25
Scnu	58.07	64.77	52.23
Baseline	42.38	34.41	52.21

1 Certificats de victoire pour les éditions 2022 et 2023 du « SoccerNet Tracking Challenge »

2 Résultats de l'édition 2023 du challenge « SoccerNet Tracking Challenge »

RÉFÉRENCES

Application :
Suivi du comportement individuel et collectif des joueurs de football dans des vidéos

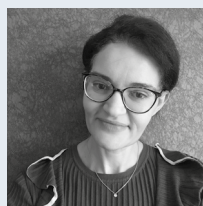
Projet majeur :
Team-Sports, ANR

Publication majeure :
Associée à un algorithme de calibration de terrain, la méthode permet de connaître la position des joueurs à chaque instant de la vidéo : Maglo A, Orcesi A, Denize J, Pham QC. « *Individual*

Locating of Soccer Players from a Single Moving View. Sensors. 2023; 23(18):7938. »



Nadia Ben Abdallah
Ingénieure-chercheuse



« L'IA pour la science des matériaux est un domaine passionnant de par sa multidisciplinarité et du potentiel infini qu'il offre en termes d'innovation technologique et de recherche scientifique. »

Jean-Philippe Poli
Ingénieur-chercheur



« L'IA symbolique peut avoir un impact décisif sur la science des matériaux, tout en gardant l'Humain dans la boucle. »

Technologies d'IA

ExpressIF® Materials : un assistant de laboratoire virtuel pour la science des matériaux

La science des matériaux consiste à produire de nouveaux matériaux aux performances optimisées pour un usage donné. Le caractère fortement combinatoire (proportion des produits de base à mélanger, paramètres du procédé de fabrication, etc.) de cette démarche est un terrain de jeu idéal pour l'IA symbolique ExpressIF®.

L'Intelligence Artificielle (IA) symbolique est le courant de l'IA qui se base sur les connaissances. ExpressIF® en est une implémentation moderne : la plateforme du CEA-List permet non seulement de modéliser des connaissances expertes, mais également de les extraire automatiquement à partir de données. Ces connaissances sont ensuite appliquées à l'aide à la décision ou à la résolution de problèmes. La force de l'apprentissage symbolique est de demander moins de données pour généraliser et produire des modèles interprétables, c'est-à-dire compréhensibles et vérifiables par l'Humain.

C'est cette capacité à mélanger des connaissances expertes et des connaissances acquises à partir de peu de données qui rend ExpressIF® particulièrement pertinent pour les sciences expérimentales, parmi lesquelles la science des matériaux.

Toutes les forces d'ExpressIF® sont mobilisées dans ce cas d'usage : l'apprentissage frugal (nécessitant moins de données expérimentales), l'interaction avec l'utilisateur, qui dans notre cas est un scientifique expérimentateur. D'où la déclinaison ExpressIF® Materials qui spécialise ces interactions tout en se basant sur les capacités d'ExpressIF®.

En pratique, ExpressIF® Materials est basé sur la recherche de liens causaux entre les paramètres de fabrication et les propriétés des matériaux fabriqués. Ces liens sont ensuite caractérisés par des connaissances induites qui permettent de prédire ces propriétés. Dans un souci d'extraire des informations pertinentes des données expérimentales, la plateforme est même capable de trouver des liens graduels qui facilitent la recherche des paramètres optimaux. Ainsi, le chercheur n'est pas lésé et peut tirer parti de ces informations, contrairement à l'usage d'une boîte noire ou d'un modèle non interprétable. Et la comparaison parle d'elle-même : ExpressIF® prédit le plus souvent mieux que les autres modèles d'IA (*xgBoost*, *random forest*, *polynomial fitting*, etc.) tout en étant plus interprétable.

Aujourd'hui, la plateforme se dote d'un nouvel algorithme d'apprentissage actif qui permet de recommander la prochaine expérimentation à faire. À chaque itération, les connaissances sont mises à jour afin de prédire de mieux en mieux les propriétés du matériau et de converger plus rapidement vers les paramètres qui l'optimisent. Cet algorithme fait le choix à chaque itération d'explorer une nouvelle possibilité ou de faire une expérience qui « ressemble » à une précédente, tout en justifiant son choix.

Les perspectives sont nombreuses afin d'adapter ce que nous avons à différents types de données et à différents cas d'usage, tout en améliorant les performances et la nature des connaissances que l'on peut extraire.

RÉFÉRENCES

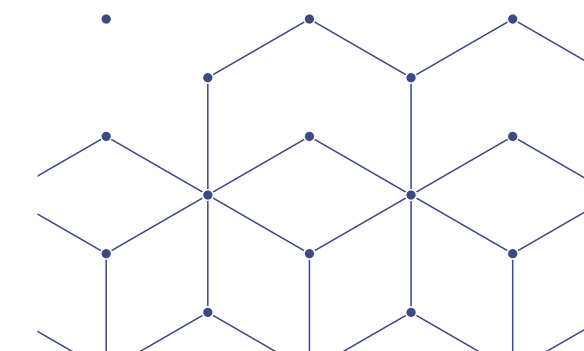
Cas d'usage :
Application au photovoltaïque, à la fabrication additive et aux matériaux anticorrosion. Au-delà de la science des matériaux, cette approche peut être

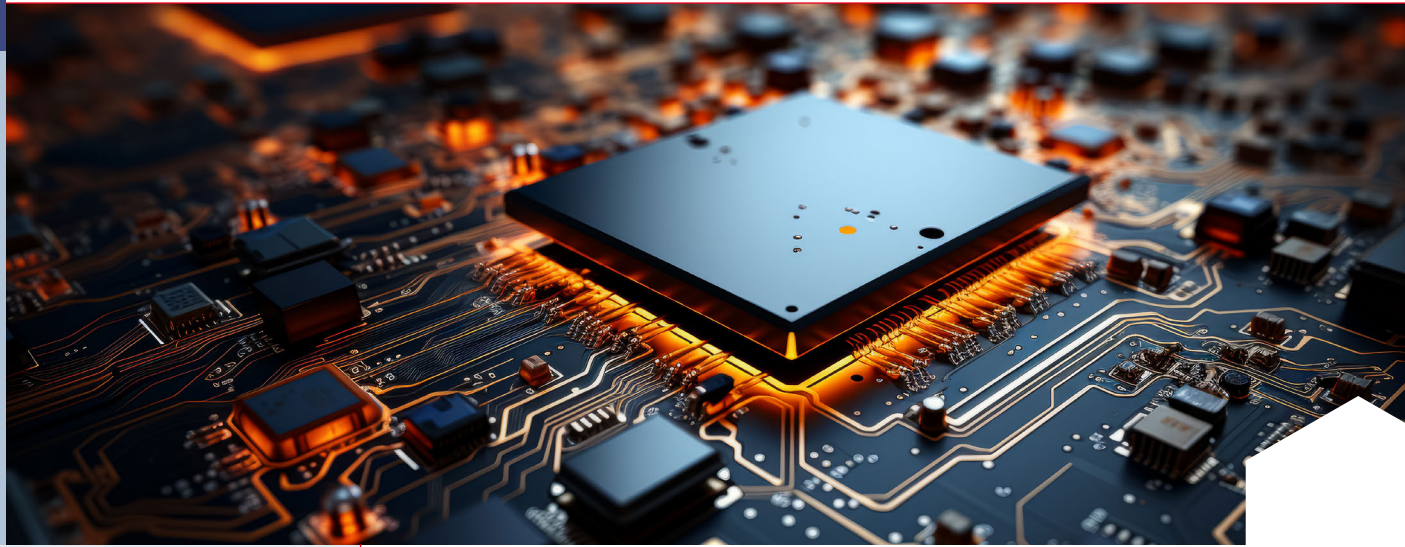
appliquée à d'autres sciences expérimentales (biologie, etc.).

Projet :
Ces travaux sont soutenus par le plan transverse de compétences « Matériaux et Procédés » du CEA.

Publication :
Les premiers résultats obtenus sont en cours de publication.

Brevet :
BD21293





Vincent Lorrain
Ingénieur-chercheur,
Expert CEA



Technologies d'IA

NeuroCorgi, vers une nouvelle génération d'accélérateurs matériels pour l'IA

Le domaine de l'IA embarquée se développe rapidement. Chaque jour, de nouveaux cas d'application apparaissent, avec des contraintes de plus en plus importantes. Il est donc crucial de repenser notre approche du calcul en IA pour en améliorer l'efficacité énergétique et réduire sa latence. Le circuit NeuroCorgi apporte une réponse originale à ces défis.

Pour atteindre des performances énergétiques supérieures à 15 TOPs/W (métrique de consommation énergétique mesurée en nombre d'opérations par watt), nous devons mettre en œuvre des solutions de rupture. Nous avons donc choisi le calcul en flux « couche par couche » qui utilise un calculateur spécialisé pour chaque couche du réseau. Cette approche offre une meilleure adéquation aux besoins calculatoire, mais impose une topologie unique pour le modèle d'IA exécuté.

Pour aller au bout de notre logique, nous avons décidé de figer les poids du modèle. Cela évite la consommation liée à la lecture mémoire. De plus, ces poids se combinent avec les multiplicateurs, créant ainsi des Multiplicateurs Multi-Constantes (MCM). Cependant, l'utilisation de MCM n'est pas toujours efficace, il

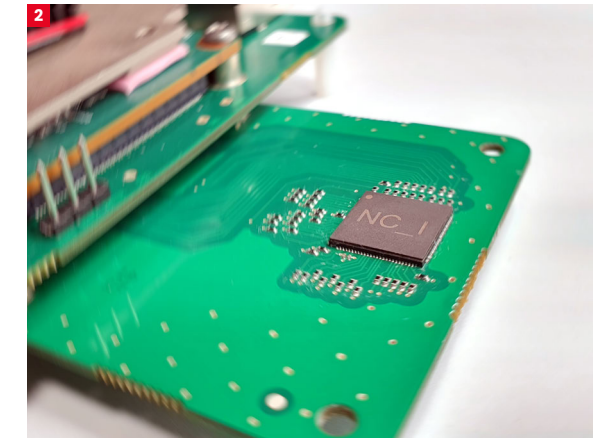
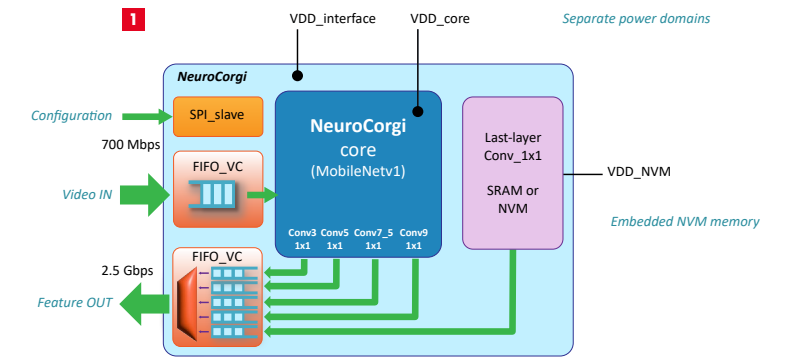
il y a un équilibre entre la taille des données d'entrée et le nombre de valeurs par MCM qui détermine le gain.

La mise en œuvre d'une telle technologie constitue un réel défi : créer un tel circuit revient à résoudre un problème d'optimisation multicritère complexe. Nous avons commencé par réduire la précision des poids et de l'accumulation en utilisant une technique de Quantification À l'Entraînement (QAT). Concernant les MCM, nous sommes intéressés au parallélisme : plus le calcul est parallèle, moins il y a de valeurs par multiplicateur, mais plus il y a d'instances de celui-ci. Le parallélisme joue aussi dans l'équilibrage de la chaîne de traitement, nécessaire pour maximiser le taux d'utilisation des ressources. Nous avons donc mis en œuvre des techniques de conception permettant d'arbitrer entre les différents facteurs, tels que les multiples domaines d'horloge, la sélection de nœuds technologiques pertinents, ou le dépliement calculatoire semi-automatisé.

Cela dit, tout est fixé, mais pour quelle application ? Un réseau fixé l'est pour une base de données. Mais il n'est pas nécessairement dédié à une application. L'utilisation de réseau pré-entraîné est une pratique courante dans la conception algorithmique. Et nous avons montré qu'ajouter un petit réseau programmable représentant 3% de la charge de calcul globale est suffisant pour s'adapter à une nouvelle tâche.

Tous ces choix nous ont permis de développer le circuit NeuroCorgi (figure 1), un ASIC aux caractéristiques exceptionnelles : il nous a permis d'intégrer le réseau MobileNetV1 apha1 -représentant 2,23 millions de paramètres- dans moins de 10mm² (figure 2), avec une consommation d'énergie < 100mW et une latence de < 10µs par image HD. Cela représente une amélioration de la performance énergétique d'un facteur 1000 par rapport aux solutions classiques.

Pour obtenir de tels résultats, de nombreux travaux ont été menés. Les techniques d'optimisations de modèles comme le QAT, ainsi que la génération du code RTL (*Register Transfer Level*, utilisé pour la description des architectures microélectroniques), ont été réalisées à l'aide d'Aidge, une plateforme logicielle open source, dédiée à l'IA embarquée et développée en interne. Les réglages fins (parallélisme, multi horloge, etc.) ont quant à eux été effectués manuellement. À présent que l'approche est validée, notre objectif est d'améliorer notre outil de génération de circuits, afin d'accélérer le déploiement de ce type de solution dans des environnements hétérogènes.



1 Architecture du circuit NeuroCorgi
2 Circuit NeuroCorgi

RÉFÉRENCES

Cas d'usage :
Vision par ordinateur, détection
d'objet et segmentation d'image

Brevets :
DD20709, DD19017, BD21750 CM BFF
21P055



CALCUL ET SYSTÈMES DISTRIBUÉS

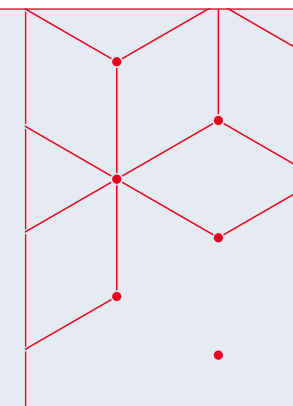
Notre monde hyper-numérisé a besoin de puissances de calcul et de capacités de stockage de données toujours plus grandes. Les géants du web (Amazon, Google, etc.) ont pris une longueur d'avance et mettent à disposition des capacités gigantesques de cloud via d'énormes data centers répartis un peu partout dans le monde.

La gestion de ces plateformes, l'orchestration des services proposés, intégrant des capteurs/actuateurs commandés, et leur utilisation dans des systèmes complexes de contrôle soulèvent de nombreux verrous scientifiques et techniques pour atteindre l'objectif des systèmes distribués à grande échelle maintenables, efficaces, simples d'utilisation, sécurisés et ayant un impact énergétique minimal.

La première étape consiste à connecter les capteurs, dispositifs et équipements pour des traitements localisés des données via des architectures de calculs et des architectures électroniques spécifiques, sécurisées et basse consommation. Grâce à différentes technologies, tous les appareils physiques d'un nœud sont connectés, agrégés et abstraits pour être considérés comme une seule entité logique, capable d'effectuer des services distribués, ce nœud pouvant être, par exemple, un véhicule. Actuellement, les solutions basées sur le cloud font l'objet de nombreuses recherches en raison de la demande croissante de ressources informatiques et de la nécessité de limiter les besoins énergétiques. Pour cela, il est nécessaire de développer de nouvelles architectures de calcul pour améliorer les performances du cloud mais aussi de développer de nouveaux modes de calcul et en particulier en développant des outils de calcul quantiques allant depuis les architectures, les corrections d'erreurs jusqu'à l'ensemble de la pile logicielle permettant de proposer des solutions logicielles en restant agnostique du hardware.

Cependant, des recherches récentes prédisent qu'il est peu probable que les cloud centralisés fournissent des services satisfaisants dans un avenir proche. Il est donc nécessaire de traiter les données à différents niveaux, depuis le niveau local, ou « *edge computing* » jusqu'à des niveaux plus centralisés du cloud dans un continuum « *edge-to-cloud* ».

Corollaire de cette explosion des données et de cette hyperconnectivité, la sécurité devient cruciale. La blockchain apporte des solutions novatrices, notamment sur la certification et la traçabilité grâce au stockage et à la transmission d'informations transparentes et sécurisées permettant de garantir la traçabilité de composants ou d'opérations.



NOS AVANCÉES 2023

- ▶ **Les méthodes formelles au service de la blockchain**
- ▶ **Continuum, de l'objet au cloud, pour une convergence IT/OT**
- ▶ **Chaîne de perception multi-capteurs embarquée**
- ▶ **Graph Convolutional Neural Networks (GCNN) pour capteurs événementiels en imagerie**
- ▶ **VxP, le processeur à précision étendue**
- ▶ **Le List au cœur de la révolution quantique**



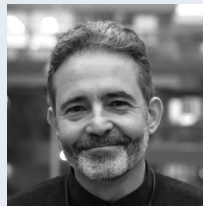
Calcul et systèmes distribués

Les méthodes formelles au service de la blockchain

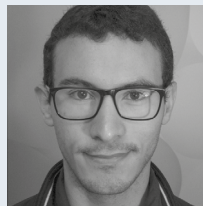
Des méthodes de spécification et de vérification formelles innovantes renforcent la confiance dans les systèmes distribués basés sur un consensus tel que les protocoles de blockchain les plus récents.

Les systèmes distribués basés sur le consensus permettent à un ensemble d'acteurs non localisés de parvenir à différents types d'accords sans dépendre d'une autorité centrale. Les algorithmes de consensus les plus sophistiqués sont dits « tolérants aux fautes byzantines » (BFT), c'est-à-dire qu'ils garantissent l'atteinte d'un consensus en dépit de la présence d'un certain nombre d'acteurs défectueux ou malveillants, qualifiés de « byzantins ». Cependant, les algorithmes BFT ne garantissent l'obtention d'un consensus que si le nombre d'acteurs byzantins reste inférieur à un certain seuil, généralement égal à 1/3 du nombre total d'acteurs. Pour savoir si cette hypothèse de fonctionnement est vérifiée pour un système distribué, et donc si le consensus atteint est fiable, il est nécessaire de pouvoir identifier et compter les acteurs byzantins au cours de l'exécution du système.

Stéphane Salmons
Chef de Laboratoire,
Ingénieur-chercheur, Expert



Erwan Mahé
Ingénieur-chercheur



Christophe Gaston
Ingénieur-chercheur



Antonella Del Pozzo
Ingénieure-chercheuse,
Experte



Arnault Lapitre
Ingénieur-chercheur, Expert

Notre méthode de vérification à l'exécution permet d'identifier les comportements byzantins et de fournir des preuves publiques de ces comportements. Cette méthode inclut les trois étapes suivantes basées sur l'outil d'analyse formelle MAAT IAT du CEA-List :

- 1 • la modélisation de l'algorithme de consensus sous la forme d'un modèle comportemental exprimé dans le langage de spécification de MAAT IAT (langage basé opérateurs décrivant des processus d'interaction parallèles, prouvé à l'aide de l'assistant de preuve Coq),
- 2 • le monitoring et stockage des messages échangés entre les acteurs du système distribué par un module centralisé qui observe globalement l'ensemble des communications du système (appelé multi-trace),
- 3 • l'évaluation de la conformité du comportement de chaque acteur par une technique formelle de conformité de la multi-trace au regard de sa spécification (MAAT IAT). Lorsqu'un acteur byzantin est identifié, le modèle est mis à jour pour intégrer cette information et permettre la poursuite de l'analyse à la recherche d'autres acteurs byzantins éventuels.

Cette méthode se différencie de l'état de l'art par les innovations suivantes : elle permet d'identifier plusieurs acteurs byzantins opérant simultanément, elle fournit des preuves publiques et elle ne nécessite aucun matériel spécifique. En outre, elle peut être étendue à tout algorithme distribué pouvant être modélisé dans le langage MAAT IAT.

- 1 Extrait de la modélisation avec MAAT IAT de l'algorithme de consensus Tendermint
- 2 MAAT IAT identifie les acteurs n1 et n7 de la blockchain Tendermint comme étant des Byzantins



```
2 iat.exe byzantine_search .\tm_7nodes.hsf .\tm_7n_2byz.htf
SEARCHING FOR BYZANTINES
in the scenario described by the MULTI-TRACE
from file '.\tm_7n_2byz.htf'
of length '18'
W.R.T. the MODEL
from file '.\tm_7nodes.hsf'

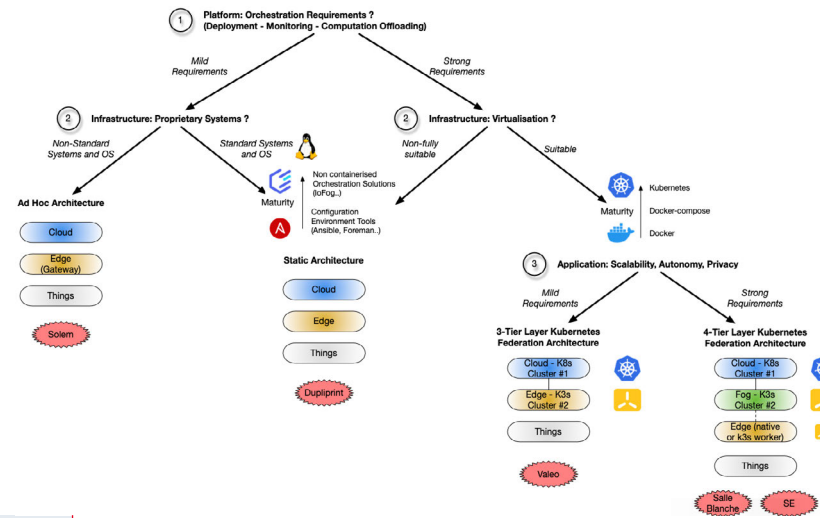
byzantines : ["n1", "n7"]
```

RÉFÉRENCES

Cas d'usage, application, transfert :
Expérimentation avec succès sur la blockchain Tendermint et implémentation dans la plateforme d'apprentissage distribué du projet Carnot Fantastyc.

Brevet :
EP23305495.6 : « System, method and computer program product for detecting byzantine nodes in a consensus-based distributed system. »
Un 2nd brevet est en cours sur l'amélioration de la méthode avec des modules de monitoring locaux à chaque acteur, pour l'insérer dans un protocole entièrement distribué.

Publication majeure :
E. Mahe, C. Gaston, P. Le Gall, « *Denotational and operational semantics for interaction languages: Application to trace analysis.* In *Science of Computer Programming, 2024* »



Calcul et systèmes distribués

Continuum, de l'objet au cloud, pour une convergence IT/OT

Assurer la continuité entre les données sur le terrain et le cloud constitue le principal frein à la numérisation massive et complète des entreprises. Le projet OTPaaS a l'ambition de proposer une plateforme de terrain appropriée à la gestion et au stockage performant des données. Elle permettra de garantir de hautes performances en termes de temps de réponse, de sécurité, de confiance et d'efficacité énergétique pour la digitalisation du monde industriel.

Ce projet, démarré fin 2021 pour une durée initiale de trois ans, regroupe des fournisseurs de technologies nationaux et d'usagers venant de grands groupes (Atos, Schneider Electric, Valeo) et de PME/ETI (Agileo Automation, Mydatamodels, DupliPrint, Solem, Prosyst, Soben), avec un soutien fort de grands instituts de recherches français (CEA, Inria, IMT, CAP'TRONIC). Les trois instituts List, Leti, Liten participent à ce projet inscrit dans la stratégie cloud du gouvernement et dans le contrat de filière Solution Industrie du Futur. Il est coordonné par le CEA-List qui souhaite, par l'implication de l'ensemble de ses départements, consolider ses travaux sur la maîtrise des données produites par les systèmes cyber-physiques.

La première année a été consacrée à la consolidation des objectifs et au démarrage des premiers travaux. Trois piliers structurent notre activité avec un travail conséquent :

1 • Maîtriser des infrastructures hétérogènes et distribuées de l'objet jusqu'au cloud (figure 1) :

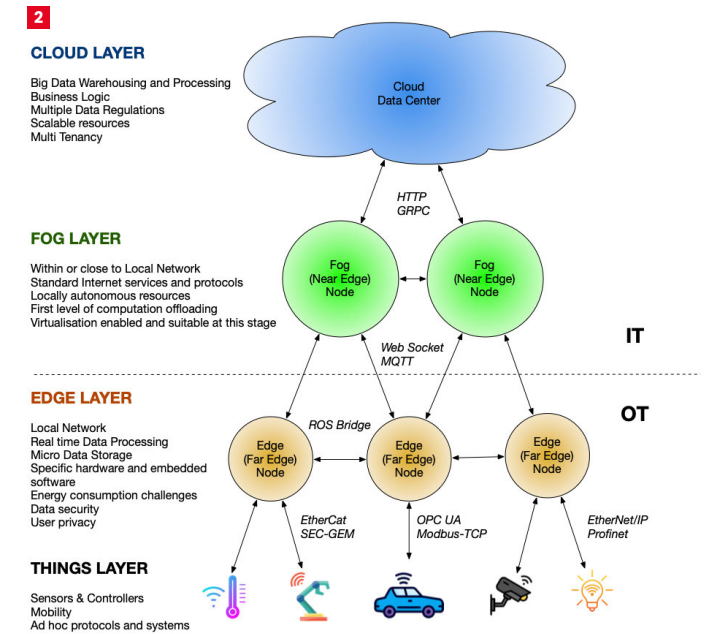
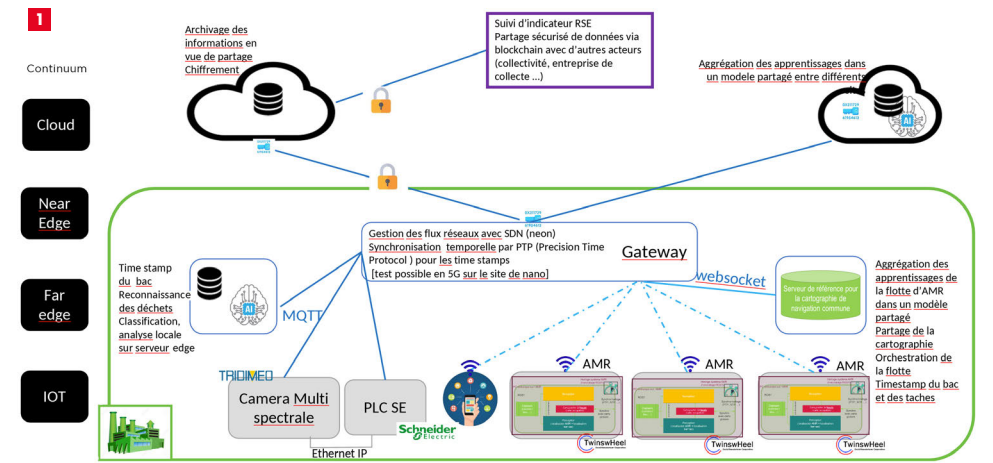
- identification de grandes classes d'architectures d'IoT industrielle, du matériel et des solutions logicielles associés,
- mise en place d'une méthodologie permettant de naviguer entre ces architectures en fonction des contraintes systèmes,
- étude autour de la mise en œuvre de Kubernetes pour réaliser une plateforme d'orchestration de conteneurs du edge (OT) jusqu'au cloud (IT).

2 • Offrir des briques technologiques pour le continuum « edge to cloud. »

3 • Améliorer et optimiser l'utilisation de nos briques technologiques applicatives dans le continuum IOT2cloud en confiance :

- nos BTs seront intégrées dans le continuum « edge2cloud » sur le cas d'usage gestion des déchets industriels (figure 2).
- un travail important de définition des différentes briques technologiques applicatives a été effectué : ROS est utilisé comme middleware d'intégration des applications robotiques.

Les applicatifs seront développés sous forme de nœuds ROS et déployés sous la forme de container. Le déploiement et la maintenabilité de ces applicatifs pourront ensuite être assurés par divers protocoles.



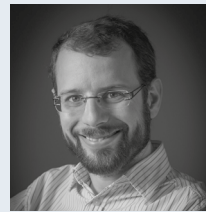
1 Generic Blueprint
2 Architecture de gestion du tri des déchets

RÉFÉRENCES

Cas d'usage, application, transfert :
Réalisation d'une maquette pour le démonstrateur gestion des déchets au 3^e trimestre 2023. Réalisation d'une première démonstration sur le site de DupliPrint en 2024. Contribution au PEPR Cloud pour consolider les premiers travaux de R&D

initiés dans OTPaaS. Préparation de l'étape suivante avec les partenaires Valeo, Schneider Electric et Prosyst à travers le projet Data4Industry-X qui sera coordonné par DAWEX.
Brevets majeurs :
Atos/Bull, Schneider Electric, Valeo, Agileo Automation,

Mydatamodels, DupliPrint, Solem, Tridimeo, Prosyst, Soben, Inria, IMT, CAP'TRONIC à IJCAI). Elle compte déjà des utilisateur-ice-s au sein de l'Université Technique de Dortmund et du Laboratory for AI Verification (LAIV) de l'Université d'Edimbourg.



Etienne Hamelin
Chef de projet

« Intégrer sur véhicule les technologies de trois laboratoires est un vrai défi ; mais quelle fierté de présenter une démonstration qui fonctionne ! »

Calcul et systèmes distribués

Chaîne de perception multi-capteurs embarquée

Dans le cadre du projet CORAM NeVeOS, le CEA/DSCIN a fait la démonstration d'une chaîne de perception distribuée, intégrée dans un véhicule électrique Twizy, dans un scénario de type « Smart Parking ».

Pour se déplacer en toute sûreté dans un parking également équipé de capteurs, le véhicule doit percevoir son environnement, ainsi que réconcilier des données mesurées depuis plusieurs points de vue, et enfin tenir compte de la disponibilité variable du réseau sans-fil. Ces trois défis sont adressés grâce aux technologies de trois laboratoires du DSCIN : LIAE, LIIM et LCYL.

1. Perception et fusion multi-capteurs

Pour détecter les obstacles (notamment les piétons) même dans la pénombre, un pipeline de traitement multi-capteurs (plateforme eMMOTEP/LIAE) a été assemblé. Il exploite simultanément les images de caméras couleur et infrarouge, ainsi qu'un LIDAR multi-nappes, pour créer une carte d'occupation désignant tous les obstacles classifiés autour du véhicule, et prédire leur trajectoire (plateforme SigmaFusion/LIIM).

2. Perception distribuée multi points de vue

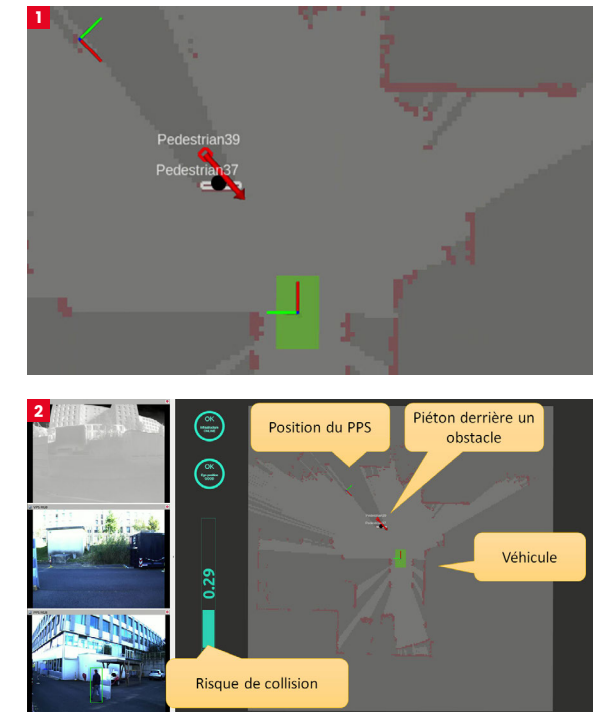
Le parking, également pourvu de capteurs (caméras, LIDAR), calcule une carte des obstacles présents dans le parking : obstacles fixes (murs) et mobiles (piétons, véhicules...). Le véhicule doit réaligner cette carte avec la sienne propre, pour prendre en compte la position du véhicule dans le parking et apparier les obstacles détectés par les deux systèmes.

3. Une conception résiliente aux défauts du réseau sans-fil

Entre le véhicule et le parking, la communication sans-fil (WiFi) est de qualité variable. Pour maintenir un temps de réaction prédictible, un dispositif de monitoring (plateforme Polygraph) mesure en permanence la qualité de communication. En cas de dégradation, ou de déconnexion, le véhicule bascule sur un mode dégradé, à vitesse plus réduite.

4. Intégration

Ce prototype a été intégré sur la Twizy Carnauto du DSCIN ainsi qu'un mât de parking mobile, équipés de calculateurs embarqués Nvidia, et démontré sur le parking extérieur de Nano-Innov à Palaiseau.



1 Détail de visualisation des obstacles et prédiction de trajectoire

2 Aperçu de l'interface embarquée (écran dans le véhicule)

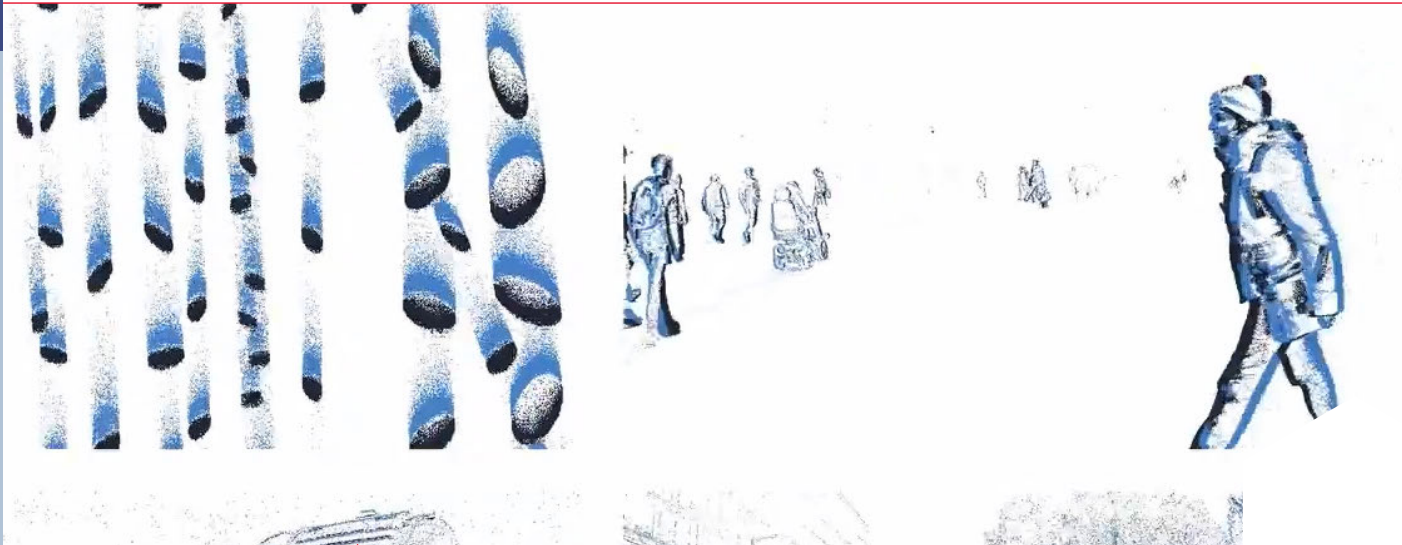
La démonstration NeVeOS a été présentée aux CEA-List Tech Days (6-7 juin 2023), ainsi qu'à la Journée Outils Logiciels & Matériels pour la Recherche sur les Véhicules Terrestres Autonomes (ENS Paris-Saclay, 5 octobre 2023).

RÉFÉRENCES

Cas d'usage :
Projet européen Horizon SELFY : robustesse de la perception multi-capteurs/multi points de vue.

Brevets majeurs :
La démonstration NeVeOS repose sur plusieurs brevets préexistants, notamment « Système de supervision formelle de communications » (Paul

Dubrulle, 2019) et « Procédé itératif d'estimation du mouvement d'un corps matériel par génération d'une grille de mouvement filtrée » (Tiana Rakotovo Andriamahefa, 2021).



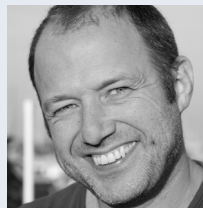
Thomas Mesquida
Ingénieur-chercheur



Thomas Dalgaty
Ingénieur-chercheur



Christoph Posch
CTO
Prophesee



Calcul et systèmes distribués

Graph Convolutional Neural Networks (GCNN) pour capteurs événementiels en imagerie

Les capteurs événementiels captent les changements de luminosité de manière asynchrone, offrant une précision temporelle supérieure. Nous proposons HUGNet, un réseau graph innovant, réduisant la complexité du traitement en temps réel des flux événementiels.

Face au traitement des flux événementiels, nous comparons trois approches : réseaux convolutifs (CNN), impulsions (SNN) et graphiques (GNN). Les réseaux convolutifs introduisent une latence due à la création de frames, tandis que les réseaux impulsions, bien qu'efficaces, ont des performances applicatives limitées. Les réseaux basés sur une structure de graphe maintiennent une haute précision temporelle mais souffraient d'une lourdeur dans la création du graphe, limitant leur application en temps réel.

Nous présentons HUGNet, un réseau graph novateur, dont la logique de création de graphe réduit drastiquement la

complexité, ouvrant la voie au traitement en temps réel des flux événementiels. Appliqué à la prédiction de flux optique, HUGNet affiche des performances comparables aux réseaux convolutifs et surpassant les réseaux graph de l'état de l'art. Une réduction significative de la latence de construction du graphe (4 ordres de grandeur) et du nombre de calculs nécessaires (70 fois) est observée, démontrant l'efficacité de l'approche.

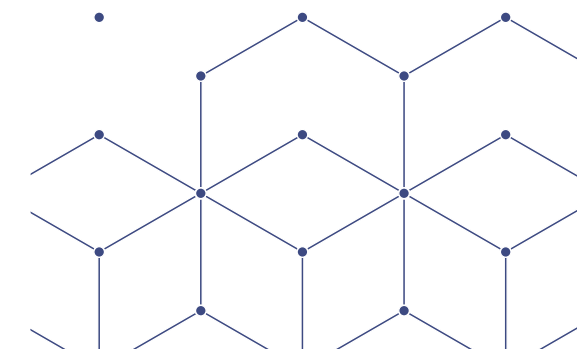
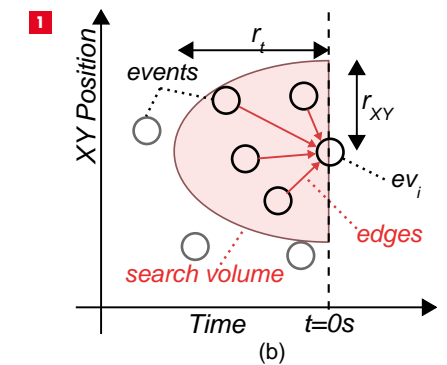
MVSEC Optical Flow	HUGNet	Sparse-GNN	EVFlow	Seqflownet
#Params	↓ 122k	122k		1.3M
Total MAC/s	↓ 15.4G	1078G	138.8G	421.5G
Preparation	Tree-search	Tree-search	Frame	Frame
Optical Flow (AEE)	↓ 1.158	1.164	1.133	1.144
Graph latency	↓ 0.062 ms	707 ms		

HUGNet représente une avancée significative dans le traitement des flux événementiels, rivalisant en performances avec les réseaux convolutifs tout en réalisant une réduction significative de la latence et des charges computationnelles. Nos résultats ouvrent la voie à des applications en temps réel, marquant une avancée majeure dans le domaine.

Les perspectives de notre collaboration avec Prophesee comprennent le développement d'un coprocesseur matériel dédié au traitement de graphes, avec une optimisation algorithme-matériel. À terme, il est visé l'intégration d'une telle fonction dans un imageur 3D Multi couches, pour que ce type de traitement graphe soit réalisé au sein même de l'imageur événementiel, pour offrir un système d'acquisition et de traitement co-optimisé.

1 HUGNet crée des arrêtes servant au partage d'informations entre événements.

2 Capteur événementiel EVK4 HD produit par Prophesee.



RÉFÉRENCES

Cas d'usage :

Cette initiative offre des perspectives prometteuses dans divers cas d'usage, consolidant ainsi son impact tant au niveau national qu'europpéen.

Projet(s)/partenariat(s) majeur(s) :

Cette collaboration s'inscrit dans le cadre du projet «IRT Smart Imager.» En partenariat avec Prophesee, startup spécialisée dans les capteurs événementiels.

Brevet :

Le projet a engendré un brevet sur le traitement asynchrone des graphes événementiels.

Publications majeures :

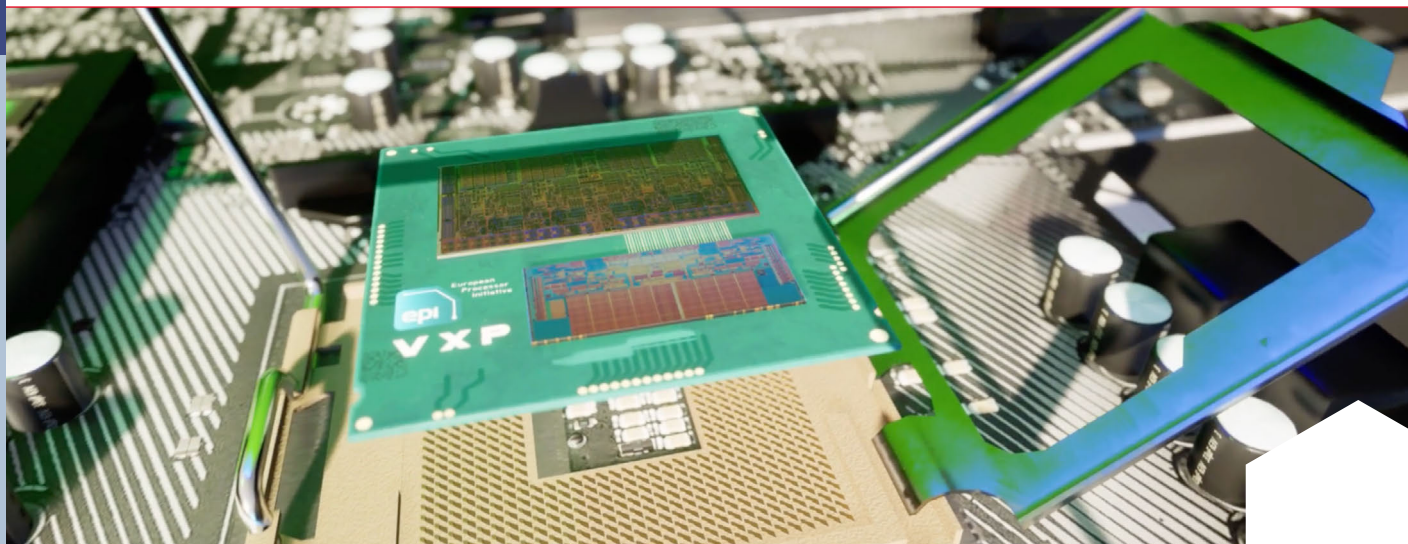
Trois publications détaillent l'approche et l'application du projet au calcul du flux optique et à la lecture sur les lèvres :

1 • Thomas Dalgaty et al., «*The CNN vs. SNN Event-camera Dichotomy and Perspectives For Event-Graph Neural*

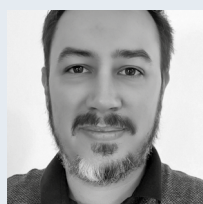
Networks», DATE special session, 2023.

2 • Thomas Dalgaty et al., «*HUGNet: Hemi-Spherical Update Graph Neural Network Applied to Low-Latency Event-Based Optical Flow*», CVPR Workshops, 2023.

3 • Thomas Mesquida et al., «*G2N2: Lightweight Event Stream Classification with GRU Graph Neural Networks*», BMVC, 2023.



Eric Guthmuller
Expert architecte
processeur



César Fuguet
Architecte



Andrea Bocco
Spécialiste
conception
arithmétique



Calcul et systèmes distribués

VxP, le processeur à précision étendue

Le processeur à précision étendue VxP est en premier lieu dédié à la résolution algébrique des modèles de problèmes de physique. Par la précision de ses opérations, il accélère les calculs, voire les rend possibles, et réduit leur consommation énergétique. Il complète de manière transparente les processeurs classiques des nœuds de calcul intensif.

Le calcul pour la physique, la chimie moléculaire, où l'analyse de données massives fait massivement appel à des opérations algébriques : jusqu'à 80% du temps des calculateurs haute performance actuels y est consacré. De plus, l'augmentation de la taille des problèmes traités amplifie l'effet des erreurs d'arrondi dus à l'arithmétique flottante en précision limitée codée sur des formats 32 ou 64 bits. Ceci ralentit fortement, ou souvent empêche les calculs d'aboutir. Pour compenser ce phénomène, les noyaux de calcul font appel à des techniques de pré-conditionnement qui les rendent plus complexes et plus gourmands en mémoire.

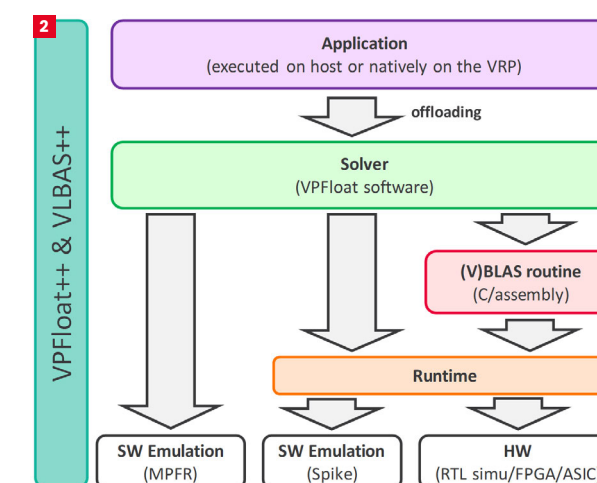
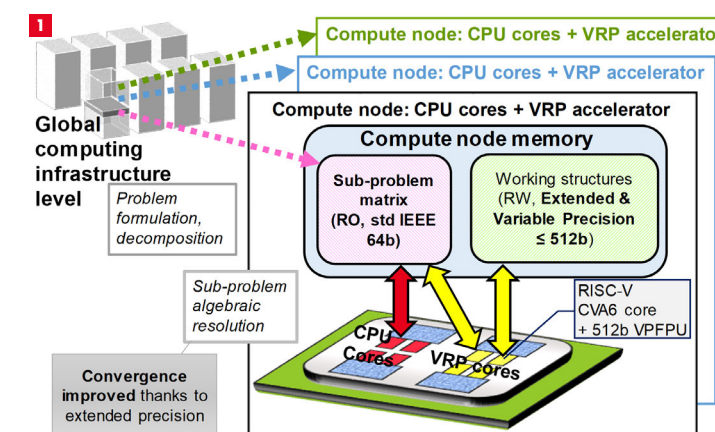
Pour pallier ce problème, l'utilisation de l'arithmétique en précision augmentée réduit l'erreur d'arrondi, ce qui permet d'assurer la convergence des calculs et réduit dans tous les cas le nombre d'itérations nécessaires au calcul d'un facteur 2 à 5. Toutefois, jusqu'à présent, la précision étendue n'était disponible que par émulation logicielle et était trop lente pour les calculs réels.

Le VxP est le premier processeur générique qui supporte en matériel l'arithmétique de précision étendue, jusqu'à 512 bits de mantisse, avec une performance comparable aux opérations en 64 bits (dont 53 de mantisse) des processeurs classiques. Ce processeur supporte le jeu d'instruction classique « RISC V ». De plus, il implémente des instructions spécifiques, dédiées au calcul arithmétique en précision arbitraire, mais également aux transferts en mémoire des nombres flottants en format étendu. Au sein d'un nœud de calcul de supercalculateur, il est destiné à prendre le relais des processeurs génériques en 64 bits lorsque le problème demande de la précision. Comme tous ces processeurs partagent la même mémoire du nœud de calcul et que leurs piles logicielles sont compatibles, le transfert se fait sans copie ni transcodage coûteux des données.

Dans sa version prototype de 2023, le processeur est intégré dans une puce fabriquée en technologie 22FDX de Global Foundries. Le prototype permet déjà d'obtenir un facteur d'accélération de x24, sur des solveurs à l'état de l'art (solveurs itératifs dans l'espace de Krylov), par rapport à une émulation logicielle de la précision étendue.

1 Découpage en sous-problèmes, distribution sur plusieurs nœuds de calcul et partage de la mémoire physique au sein de chaque nœud pour permettre une coopération grain fin avec le processeur hôte.

2 Développement de la chaîne de compilation et bibliothèques bas niveau permettant l'opération efficace à précision étendue et variable sur les structures de données classiques pour les applications visées (matrices/vecteurs).



Applications :

Le VxP est avant tout destiné aux calculs scientifiques : physique computationnelle, chimie moléculaire, calculs de structures, imagerie médicale, modèles de climat, fluide, ... Il s'applique également à l'apprentissage en IA, aux calculs de dynamique des systèmes.

Brevet :

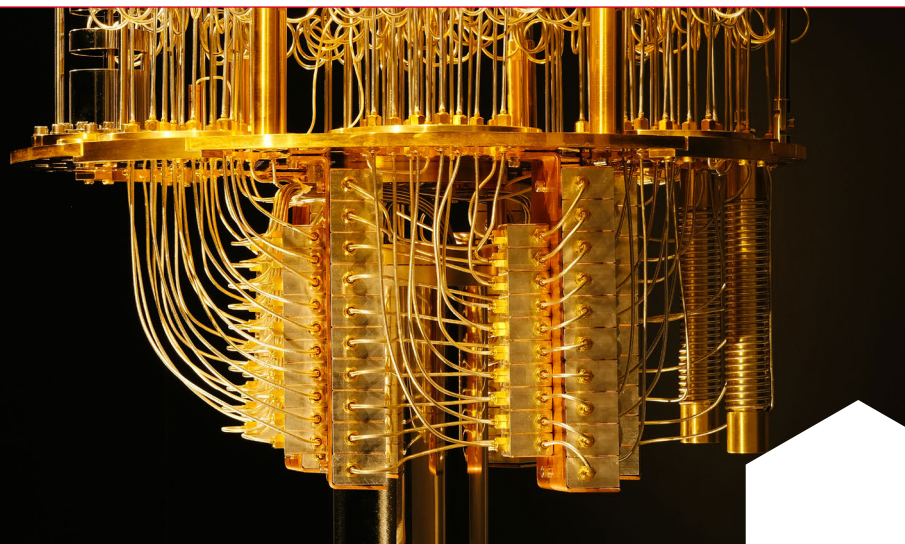
Procédé et dispositif de représentation en virgule flottante avec précision variable.
Publication/Patent Number: FR3093571B1
Publication Date: 2021-03-19

Partenariats majeurs :

La nouvelle génération de l'accélérateur VxP sera intégrée au processeur Rhea, conçu par la startup française SiPearl dans le cadre du projet européen EPI, démarré en novembre 2018. Ce projet regroupe les principaux acteurs européens dans le calcul numérique haute performance avec l'objectif de créer le prochain processeur européen pour le calcul exascale. Le processeur Rhea fera ainsi partie du prochain supercalculateur « Jupyter » au sein du centre de calcul de Jülich à Munich.

Publications majeures :

- A. Hoffmann, Y. Durand, and J. Fereyre, « *Accelerating spectral elements method with extended precision: a case study* », in 12th International Conference on Pure and Applied Mathematics (ICPAM 2023), 2023.
- E. Guthmuller et al., « *Xvpfloat: RISC-V ISA Extension for Variable Extended Precision Floating Point Computation* », in IEEE Transactions on Computers, 2024, doi: 10.1109/TC.2024.3383964



Stéphane Louise
Directeur de recherche



« Avec les récents progrès de l'informatique quantique, on commence à identifier des cas applicatifs concrets que notre équipe évalue méthodiquement, grâce à notre double expertise en calcul classique et quantique. »

Félicien Schopfer
Directeur du Programme Technologies Quantiques LNE



« Face à une certaine surenchère sur les promesses des technologies quantiques, il appartient à la science et à la métrologie de qualifier ces technologies en toute objectivité pour permettre leur adoption avec confiance. C'est l'ambition que nous nourrissons avec le CEA, le CNRS, Thales, Eviden et Teratec en concevant des solutions pour l'évaluation des performances applicatives des calculateurs quantiques dans le cadre du programme MetriQs-France, au travers du projet BACQ. »

Calcul et systèmes distribués

Le List au cœur de la révolution quantique

En s'appuyant sur son socle d'expertise en technologies de l'information, le CEA-List est devenu un acteur majeur de la recherche sur le calcul quantique. L'Institut est ainsi en capacité d'embrasser la complexité système des calculateurs quantique et de proposer ses savoir-faire et technologies au service de leur avènement.

Sur le plan de leur conception, le List a démontré sa capacité à concevoir en étroite collaboration avec le LETI et le CNRS des architectures électroniques de contrôles de qubits à froid comme à chaud.

Sur le plan de leur utilisation, le List développe à la fois des méthodes innovantes de vérification formelle, des solutions de mitigation d'erreur et des approches d'évaluation applicatives, illustrées ici.

De nombreuses métriques sont utilisées pour mesurer les performances des calculateurs quantiques. À titre d'exemple, au niveau des composants élémentaires que sont les qubit on retrouve les métriques liées aux différents taux d'erreur (lecture, porte à 1 qubit, porte à 2 qubits), au temps de cohérence, ou à la connexité. Mais ces métriques peinent à rendre compte de la réelle performance que peut espérer un utilisateur final. C'est tout l'objectif de définir une approche de benchmarking applicatif en mesure de rendre compte de l'adéquation d'un calculateur à un problème donné.

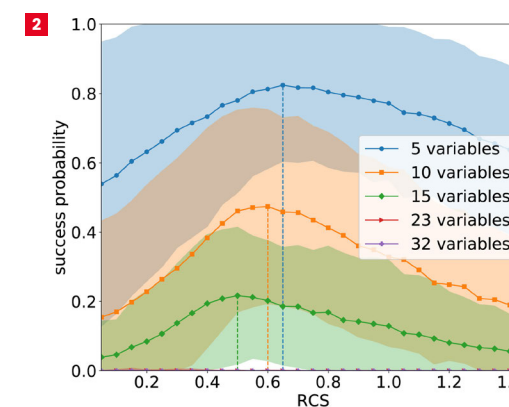
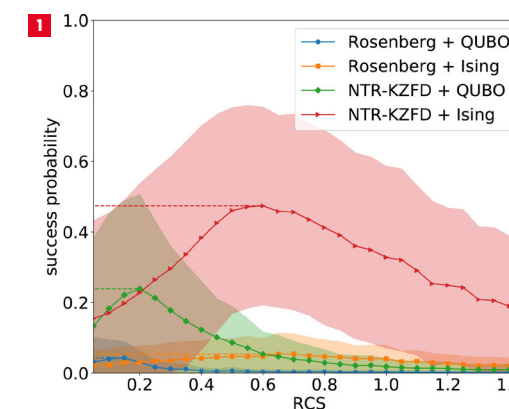
Le CEA-List a ainsi développé une expertise sur l'évaluation conjointe des calculateurs quantiques et des calculateurs classiques pour comparer leurs performances. Les travaux portent sur tous types de calculateurs disponibles, depuis les recuits quantiques, tels que ceux de D-Wave, jusqu'aux qubits supraconducteurs, par exemple d'IBM. En raison des limites actuelles de ces architectures, en particulier sur le taux d'erreur, le List s'est d'abord focalisé sur les problèmes d'optimisation [1,2] avec diverses approches algorithmiques et formulations (QUBO ou HOBQ[3]), avant de maintenant diversifier son expertise.

À titre d'exemple, les travaux synthétisés dans [4] ont visés à évaluer les capacités de calcul quantique pour déterminer une clé de cryptage (attaque à clair connu). Si le chiffrement de Heys utilisé est un exemple jouet, il permet cependant l'étude des approches de programmation de ce problème. Comme illustré en figures 1 et 2, différentes approches de transformations de problèmes ont été explorées pour tirer le meilleur profit du matériel disponible : un recuit quantique sur machine D-Wave Advantage. On montre qu'il est possible d'atteindre des taux de succès acceptable pour un nombre réduit de bits de clé (moins de 30 variables).

Ces résultats montrent qu'en pratique ce type d'attaque n'est toutefois pas à portée du matériel actuel, même dans ce contexte très simplifié : il faudra une avancée significative des processeurs quantiques. La même approche conduite sur calculateurs IBM de petite taille (5 qubits) avec QAOA sur une formulation HOBQ pourtant plus favorable n'a pas permis d'atteindre une performance similaire à D-Wave sur 5 variables. Cela démontre l'importance d'évaluer du point de vue de l'usage réel les calculateurs.

La démarche conduite dans ces travaux de recherche se prolonge naturellement avec l'évaluation de nouvelles architectures quantiques aux propriétés et contraintes différentes grâce à l'initiative HQI porté par GENCI et le CEA.

L'ambition du List est de devenir un acteur majeur du benchmarking en apportant son expertise et sa neutralité scientifique à ce domaine, et d'accompagner les acteurs industriels dans l'identification des bons calculateurs pour leurs besoins métiers. Ils conduiront aussi au développement de bibliothèques de programmation pour différents QPU, qui permettront d'accélérer la prise en main plus aisée de ces moyens de calcul.



1 Success probability of the plaintext attack depending on the Relative Chain Strength (RCS) used for the embedding: impact of the embedding approach

2 Impact of the problem complexity (bottom)

RÉFÉRENCES

Publications majeures :

- 1 • G. Bettonte, V. Gilbert, D. Vert, S. Louise, R. Sirdey, « *Quantum Approaches for WCET-Related Optimization Problems.* » ICCS (4) 2022
- 2 • V. Gilbert, S. Louise, R. Sirdey, « *TAQOS, a Benchmark Protocol*

for Quantum Optimization Systems.

- 3 • V. Gilbert, J. Rodriguez, S. Louise, R. Sirdey, « *Solving Higher Order Binary Optimization Problems on NISQ Devices: Experiments and Limitations.* » ICCS (5) 2023: 224-232

- 4 • S. Louise, R. Sirdey, « *First Attempts at Cryptanalyzing a (Toy) Block Cipher by Means of Quantum Optimization Approaches.* » J. Comput. Sci. 69: 102004 (2023)



INSTRUMENTATION ET USINE DU FUTUR

Le CEA-List développe et transfère des technologies dans le domaine de l'instrumentation et l'usine du futur : capteurs intelligents, traitement automatisé des données, robotique intelligente et interactive, réalité virtuelle et augmentée, interfaces sensorielles, contrôle non destructif, fabrication additive. Ces avancées technologiques contribuent au développement de solutions innovantes pour l'industrie.

Sur la robotique et les machines intelligentes, les travaux s'orientent prioritairement sur le développement de systèmes modulaires et agiles, faciles à programmer, et sur l'amélioration des capacités d'interaction homme-robot et de perception de l'environnement par le robot pour la prise de décision.

Dans le domaine de l'instrumentation, le CEA-List développe des systèmes de mesures intégrant des capacités de traitement et d'exploitation de la donnée de plus en plus avancées. Ces progrès technologiques sont rendus possibles grâce aux algorithmes toujours plus performants pour l'imagerie et le traitement des données utilisés 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.

NOS AVANCÉES 2023

- ▶ **Robothon® 2023**
- ▶ **Robotique d'assistance aux opérateurs pour la manipulation précise de charges lourdes**
- ▶ **La plateforme logicielle CIVA**
- ▶ **Le potentiel de la réflectométrie électrique**



Caroline Vienne
Adjointe
au chef
de service



« Au-delà du challenge, nous intégrons la vision, la simulation, l'orchestration et l'IA pour une robotique plus intuitive et intelligente. Cette convergence de nos savoir-faire c'est précisément l'ambition du Moonshot qui réunit sept laboratoires spécialistes sur les différentes technologies.

Configurer un système robotique sans expertise spécifique, définir facilement et intuitivement une nouvelle tâche, disposer d'une robotique plus agile et plus flexible, tels sont les enjeux pour les métiers et l'industrie du futur, et l'ambition du programme Robotique Intelligente du List, dont le Moonshot est une pierre angulaire. »

Instrumentation et usine du futur

Robothon® 2023 : l'équipe du CEA monte sur le podium

Le CEA a remporté, au salon Automatica, la 3^e place du concours international Robothon® portant sur le recyclage de déchets électroniques. Nos travaux et ce résultat confirment notre niveau d'excellence dans la communauté et concourent au développement d'une robotique plus accessible et adaptable.

Un robot capable de brancher un câble Ethernet, de prendre une mesure avec un multimètre, d'ouvrir une trappe, ou encore d'enrouler un câble,... Des manipulations fines et robustes, le tout, en un temps exceptionnel de 67 secondes ! Voilà ce qu'on peut voir sur la vidéo présentée cette année par le CEA dans le cadre du concours Robothon®, et qui a permis à l'équipe «Oscar» d'être primée.

Concrètement, l'équipe candidate reçoit un boîtier et dispose de quatre semaines pour apprendre à son robot à réaliser l'ensemble des tâches proposées. Pour garantir la robustesse de la solution, la séquence doit être réalisée cinq fois en repositionnant le boîtier toujours différemment. Les mors spécifiquement conçus pour réaliser l'enroulement du câble et la stratégie de glisser le long de ce câble jusqu'à saisir la sonde nous ont permis de réaliser la tâche avec rapidité et robustesse. Une épreuve supplémentaire consistait à utiliser un multimètre pour mesurer une tension dans un cas d'application de notre choix et démontrer la transférabilité

de l'approche («BYOD – Bring Your Own Device»). L'équipe a adressé ce point en proposant un scénario de saisie, mesure et tri de piles usagées, illustrant ainsi le couplage entre perception visuelle (pour localiser les objets, lire l'écran) et saisie robotique, et ce, pour un usage emblématique : le recyclage des déchets électroniques.

La finale se faisait en «live» devant un jury international. L'occasion de tester la capacité d'adaptation du robot, et la flexibilité du code !

Chaque année, le concours Robothon® rassemble davantage de candidats et sponsors ; il offre une visibilité médiatique forte et internationale.

Notre participation à ce concours s'est inscrite dans le cadre de l'un des «Moonshots» lancés par le CEA en février 2022, ces grands projets transverses qui fédèrent plusieurs laboratoires, experts, et nous permettent de nourrir nos stratégies et programmes de recherche.

Et outre de stimuler nos équipes dans un contexte ludique de compétition, ce challenge aide à confirmer notre excellence scientifique et technologique, et s'avère un benchmark particulièrement intéressant pour adresser les enjeux industriels du recyclage, tant en termes d'efficacité opérationnelle que de programmation intuitive du système.

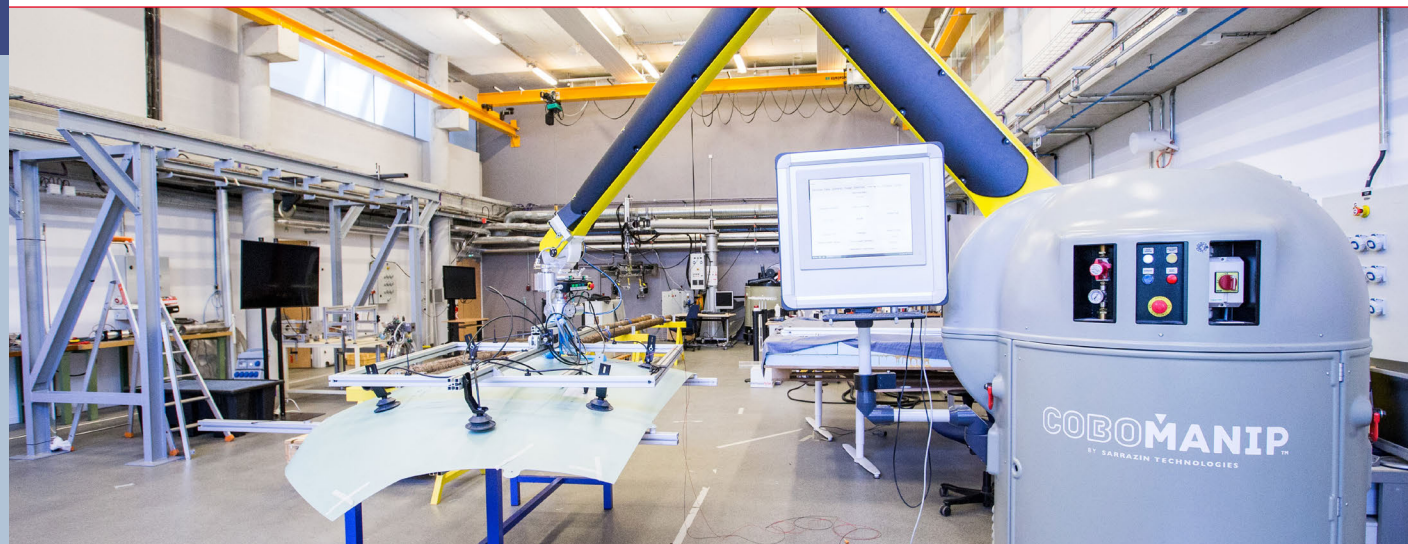
Le défi du Robothon® a ainsi illustré nos travaux de robotique flexible, au cœur du Moonshot «Robot auto-apprenant» et en lien direct avec le programme de Robotique intelligente du CEA-List.

- 1 Réalisation de la tâche d'enroulement du câble sur le boîtier fourni par l'organisation du challenge
- 2 L'équipe OSCAR avec de gauche à droite : Lucas Labarussiat, Boris Meden, Ferreol Gagey et Fabrice Mayran de Chamisso



Challenge Robothon®

Le scénario du challenge consistait à réaliser un ensemble de tâches sur une platine fournie par les organisateurs. Après avoir positionné de manière aléatoire cette platine dans l'espace de travail du robot, le système devait agir en autonomie pour réaliser un ensemble de six tâches : localiser la platine et appuyer sur un bouton, ajuster un curseur sur une position définie aléatoirement, ouvrir une trappe, faire une mesure avec une sonde, enrouler le câble de la sonde et la ranger et enfin appuyer sur un dernier bouton pour clore la séquence.



Olivier David
Chef du projet
Cobomanip

« Le besoin de flexibilité et de précision rend difficile la robotisation de nombreuses tâches dans l'aéronautique ; Cobomanip accompagne la montée en cadence avec une manutention assistée précise et ergonomique. »

Instrumentation et usine du futur

Robotique d'assistance aux opérateurs pour la manipulation précise de charges lourdes

Cobomanip, un système cobotique made in CEA-List, assure une assistance physique aux opérateurs lors de la manipulation très précise de charges importantes dans des environnements complexes.

Issu de 10 années de recherches, Cobomanip est un cobot manipulateur intelligent à 4 degrés de liberté et 125 kg de charge utile. Il apporte une assistance à la manipulation en offrant des fonctionnalités innovantes, telles que l'anticollision active ou les guides virtuels, s'appuyant sur un jumeau numérique de l'environnement. Il permet un positionnement de très haute précision (dixième de millimètre) en assurant compensation de poids, guidage et anticollision, d'une pièce potentiellement très lourde.

Le Cobomanip est conçu sur une structure innovante permettant un équilibrage statique de la charge transportée, qui garantit un degré homogène d'assistance quelle que soit la position et une sécurité d'usage intrinsèque. Des actionneurs électriques à vis à billes et câbles de faible puissance viennent compléter cet équilibrage pour apporter les fonctions d'assistance à la manipulation par l'opérateur.

Enfin le contrôle commande, couplé en temps réel à un jumeau numérique, aide à sécuriser la manipulation en garantissant

l'absence de collision avec l'environnement, et le guidage de la charge manipulée sur des trajectoires virtuelles, programmables directement par le compagnon ou en préparation du poste de travail.

De nombreuses tâches d'assemblage sont réalisées manuellement par les industriels du secteur aéronautique. Elles mobilisent plusieurs personnes et des moyens de levage des bâtiments. Elles induisent des risques HSE et limitent les performances de la production globale. Par ailleurs, les manipulateurs industriels ou des robots collaboratifs avec guidage manuel ne répondent pas correctement au besoin, du fait du manque de transparence et de fluidité, et ne sont pas adoptés par les compagnons.

Une démonstration de faisabilité de manipulation d'un panneau de voilure, à l'aide de Cobomanip, a été réalisée au sein d'une ligne de production d'un constructeur aéronautique partenaire. Trois manipulations représentatives ont été effectuées, par une quinzaine de compagnons. Ils ont restitué de multiples avantages de la technologie, dont :

- sa transparence d'utilisation (un atout unique),
- la réduction effective de pénibilité ; la parfaite compensation de poids et la transparence permettent de manipuler le cobot avec très peu d'efforts et de maîtriser la position et l'orientation des pièces ; leur saisie est simplifiée (suppression de l'élingage),
- le passage de deux à un opérateur, ainsi qu'une indépendance vis-à-vis du pont roulant du bâtiment.

Cobomanip est ainsi une solution cobotique sans équivalent sur le marché des manipulateurs par trois atouts clés :

- 1 - la sécurisation de l'opération et l'amélioration de la qualité (guidage virtuel et anticollision sur modèle),
- 2 - l'augmentation des performances opérationnelles (productivité accrue, par un suivi d'une trajectoire virtuelle, et la haute précision d'assemblage),
- 3 - et une réduction potentielle du nombre d'opérateurs.



Au Salon du Bourget, Kuka Systems et le CEA-List ont officialisé leur partenariat sur cette technologie.

RÉFÉRENCES

Transfert industriel :

Le CEA est engagé dans le développement de cobots performants qui, alliés à d'autres briques technologiques, comme les jumeaux numériques, constituent un vecteur de compétitivité et d'amélioration

de la qualité de vie au travail. Cette nouvelle collaboration avec l'un des principaux acteurs mondiaux de la robotique répond parfaitement à notre ambition de participer au renforcement du tissu industriel français via Kuka Aerospace Systems France.

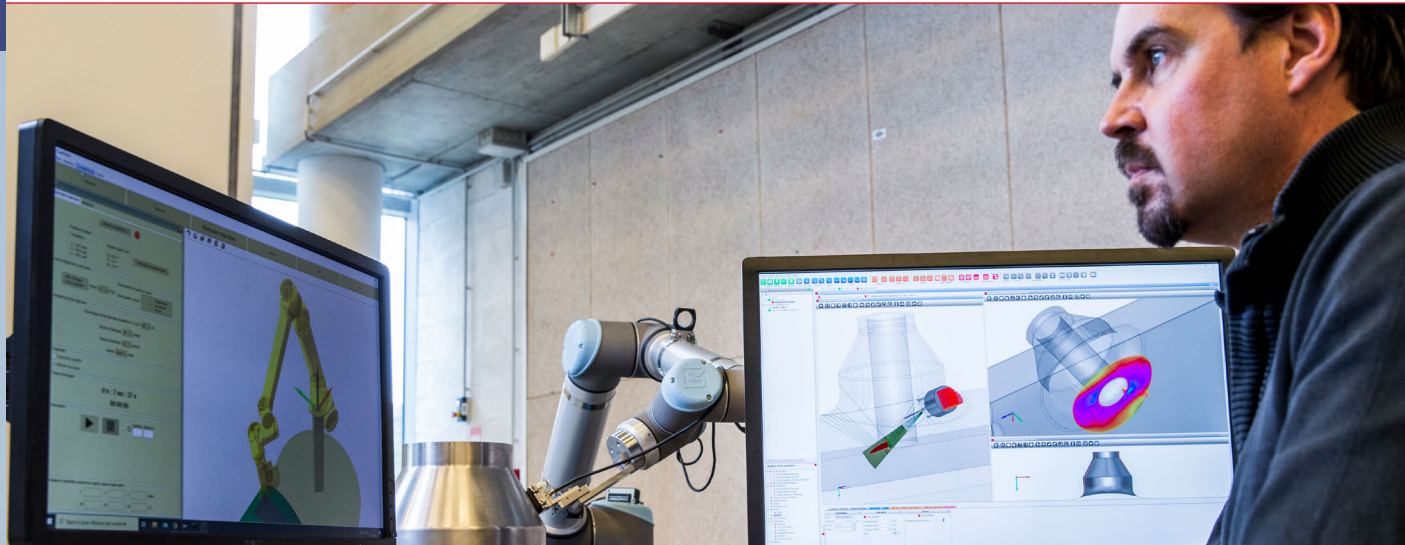
Partenariats majeurs :

À l'occasion du Salon du Bourget, Kuka et le CEA-List ont officialisé leur partenariat autour du manipulateur intelligent de charges Cobomanip.

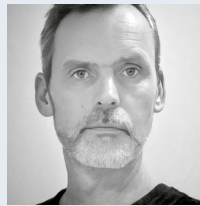


1 Opérateur manipulant une charge à l'aide du Cobomanip

2 Jumeau numérique de l'environnement couplé au contrôle-commande du Cobomanip



Stéphane Le Berre
Chef de projet CIVA



« Le logiciel CIVA est un projet transverse et structurant, avec plus de 25 ingénieurs chercheurs impliqués dans les différents laboratoires du List. »

Roman Fernandez
Directeur général délégué d'EXTENDE



« EXTENDE, distributeur exclusif du logiciel CIVA, est fier de contribuer à la diffusion mondiale de cet outil stratégique pour tous les professionnels du CND. Experts et formateurs en contact direct avec les différents utilisateurs, nous œuvrons à faire l'interface entre les besoins industriels et la R&D du CEA-List. »

Instrumentation et usine du futur

CIVA NDE La plateforme logicielle CIVA

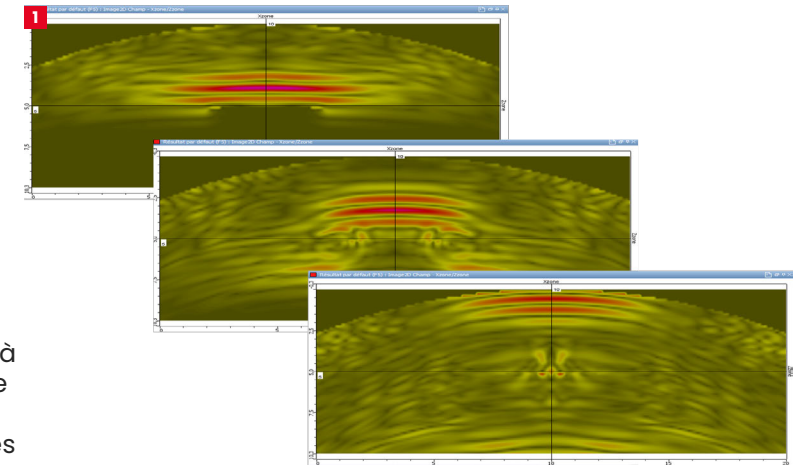
CIVA, plateforme logicielle de simulation et de traitement de la donnée, dédiée au contrôle non destructif, est aujourd'hui leader mondial dans son domaine. CIVA compte plus de 320 comptes clients, répartis dans plus de 40 pays.

Chaque nouvelle version de CIVA intègre les toutes dernières innovations issues de la R&D en instrumentation numérique du CEA-List. L'année 2023 a été marquée par des avancées majeures dans la simulation et l'IA :

- un nouveau module « *Data Science* » (CIVA DS) : destiné à rendre l'IA accessible aux professionnels du CND, et permettant de combiner des données simulées et expérimentales,
- une évolution majeure du module « SHM » (« *Structural Health Monitoring* ») avec des avancées significatives pour la prise en compte de géométries et matériaux complexes et pour l'imagerie,
- un nouveau module « *AUT Pipeline* » spécialement conçu pour le contrôle par ultrasons des soudures de pipelines dans l'industrie pétrochimique.

De plus, en 2023, on peut noter deux résultats majeurs de recherche qui seront capitalisés dans les versions commerciales à venir.

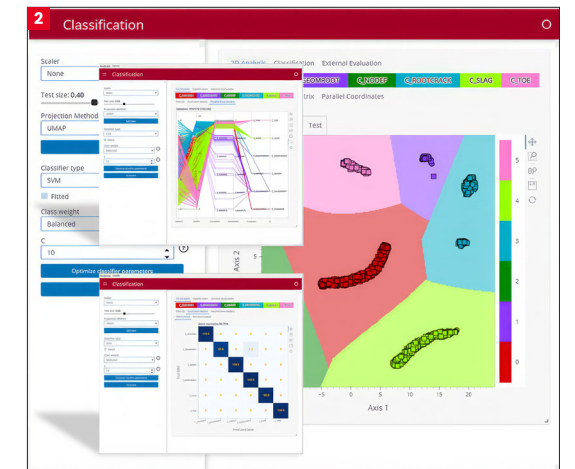
- 1 • Le développement d'approches de modélisation particulièrement innovantes : un nouveau schéma numérique basé sur des conditions de transmission effectives a été développé, permettant d'augmenter le réalisme et la représentativité de la simulation pour le contrôle ultrasons, tout en garantissant des performances et temps de calculs d'une efficacité inégalée dans le domaine.
- 2 • Le développement d'un modèle numérique à l'échelle de la microstructure, permettant de caractériser les phénomènes essentiels liés aux matériaux complexes et de proposer des modèles hybrides optimaux, basés sur un passage à l'échelle micro-macro structure.



Les perspectives à venir sont nombreuses, avec des thématiques porteuses telles que l'usine du futur, le manufacturing 4.0, l'IA, la robotique, la réalité augmentée et le chaînage numérique qui ouvrent la voie à de nouveaux usages de la simulation et de nouveaux défis scientifiques.

1 Simulation par éléments finis de champ ultrasonore sur pièce composite en présence de délaminage

2 CIVA DS : classification de défauts par apprentissage sur données simulées



La dernière version du logiciel, « CIVA 2023 », disponible auprès d'Extende (distributeur exclusif, startup CEA), propose de grandes avancées pour la démonstration de performance par simulation, l'exploitation de l'IA pour le CND, ainsi que de nombreuses améliorations en simulation pour les principales techniques du domaine (Ultrasons, Ondes guidées, Courants de Foucault, Radiographie/Tomographie X, Thermographie).

RÉFÉRENCES

Partenariat majeur :
EXTENDE, startup du CEA aujourd'hui leader mondial pour la simulation des CND.

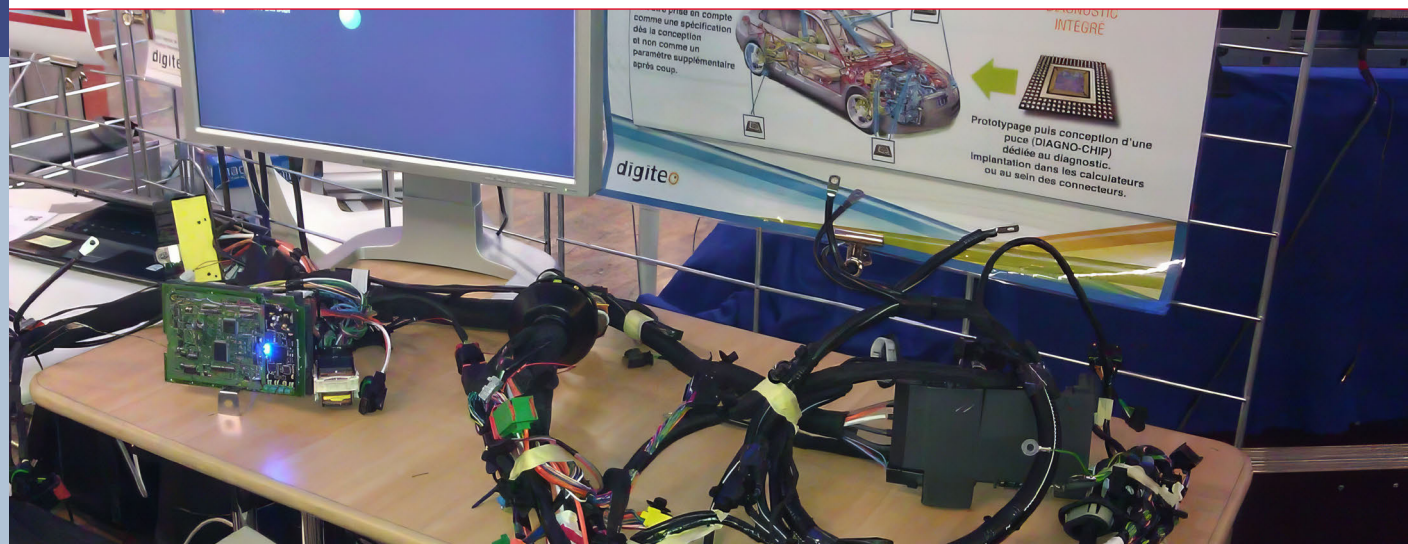
• « *International Journal for Numerical Methods in Engineering* », 2020, A. Imperiale, N. Leymarie, E. Demaldent. »

• « *International Journal for Numerical Methods in Engineering* », 2019, A. Imperiale, E. Demaldent.

Publications majeures :
• « *Numerical modeling of wave propagation in anisotropic viscoelastic laminated materials in transient regime.* »

• « *E.A macro-element strategy based upon spectral finite elements and mortar elements for transient wave propagation modeling.* »

Dernier brevet en date :
FR1873113 : procédé de reconstruction d'une surface tridimensionnelle par un capteur matriciel ultrasonore, E. Iakovleva, D. Roué.



Wafa Ben Hassen
Cheffe de service adjointe
Experte



Instrumentation et usine du futur

Le potentiel de la réflectométrie électrique

Et si la réflectométrie électrique pouvait être appliquée à la détection d'intrusion, au monitoring des systèmes de stockage d'énergie ou à la détection d'incendie ? Grâce à son expertise dans le diagnostic filaire, notre équipe a développé un nouveau système de réflectométrie embarqué, intelligent et bas coût pour répondre aux verrous techniques.

La réflectométrie électrique est une méthode de contrôle non destructif, qui a été largement étudiée par notre équipe, pour le diagnostic des défauts dans les câbles électriques. Elle injecte un signal de sonde dans le système ou milieu sous test et enregistre les échos, créés à chaque discontinuité d'impédance et réfléchis vers le port d'injection. Leur analyse permet de déduire les informations sur cette discontinuité.

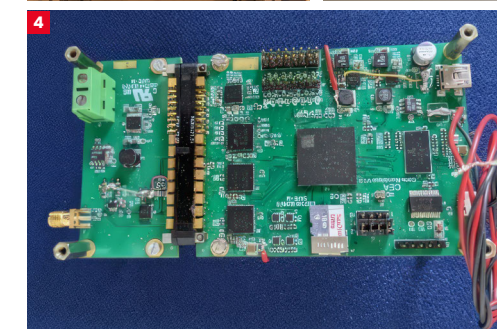
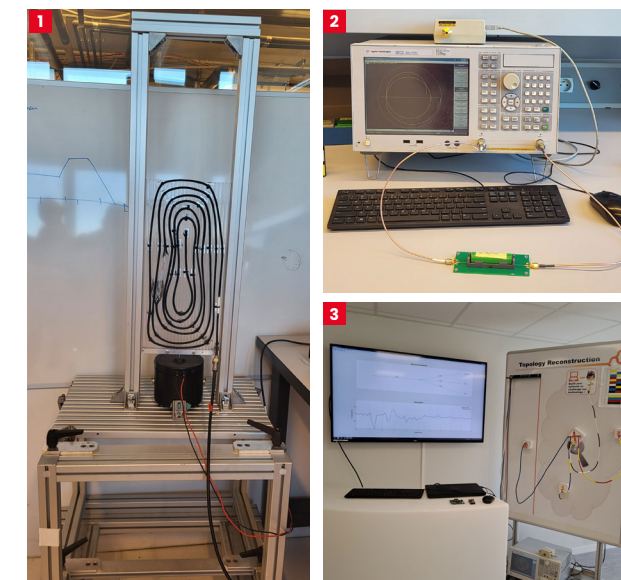
Afin d'assurer un diagnostic en ligne et embarqué, le CEA-List a développé des méthodes de réflectométrie non intrusives telles que : la technologie MCTDR (« Multi-Carrier Time Domain Reflectometry ») et la technologie OMTDR (« Orthogonal Multi-tone Time Domain Reflectometry ») permettant de ne pas interférer avec les signaux natifs du système. Pour accompagner leur transfert industriel, le CEA-List a développé également des cartes électroniques « bas coût » permettant d'effectuer l'ensemble de la chaîne de réflectométrie (injection, acquisition et traitement) dans un temps inférieur à la milliseconde, permettant ainsi de détecter et localiser un arc électrique dans un avion en vol.

Des méthodes de traitement du signal et d'Intelligence Artificielle (IA) ont été développées afin d'améliorer les performances

du système de diagnostic par réflectométrie (précision de localisation, sensibilité), de remonter à un critère de fin de vie du câble (PTC VIPER) et de prédire l'évolution de défauts afin d'estimer la durée de vie résiduelle du système (travaux de thèse en cours) dans la perspective d'une maintenance prédictive. La fiabilité du diagnostic a également été évaluée en présence de contraintes opérationnelles telles que la vibration dans le domaine spatial, en collaboration avec le CNES (figure 1), la température dans le domaine nucléaire, etc.

Fort de son expertise dans le diagnostic filaire, le CEA-List applique la réflectométrie électrique à différents domaines d'application :

- La surveillance de l'état de santé d'une structure : la faisabilité de la réflectométrie a été démontrée pour la surveillance de l'intégrité d'un réservoir hydrogène en collaboration avec Faurecia, acteur principal, dans le domaine automobile.
- La mesure multiniveau par réflectométrie électrique : en 2023, la réflectométrie a été appliquée sur un modèle de puit de forage d'architecture complexe en présence de contraintes opérationnelles sévères (présence de débris) pour la détection de l'interface entre des milieux de permittivité diélectriques différentes et mesure de niveau de l'eau, gaz et d'huile.
- La surveillance de l'état de santé d'un système de stockage d'énergie : en 2023, des travaux de caractérisation et de modélisation de cellules batterie lithium-ion ont été réalisés en haute fréquence couvrant une plage allant de 1 MHz à 300 MHz (figure 2). Ces travaux seront approfondis et combinés à des techniques d'IA dans le cadre d'une thèse de doctorat en 2024, visant à estimer la durée de vie résiduelle d'un pack de batterie.
- La reconstruction de la topologie d'un réseau multibranche pour la détection d'une intrusion physique sur le réseau (vol d'énergie) ou la définition du plan d'un réseau électrique dans un bâtiment : en 2023, un nouvel algorithme basé sur un procédé itératif a été breveté et évalué sur des maisons témoins de la plateforme INCA du LITEN au Bourget-du-Lac (PTC MOCA, figure 3) permettant d'atteindre des reconstructions correctes pour 90% des mesures effectuées et un temps de convergence de moins de 1h contre 24h par rapport à l'état de l'art.
- La détection et localisation de départ d'incendie : en 2023, dans le cadre du projet Secure-HOP financé par la BPI, un prototype bas coût basé sur une nouvelle carte électronique intégrant la chaîne de la réflectométrie OMTDR comprimée (figure 4) et un câble thermosensible. La nouvelle architecture de la chaîne d'émission a donné lieu à un dépôt de brevet. Dans l'aéronautique, la réduction du coût de ce système est estimée à 25% par rapport à un détecteur thermique ou à gaz.
- Le diagnostic de transitions fortuites dans les bobines supraconductrices : mise au point d'un moyen d'observation en temps réel du phénomène de supraconductivité par réflectométrie et développement d'une méthode de détection rapide et de suivi en temps réel de transitions fortuites (quench), brevetée en 2022 dans le cadre du PTC R4QUENCH (avec la DRF).



- 1 Preuve de concept, mesure de réflectométrie sous vibration
- 2 Preuve de concept, surveillance de l'état de santé d'une cellule batterie Lithium-ion
- 3 Preuve de conception, reconstruction de topologie d'un réseau électrique
- 4 Nouvelle carte de réflectométrie : carte mère nommée REFLEX (numérique) et carte fille (analogique) développée en 2023

Transferts industriels :

Certaines technologies de réflectométrie développées par le CEA-List ont fait l'objet de transferts industriels. En effet, la startup WIN MS, créée en 2012 par le CEA-List, exploite la technologie MCTDR dans la maintenance aéronautique et la surveillance de câbles ferroviaires.

Brevets :

Des brevets liés à la reconstruction de la topologie¹ des réseaux et la mesure multiniveau sont exploités dans des collaborations industrielles dans le secteur de l'énergie et du Oil & Gaz. Enfin, le projet Secure-HOP, financé par la BPI, a permis de développer un démonstrateur pour la détection d'incendie basé sur un système de réflectométrie OMTDR embarqué et bas coût.

¹ DD23035, Procédé itératif de reconstruction de la topologie d'un réseau de câbles, 2023



CYBERSÉCURITÉ



La cybermenace est en croissance constante et les moyens des attaquants sont de plus en plus sophistiqués. Dans un monde toujours plus connecté et numérique, la surface d'attaque est énorme et les actions de cybercriminalité vers les particuliers, les entreprises ou les États explosent, à des fins d'espionnage, de sabotage ou purement financières. Les contextes géopolitiques mondiaux accentuent encore ce phénomène et au niveau national, l'arrivée des Jeux Olympiques ajoute à la complexité. La cybersécurité est donc plus que jamais un enjeu majeur.

Dans ce contexte tendu, nos activités en cybersécurité ont plusieurs objectifs :

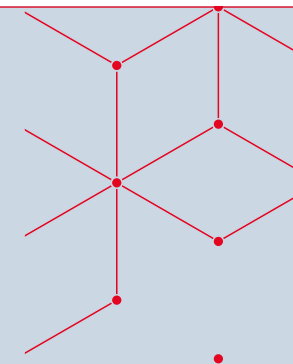
- maintenir nos équipes de recherche à la pointe de l'état de l'art ;
- augmenter la portabilité des briques innovantes développées ;
- augmenter l'automatisation des analyses effectuées par ces différentes briques.

La force du CEA-List est de couvrir tout le spectre de la cybersécurité, que ce soit :

- en amont avec des technologies innovantes pour l'identification de la menace et la protection des systèmes lors des attaques,
- avec des briques innovantes pour la détection et la réponse en temps réel pour toujours augmenter la résilience des systèmes,
- mais aussi en aval pour proposer des solutions pour le recouvrement post-attaque avec des technologies performantes pour l'investigation et l'analyse des systèmes impactés.

Les cinq fonctions de cybersécurité : identifier, protéger, détecter, répondre et restaurer sont ainsi couvertes par les différentes briques technologiques du CEA-List en cybersécurité. Elles s'appliquent à différents niveaux allant du logiciel au matériel, en passant par la protection des données, du réseau et des systèmes numériques dans leur globalité.

Nos deux axes de recherche principaux sont ainsi structurés autour des technologies pour l'évaluation de la sécurité d'une part, et la sécurisation des systèmes numériques d'autre part.



NOS AVANCÉES 2023

► **Prise en compte des modèles d'attaquants actifs dans l'analyse de programmes pour la sécurité**

► **Vers une certification formelle de produits de sécurité**

► **Première mise en œuvre d'une application de chiffrement sur un circuit utilisant le calcul proche mémoire**

L'écosystème

La reconnaissance du CEA-List comme acteur de confiance dans l'écosystème national s'illustre par ses collaborations avec les autorités étatiques du domaine (ANSSI, Ministère des Armées) et ses collaborations industrielles (Thales, IN Groupe, ...) ou académiques (CNRS, Inria, Institut Mines-Télécom, Université Paris-Saclay, Université Grenoble Alpes, Sorbonne Université, Loria...). Son expertise est également reconnue au niveau mondial via ses outils d'évaluation de sécurité, comme les plateformes d'analyses de code et les technologies de sécurisation des systèmes d'information (SI). Ce continuum de compétences, de la recherche au meilleur niveau de l'état de l'art jusqu'à la capacité opérationnelle, nous permet de positionner nos briques technologiques innovantes comme solutions concrètes et performantes aux besoins de nos partenaires.

Les projets structurants

Membre actif de la stratégie nationale pour la cybersécurité, le CEA-List participe à sept des dix projets du PEPR Cybersécurité, pilotant notamment le **projet SecurEval**. Son engagement couvre des sujets allant de la protection des données, la sécurité dans le cloud, la protection contre les programmes malveillants et l'exploitation de vulnérabilité à la supervision et l'orchestration de la sécurité, la sécurité des systèmes embarqués et l'analyse de sécurité des systèmes logiciels. Nos équipes d'ingénieurs-chercheurs en cybersécurité sont également impliqués dans d'autres PEPR, Cloud, Quantique et IA en particulier.

Au niveau européen, nous participons annuellement à une quinzaine de projets de recherche sur ce domaine, avec des partenaires institutionnels et industriels de référence. En 2023, les projets menés ont concerné par exemple la

sécurisation des cartes électroniques, la sécurité des sites d'e-commerce et la protection des données médicales au sein des projets Starlight, SecOpera, Comemov, Alnception, ECCO/ECSO, Safe4Soc et Seffy.

Les technologies pour l'évaluation de la sécurité

Notre objectif premier est d'identifier les vulnérabilités afin de les éradiquer au plus tôt, dès la phase de conception, mais aussi dans des produits déjà finalisés.

Pour la caractérisation des logiciels, nous nous appuyons sur notre expertise en techniques de vérification logicielle par méthodes formelles et tests automatisés. Parmi nos outils emblématiques, citons Framac-C, plateforme open source pour l'analyse formelle des codes sources et la preuve de propriétés de sécurité (confidentialité et intégrité des données) et BINSEC, son pendant pour les codes binaires, tous deux mis en œuvre dans les projets du PEPR Cybersécurité.

Au niveau des logiciels, l'augmentation continue de leur taille et l'utilisation de nouveaux langages nécessitent de pouvoir analyser des codes développés en d'autres langages que le C et le C++, mais aussi des systèmes en multi-langages ou langage mixte. Cette évolution vers le traitement multi-langages ou langage mixte est un axe amont amorcé pour Framac-C dans le cadre du projet SecurEval.

Côté investigation numérique, nous pouvons citer l'outil ADVIZ-ML, qui embarque des briques de machine learning. Il contribue au projet SuperViz du PEPR Cybersécurité pour offrir une solution efficace aux opérateurs de SoC face à la complexité des données et des systèmes SI impactés par les attaques.

Pour rester à l'état de l'art et concevoir des outils

toujours plus performants, nous intégrons les nouvelles technologies de l'IA et du quantique. Et pour répondre à l'augmentation des exigences en cybersécurité (notamment « Cyber Resilience Act » européen) et à la pénurie des compétences et expertises, nous nous positionnons sur l'automatisation – voire l'autonomisation – des analyses.

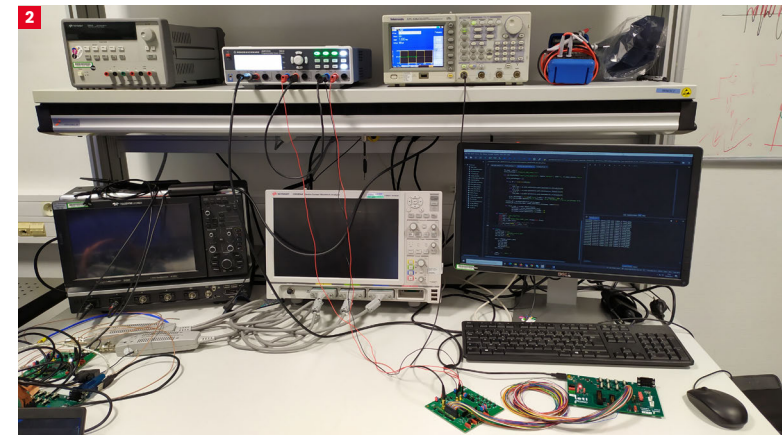
L'année 2023 a ainsi été marquée par deux avancées majeures sur ces points, comme l'utilisation de l'apprentissage machine symbolique pour la rétro-ingénierie de programmes (figure 1) mais aussi la prise en compte de nouveaux modèles d'attaquants (actifs) dans l'analyse d'application binaire. Ces avancées ont donné lieu à des publications scientifiques dans des conférences de référence¹.

Notre second objectif est d'aider les experts à répondre à la complexité croissante des SI et des menaces. À cet effet, nous menons des recherches sur la conception d'une chaîne outillée pour l'évaluation automatisée des logiciels visant une application large-échelle, avec une forte automatisation, tout en gardant la précision comme enjeu central. Nous développons également des composants d'analyse à base d'IA pour rendre plus efficaces nos briques technologiques, améliorer l'automatisation et prendre en compte la variété des systèmes adressés, en termes de volume et de complexité.

Les technologies de sécurisation

L'idée est de créer des îlots de confiance capables de résister aux attaques connues ou en cours d'apparition (IA, quantique) et d'être plus résilients aux nouvelles attaques. Pour renforcer la sécurisation des SI face aux attaques toujours plus étendues et précises, nos recherches s'orientent autour des sujets suivants :

- l'architecture RISC-V de composants et systèmes embarqués,
- l'outil de compilation COGITO ajoutant des contremesures de sécurité,
- l'implantation matérielle et logicielle sécurisée de primitives de cryptographies avancées (chiffrement homomorphe,



cryptographie post-quantique, communication quantique) avec les outils VASCO, CINGULATA...

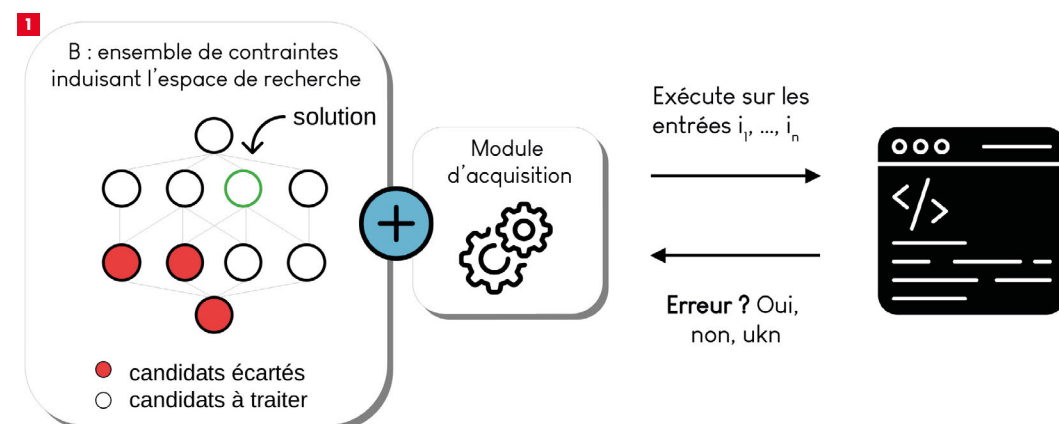
- les technologies de confiance décentralisée comme la blockchain, l'IA distribuée),
- l'environnement MAX d'expérimentation des applications de blockchain.

Pour la résilience des SI, nous menons des recherches sur la construction de systèmes capables de détecter les cyberattaques et d'y répondre en temps réel. Sigmoid-IDS, solution logicielle de sécurité cognitive des réseaux, propose ainsi des composants intelligents de détection des attaques sur les communications et de réponse instantanée par la mise en œuvre de contre-mesures de sécurité sur les réseaux. Son approche brevetée basée sur des primitives d'IA apporte une excellente précision avec un très faible taux de faux positifs.

Enfin, nous travaillons à la création de briques innovantes pour la protection de la vie privée et des données dans leur globalité. En 2023, nous avons notamment amélioré le chiffrement de données homomorphe AES d'un facteur 10 par rapport à l'état de l'art international, mais aussi mis en œuvre la première application de chiffrement sur un circuit utilisant le calcul proche mémoire C-SRAM (figure 2). Ces avancées ouvrent des perspectives majeures en termes de sécurité pour l'accélération des calculs post-quantiques.

1 PreCA – Utilisation de machine learning symbolique pour l'analyse de code

2 Environnement de test/ caractérisation de la C-SRAM



Publications majeures :

• Menguy, G., Bardin, S., Lazaar, N., & Gotlieb, « A. Automated Program Analysis: Revisiting Precondition Inference through Constraint Acquisition », IJCAIECAI' 22

• Ducouso, S., Bardin, S., Potet, M.L. « Adversarial Reachability for Program-level Analysis », ESOP 2023

• « A Homomorphic AES Evaluation in Less than 30 Seconds by Means of TFHE », Sirdey & Al, WAHC 2023



Soline Ducouso
Docteur



Sébastien Bardin
CEA Fellow
PEPR
Cybersecrurité
Projet SecurEval

Cybersécurité

Prise en compte des modèles d'attaquants actifs dans l'analyse de programmes pour la sécurité

Le CEA-List, avec l'Université Grenoble Alpes, a conçu la première technique d'analyse de sécurité des logiciels simulant un attaquant puissant et passant à l'échelle. Son implantation dans BINSEC, outil du CEA-List, a été validée sur un composant de sécurité de l'ANSSI.

Les méthodes actuelles d'analyse de programmes pour la sécurité simulent des attaquants faibles, seulement capables de fournir aux programmes des données malicieuses. Un attaquant puissant accède à d'autres vecteurs d'attaque tels que :

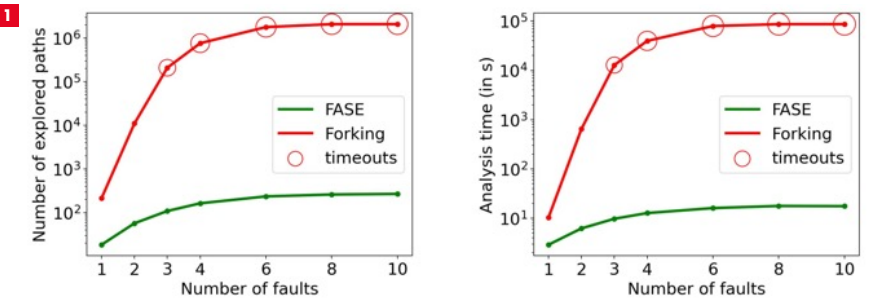
- les attaques physiques par injection de fautes qui perturbent l'environnement du programme, développées initialement dans le cadre d'attaques contre des composants de haute sécurité (carte à puce),
- mais aussi, les attaques par injection de fautes induites par le logiciel (ex. : rowHammer) ou exploitant des mécanismes micro-architecturaux dans le processeur, deux vecteurs d'at-

taque dont le contexte d'application est bien plus large.

La notion usuelle d'atteignabilité (la recherche dans le programme d'un chemin qui atteint un certain état du système) ne permet pas de représenter cet attaquant puissant. Notre premier défi est de concevoir un environnement pour raisonner automatiquement et efficacement sur l'impact d'un attaquant puissant sur un programme. Notre second défi est de concevoir un algorithme efficace pour déterminer la vulnérabilité d'un programme à un modèle d'attaquant donné, sans explosion combinatoire, en particulier en cas d'attaques multiples. Les techniques existantes ne passent pas à l'échelle et ne fournissent pas de formalisation du problème sous-jacent.

Nous proposons un algorithme original, l'Exécution Symbolique Adversariale (ASE), étendant l'exécution symbolique (utilisée pour l'analyse de code standard) et la notion d'atteignabilité usuelle pour permettre l'analyse des chemins d'exécution d'un programme en présence d'un attaquant puissant. L'explosion combinatoire est évitée grâce à une nouvelle technique d'injection de vulnérabilités dite « Forkless », sans créer de chemin supplémentaire à explorer, contrairement aux techniques de l'état de l'art. Nous avons implémenté cet algorithme dans la plateforme BINSEC, sous la forme d'un outil appelé BINSEC/ASE.

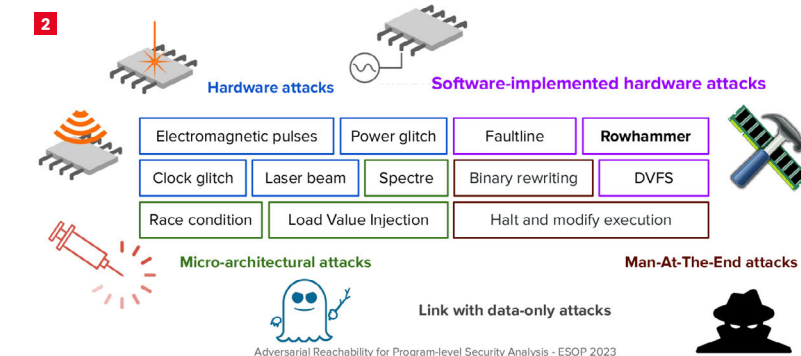
Les expérimentations faites avec BINSEC ont montré un gain important en performance, en termes de temps d'analyse et de nombre de chemins explorés.



➔ Forking explodes in explored paths while FASE* doesn't
➔ Translates to improved analysis time overall

*FASE: Forkless Adversarial Symbolic Execution

- 1 Experimental Evaluation – Path explosion
- 2 Fault injection attacks everywhere



RÉFÉRENCES

Cas d'usage, application, transfert : Plusieurs industriels et CESTI se sont montrés intéressés par l'approche.

Publication majeure : Ces travaux ont donné lieu à un article, Ducouso, S., Bardin, S., Potet, M.L., « *Adversarial Reachability for Program-level Analysis* », ESOP 2023, dans l'une

des principales conférences internationales de méthodes formelles pour l'analyse de programme (ESOP, rang A). Nous avons participé à plusieurs présentations invitées.



Loïc Correnson
Expert Sénior
Méthodes formelles

« Pour assurer la sécurité d'un logiciel, l'œil de l'expert ne suffit plus, il faut une preuve vérifiée par une machine ! »

Cybersécurité

Vers une certification formelle de produits de sécurité

En matière de cybersécurité, la certification des produits de sécurité comme les cartes à puces est un passage obligatoire. La certification des critères communs, reconnue au niveau international, donne les meilleures garanties en termes de sécurité allant jusqu'à l'utilisation de preuves formelles. Une collaboration avec Thales nous a permis de concevoir des méthodes innovantes permettant d'atteindre les plus hauts niveaux de certification.

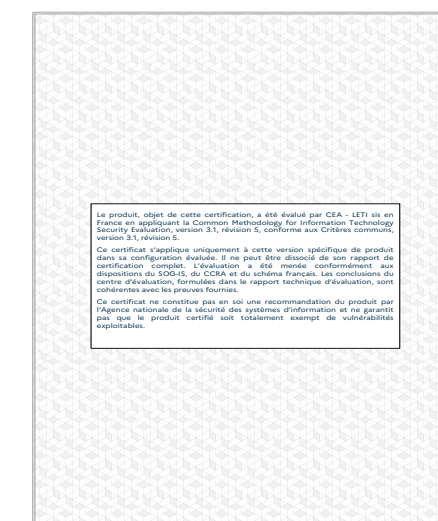
Thales nous a sollicités en vue de la certification d'une de ses cartes à puces, produits pour lesquels les exigences en cybersécurité sont particulièrement élevées. Il s'agissait de prouver formellement la sécurité d'un OS JavaCard embarqué sur une carte à puce. Les mécanismes de protections mis en œuvre pour parvenir à cette sécurité sont différents dans chaque cas, et sont des secrets industriels bien gardés.

La mise en œuvre d'outils de modélisation et de preuve formelle, comme Frama-C du CEA-List, Coq ou l'Atelier B, est difficile : la taille des logiciels étudiés, des modèles formels et leurs preuves se mesure en dizaines de milliers de lignes de code. Pour réussir ce passage à l'échelle, nous avons imaginé de nouvelles méthodes pour faciliter le travail des ingénieurs de

sécurité, et développé de nouvelles briques technologiques pour automatiser le travail de preuve et de validation. L'outil Frama-C a ainsi reçu des extensions pour décliner de manière systématique et automatique des propriétés formelles de haut niveau sur chaque ligne de code, amenant à la réalisation de dizaines de milliers de preuves unitaires.

Ces avancées ont porté leurs fruits puisque cette collaboration a permis à Thales d'obtenir un certificat Critères Communs de niveau EAL 7 – après avoir atteint le critère EAL6 en 2022 – les plus rigoureux en matière d'exigences et de preuve formelle de sécurité.

Cette expertise méthodologique dans le domaine de la certification à haut niveau d'exigence en cybersécurité ouvre la voie à de nouveaux partenariats avec des industriels à la pointe du domaine. Les défis relevés se matérialisent par des évolutions scientifiques et techniques qui enrichissent nos plateformes au bénéfice de nombreux autres domaines d'applications.



1 Certificat Thales.

RÉFÉRENCES

Cas d'usage :
Thales : Certificat Critères Communs EAL 7.
Frama-C : une plateforme développée au CEA-List pour

l'analyse de code et la preuve formelle de propriétés de sûreté et de sécurité.
Coq : plateforme développée à Inria et utilisée notamment

dans la plateforme Frama-C pour la vérification formelle et automatisée d'énoncés et de preuves mathématiques.



Maria Ramirez-Corrales
Ingénieure-chercheuse,
Experte



Cybersécurité

Première mise en œuvre d'une application de chiffrement sur un circuit utilisant le calcul proche mémoire

L'un des enjeux en matière de cybersécurité est le maintien de la confidentialité des données traitées dans les circuits intégrés. L'échange de données entre le processeur et les mémoires par le bus d'interconnexion entraîne des fuites d'information exploitables via des techniques d'attaque par canaux auxiliaires. Le calcul proche mémoire a l'avantage de cloisonner le traitement des données en un seul endroit et de limiter les échanges de données avec le processeur central.

Les travaux réalisés visent à exploiter la confidentialité du calcul proche mémoire dans le cadre d'opérations de chiffrement de données. Une IP C-SRAM (Computational SRAM) a été implémentée puis intégrée dans un système embarqué sur cible ASIC, circuit VASCO-2, (cf. figure 1). Ce système combine un cœur RISC-V 32-bits ainsi que ses mémoires à cet accé-

lérateur matériel C-SRAM permettant à la fois le stockage de données et la réalisation de calculs en son sein.

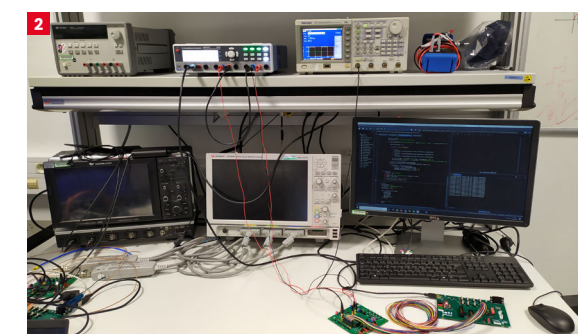
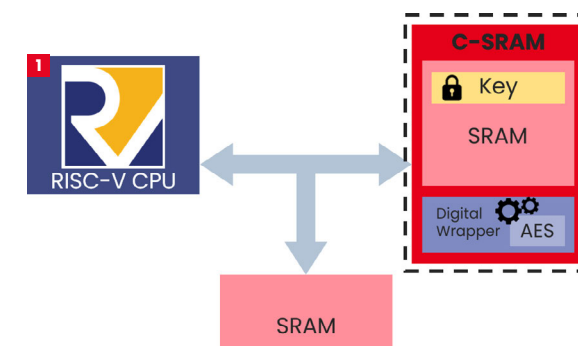
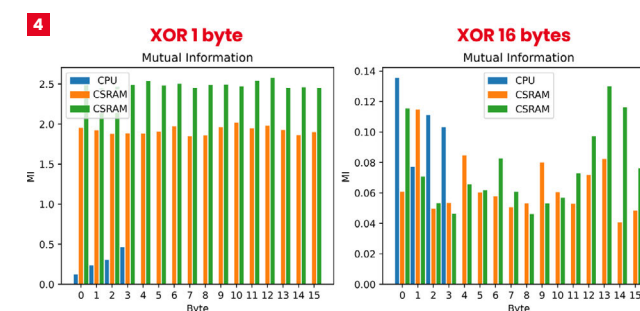
L'algorithme de chiffrement AES a été porté en utilisant le calcul proche mémoire de la C-SRAM. Cette version accélérée matériellement peut ainsi être comparée à une version purement logicielle exécutée par le cœur RISC-V. Par ailleurs, la C-SRAM intègre une fonctionnalité de génération de clés secrètes « *in-situ* » (basée sur la technologie PUF).

Un ASIC a été fondu en 2022 en technologie 22nm FD-SOI de GlobalFoundries. Ce circuit et la carte de test associée ont permis de vérifier le fonctionnement de l'IP C-SRAM et de réaliser des mesures précises sur silicium (grâce à l'implémentation de grilles d'alimentation séparées pour les régions matrice/périphérique/logique de la C-SRAM) :

- test unitaire des fonctions du circuit pendant trois mois,
- exécution d'une application AES sur RISC-V avec accélération C-SRAM,
- caractérisation énergétique de la C-SRAM en tension/température de chaque opérateur : arithmétique, logique, accès mémoires lecture/écriture (cf. figures 2 et 3),
- Identification de nouvelles instructions permettant d'améliorer les performances.

L'analyse de l'information mutuelle d'un calcul parallélisé 128 bits sur C-SRAM ouvre des perspectives en termes de sécurité, notamment pour l'accélération de la PQC sur C-SRAM (figure 4).

Le parallélisme offert par la C-SRAM, peut être exploité pour effectivement réduire les fuites de l'architecture. La diminution des fuites due à la réduction de transfert des données dans le bus d'interconnexion sera évaluée expérimentalement dans des travaux futurs.



Op	Energie/bit (pJ)	Op	Energie/bit (pJ)
nop	0,25	not	2,71
read	1,81	and	3,12
write	2,26	or	3,32
copy	2,72	xor	3,16
hswap	2,69	nand	3,31
bcast	2,83	nor	3,06
slli	2,54	xnor	3,25
srli	2,5	add	2,96
mulhi	2,93	sub	2,9
mullo	2,88	abs	2,46
maclo	2,8		

1 Micro-architecture circuit VASCO-2

2 Environnement de test

3 Mesures VASCO-2 (technologie GF 22nm FDSOI 0,8V 25°C)

4 Comparaison de l'information mutuelle d'un XOR CPU vs C-SRAM

RÉFÉRENCES

Cas d'usage :
Algorithmes cryptographiques pré et post quantiques
Génération de clés secrètes et d'identifiants - PUF (Physically Unclonable Function)

Projet majeur :
Inflexion Cybersécurité (CEA-List et Leti)



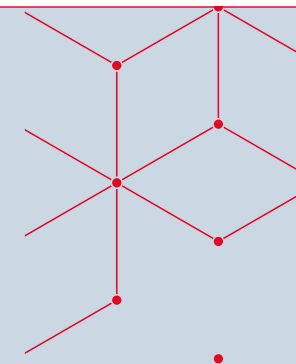
SANTÉ NUMÉRIQUE



L'innovation numérique transforme profondément le monde de la santé, révolutionnant la manière dont les soins sont dispensés et améliorant l'efficacité des systèmes de santé à grande échelle. En intégrant les avancées technologiques de l'intelligence artificielle, la robotique, la télémédecine, les applications mobiles et les dispositifs connectés, la santé numérique offre des solutions novatrices pour relever des défis de nature sociétaux.

Vieillesse de la population et augmentation des maladies chroniques, amélioration de la prise en charge du patient avec une meilleure prévention et un diagnostic précoce, crise du système de santé, autant d'enjeux auxquels les technologies numériques apportent des solutions concrètes et structurantes.

Elles facilitent l'accès aux soins, permettent une surveillance en temps réel des patients, favorisent la prévention des maladies et renforcent la personnalisation des traitements. L'utilisation de données massives contribue également à une prise de décision plus éclairée et à des diagnostics plus précoces. Intimement liée à la vie privée des citoyens, l'innovation numérique en santé soulève naturellement des questions éthiques, liées à la confidentialité des données et à la sécurité. Grâce à nos recherches, depuis toujours centrées sur l'humain, nous contribuons à une approche plus holistique et responsable des soins aux côtés des professionnels de la santé.



NOS AVANCÉES 2023

- ▶ **Les outils de TAL pour aider à répondre à des questions de faisabilité d'études cliniques**
- ▶ **Logiciel d'évaluation personnalisée des doses d'imagerie par rayons X**

Les exigences de la santé numérique

UNE CIRCULATION MAÎTRISÉE DES DONNÉES

Les technologies numériques permettent de développer la collecte, la circulation, l'accès, l'exploitation et la valorisation de données. L'un des enjeux du déploiement de la santé numérique est l'accès à des données de qualité et à leur circulation maîtrisée dans un contexte réglementaire contraint. Nous développons des solutions destinées à pallier cette difficulté et faciliter le partage des données médicales pour améliorer à la fois la recherche scientifique et la prise en charge des patients, tout en assurant une protection optimale et sécurisée de ces données confidentielles. Nous les mettons en œuvre au sein des projets SSL-ML-DH du PEPR santé numérique et des projets européens Katy, Kinaitics et Encrypt, avec un objectif commun : proposer des solutions innovantes basées sur l'apprentissage fédéré couplé à la méthode de cryptographie et calcul homomorphe.

DES DISPOSITIFS MÉDICAUX FIABLES

La fiabilité, la sûreté et la sécurité des dispositifs médicaux logiciels sont une exigence dans le domaine de la santé. Nous contribuons au projet européen MedSecurance dont l'objectif est de développer de nouvelles technologies pour traiter les challenges de cybersécurité et de sûreté des dispositifs médicaux connectés (*Internet of Medical Things*). Dans ce projet, nous apportons nos compétences et nos plateformes technologiques pour la modélisation des réseaux de dispositifs médicaux, la spécification des propriétés de sécurité à vérifier ainsi que leur vérification formelle. Le cadre technologique développé est conforme au standard FIHR pour permettre son interopérabilité avec l'écosystème médical. Au-delà de la problématique de sûreté et sécurité à la conception, nous travaillons sur l'amélioration des méthodes de certification de dispositifs médicaux contenant des composants logiciels basée sur de l'intelligence artificielle. Un des principaux freins à la certification de ces dispositifs est le manque de données représentatives nécessaires à leurs vérifications. Dans le cadre du projet INSAFEDARE, un consortium, coordonné par le CEA, explore l'utilisation de données synthétiques (en supplément des données réelles) pour l'amélioration du processus de certification de ces dispositifs.

Des nouveaux biocapteurs pour la prévention, l'aide au diagnostic et le suivi des patients

En 2023, plusieurs projets ambitieux impliquant nos systèmes de capteurs pour la recherche de biomarqueurs ont été lancés. Cette dynamique renforce notre positionnement en tant qu'acteur de l'instrumentation pour la santé et notre capacité à développer des systèmes complets, du biocapteur à la fourniture de l'analyse. La première technologie mise en œuvre s'appuie sur l'analyse électrochimique utilisant des électrodes diamant. Ces recherches sont développées dans le cadre du projet mené avec la start-up Usense et vise la recherche de biomarqueurs dans les urines. Plusieurs projets sont également en cours avec la Direction de la recherche fondamentale du CEA pour développer des biocapteurs sur fibres optiques capables de réaliser des analyses moléculaires *in situ*, en temps réel et sans marquage. Le développement de tels tests de diagnostic sensibles, quantitatifs, multiplexés et pouvant être déployés rapidement à une échelle globale, est un enjeu majeur dans la lutte contre la propagation de maladies infectieuses.

Un nouveau logiciel pour l'aide à la thérapie

Nous nous investissons depuis de nombreuses années dans les domaines de l'imagerie et de la radiothérapie. Nos compétences en simulation par la méthode Monte-Carlo, couplée aux capacités expérimentales de notre plateforme DOSEO, nous ont permis de développer des outils de simulation des doses en imagerie, pour le diagnostic aussi bien que pour le positionnement en radiothérapie.

IDMS, LOGICIEL DE CALCUL PERSONNALISÉ DE LA DOSIMÉTRIE 3D POUR L'IMAGERIE

Face à l'enjeu majeur de réduction des doses délivrées aux patients dans le domaine de l'imagerie kV (scanner diagnostique et imagerie embarquée), un logiciel complet basé sur la méthode de calcul Monte-Carlo a été développé pour l'estimation personnalisée des doses délivrées au patient. Ce logiciel permet d'automatiser les étapes du paramétrage du code Monte-Carlo et fournit une cartographie de dose 3D du patient. Il a été testé par quatre centres cliniques et est en cours de transfert vers OptiRX.

Au cours de l'année 2023, nous avons ainsi procédé à l'évaluation en milieu clinique du logiciel développé, IDMS.

Proposer des outils pour l'aide au handicap et le mieux vivre

Les chercheurs du List mènent des recherches sur les dispositifs d'aide au handicap, qu'il soit visuel, auditif ou moteur, majoritairement dans le cadre de projets européens, dont certains sont coordonnés par le List, comme par exemple le projet ABILITY, qui vise le développement d'une tablette haptique pour rendre les contenus numériques accessibles aux personnes malvoyantes, OASEES pour le développement et les tests d'un capteur intelligent porté pour analyser les caractéristiques acoustiques de la parole chez les patients souffrant de la maladie de Parkinson, AiBLE, qui a donné son nom à un exosquelette robotisé pour la rééducation des membres supérieurs. L'expertise développée au fil de ces développements nous permettra de répondre de façon pertinente à deux nouveaux grands défis lancés dans le cadre de France 2030 : ceux du numérique pour le bien vieillir et la santé mentale.

Innovation organisationnelle

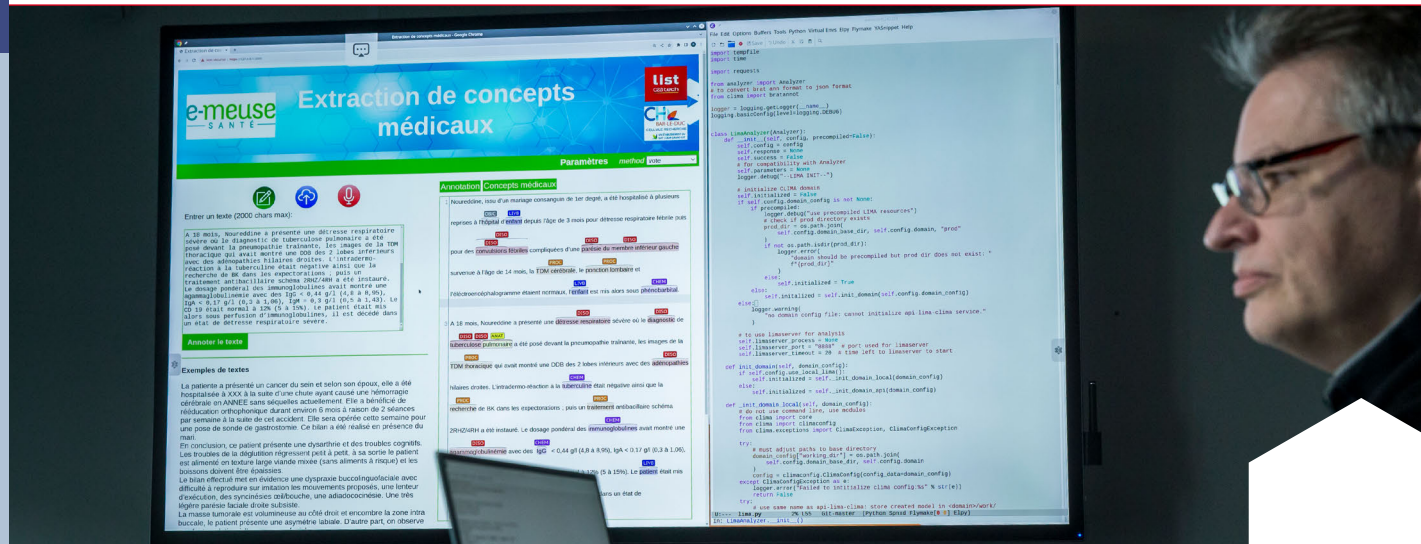
Au-delà des outils d'assistance physique ou cognitive aux patients, le numérique a investi ces dernières années un nouveau champ, celui de l'optimisation du fonctionnement des hôpitaux, et plus généralement des systèmes complexes sur lesquels s'appuie notre système de santé. Face à la sophistication accrue des technologies médicales, les coûts associés et le manque de ressources humaines pour mener à bien les tâches de santé, nous apportons des solutions responsables et scalables : dispositifs intelligents pour l'assistance au diagnostic, aux actes médicaux et chirurgicaux ou pour la réduction de la charge administrative des personnels soignants en sont quelques exemples. Ainsi, au sein du projet CARNOPITAL mené en partenariat avec l'hôpital Foch de Suresnes, nous développons un jumeau numérique organisationnel pour formaliser le fonctionnement d'activités hospitalières régi par des processus complexes et contraints.



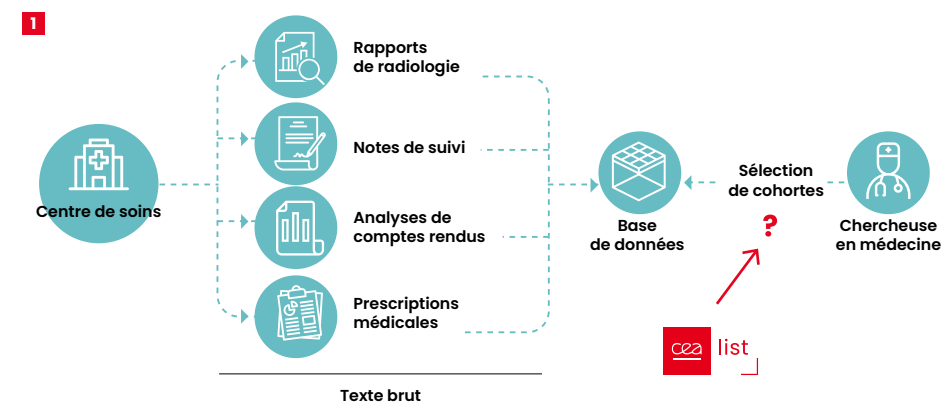
RECHERCHE DE DOSSIERS PATIENTS POUR L'AIDE À LA CONSTITUTION DE COHORTES

La recherche de dossiers patients dans la base de données d'un centre hospitalier permet d'exploiter des années de textes médicaux (comptes rendus, notes de suivi, ...) afin d'évaluer la faisabilité d'études cliniques. Le CEA travaille en collaboration avec le CH Bar-le-Duc dans le cadre du projet e-Meuse Santé afin d'adapter des modèles au domaine du biomédical et, plus particulièrement, au domaine de l'orthophonie. Un moteur de recherche utilisant des entités nommées extraites au préalable de textes a été réalisé dans cet objectif. Le démonstrateur réalisé, une combinaison de l'annotation de textes et du moteur de recherche, a été jugé intéressant et a permis de trouver de nouveaux cas d'utilisation, tels que l'analyse de la qualité de comptes rendus.

L'enrichissement des données du dossier patient avec les données contenues dans les textes médicaux est un sujet d'intérêt auquel le List peut répondre grâce à ses recherches sur l'extraction et la structuration de la donnée. Dans le cadre du projet e-Meuse Santé, en lien avec le Centre Hospitalier de Bar-le-Duc, nous mettons notre expertise en analyse sémantique au service du personnel médical pour les aider dans le recrutement de patients avec un profil précis pour des essais cliniques.



rer des pratiques suffisamment représentées au sein d'un territoire pour établir des procédures argumentées, fondées sur une pratique clinique et l'exploration des variables. Cela va faciliter l'évaluation du bénéfice/risque en évaluant les complications et le parcours de soins, et de documenter les modalités de mise en œuvre des traitements.



L'enjeu du projet est de répondre à des questions de faisabilité d'études cliniques, comme par exemple « combien de patients ayant subi un AVC présentent une apraxie de la parole ? », ainsi que des questions relatives à l'exploration des pratiques suffisamment représentées au sein d'un territoire pour établir des procédures argumentées de type « indications de pose d'une SNG dans le cadre de dysphagie neurologique post-AVC. »

Ce traitement automatisé des comptes rendus est mis en valeur à travers un moteur de recherche. Nous pouvons retenir :

- 1 • Une extraction de concepts (i.e. entités nommées) combinant :
 - un outil de recherche d'expressions tolérant aux fautes développé par le laboratoire (QuickMatching) ;
 - deux modèles de deep learning (CamemBERT et Pyramid).
- 2 • Cette combinaison est à l'état de l'art sur le jeu de données biomédical QUAERO.
- 3 • Un moteur de recherche performant qui permet de :
 - sélectionner des dossiers patients aux caractéristiques communes ; visualiser ces dossiers ainsi que leur nombre.

Ainsi, les équipes médicales pourront utiliser cet outil pour structurer leurs informations, améliorer leurs connaissances ou avoir un rapide aperçu de l'historique médical d'un patient.

1 Aide à la sélection de population ciblée

Santé numérique

Les outils de TAL pour aider à répondre à des questions de faisabilité d'études cliniques

L'ambition du projet e-Meuse Santé est de déployer à l'échelle des départements du Grand Est (CH Bar-le-Duc) des innovations numériques pour améliorer l'accès aux soins des personnes en milieu rural, par la définition et la validation de nouveaux parcours de soins à inscrire dans le droit commun.

Les systèmes actuels de codification constituent des données structurées mais ne permettent pas d'accéder aux diverses informations présentes dans les notes ou les comptes rendus de bilan orthophonique. L'automatisation des processus de traitement de comptes rendus permet un gain de temps pour identifier les patients concernés. L'exploration du contenu des dossiers médicaux ou paramédicaux quant à elle, permet la réflexion sur des pratiques de terrain et contribue ainsi à la qualité des soins. Le projet vise la mise au point d'une méthode d'identification automatique de données non structurées dans les textes médicaux, permettant d'extraire des unités lexicales pertinentes du discours des professionnels de santé, répondant à leurs besoins.

D'un point de vue fonctionnel, ce projet permet de répondre à des questions de faisabilité d'études cliniques, et d'explo-

Romarc Besançon
PhD,
Ingénieur-chercheur



Frédérique Brin-Henry
e-Meuse Santé
Cheffe de projet de recherche clinique et paramédicale/chercheuse en terminologie CH Bar-le-Duc



«Pour l'orthophonie, au carrefour des sciences biomédicales et des sciences humaines, qui se focalise sur les pathologies du langage, de la communication et de la déglutition, ce travail collaboratif favorise une perspective critique et une réflexion épistémologique de premier plan.»

RÉFÉRENCES

Cas d'usage, application, transfert :

Les outils ainsi développés sont des briques de base pour le traitement des données textuelles qui pourront être transférés et intégrés dans les SI des hôpitaux.

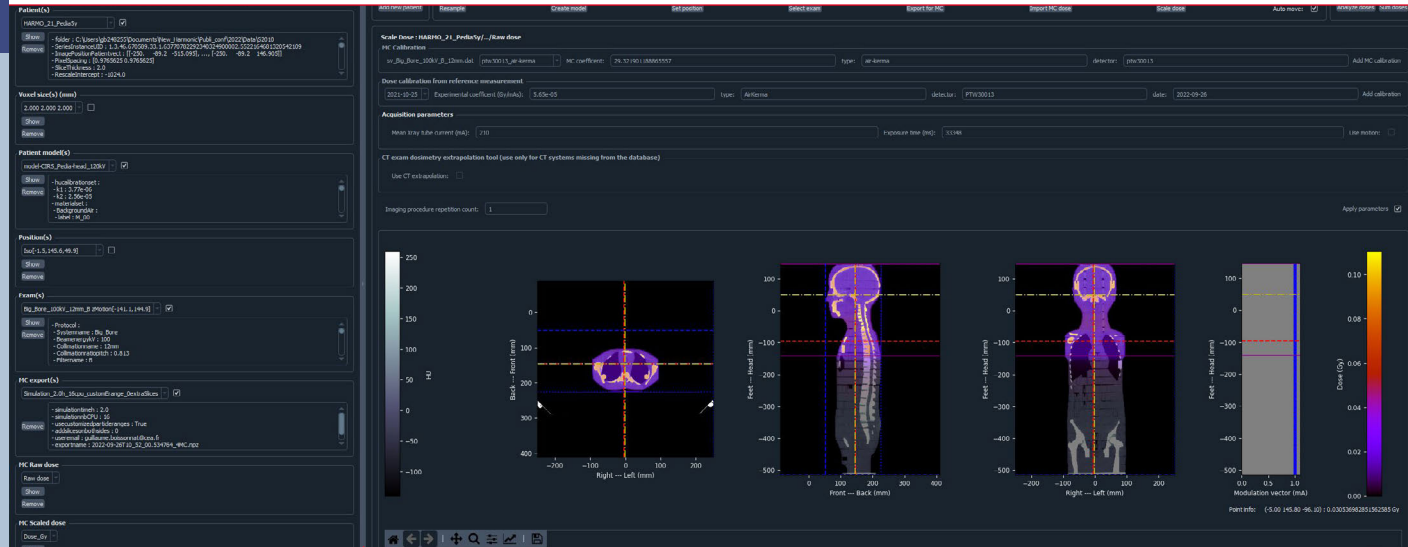
Publications majeures :

• Tiphaine Le Clercq de Lannoy, Romarc Besançon, Olivier Ferret, Julien Tourille,

Frédérique Brin-Henry, et al. « *Stratégies d'adaptation pour la reconnaissance d'entités médicales en français. Traitement Automatique des Langues Naturelles (TALN 2022)* », Jun 2022, Avignon, France. pp.215-225. (hal-03701500

• Tiphaine Le Clercq de Lannoy, Romarc Besançon, Olivier Ferret, Julien Tourille, Frédérique

Henry, et al. : « *Extraction et analyse de concepts médicaux dans un corpus de spécialité en orthophonie.* » LIFT/TAL 2022 - Journées Jointes des Groupements de Recherche Linguistique Informatique Formelle et de Terrain et Traitement Automatique des Langues, Nov 2022, Marseille, France. pp.99-108. (hal-03846822)



Anne-Catherine Simon
Ingénieur-chercheuse

« IDMS rend le calcul Monte-Carlo accessible aux cliniciens, les accompagnant dans l'évaluation de leurs pratiques. »



Guillaume Boissonnat
Ingénieur-chercheur

Santé numérique

Logiciel d'évaluation personnalisée des doses d'imagerie par rayons X

Le logiciel IDMS d'estimation des doses pour l'imagerie par rayons X pour le diagnostic et la radiothérapie permet d'évaluer en 3D les doses d'irradiation reçues par les patients, sécurisant ainsi leur prise en charge. Développé par le CEA-List, cet outil est en cours de transfert industriel.

Le CEA-List a développé un logiciel fondé sur la méthode Monte-Carlo pour l'estimation personnalisée des doses scanner dans le cadre des projets de recherche institutionnels AID-IGRT (ANR) et QUADOS (ANSM) en se basant notamment sur les équipements de la plateforme DOSEO.

Pour améliorer la version initiale, le CEA-List a collaboré étroitement avec la société RT3C en vue de sa mise sur le marché. Parallèlement, les initiatives institutionnelles HARMONIC (financée par l'Europe, dans le cadre du programme H2020) et ELISA (soutenue par le Cancéropôle Île-de-France) ont favorisé la mutualisation des développements tout en prenant en considération les exigences cliniques.

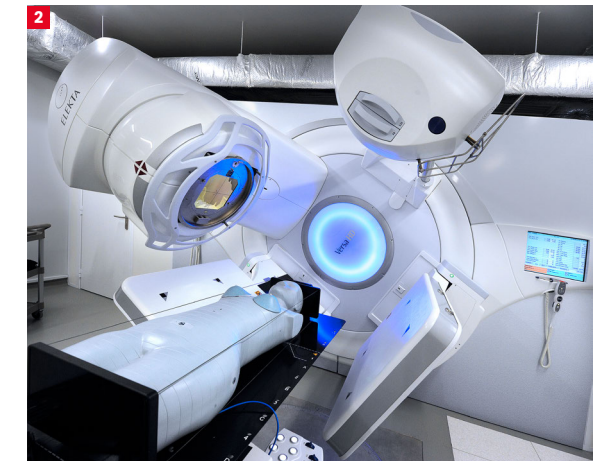
Depuis sa première version transmise à RT3C, IDMS a été perfectionné, tant au niveau de l'automatisation que de l'analyse



des résultats produits. Grâce à de nouvelles méthodes de modélisation et de validation, six systèmes d'imagerie RX ont pu être ajoutés aux cinq déjà implémentés dans sa base de données. Le logiciel est actuellement testé à l'HEGP (APHP, Paris) dans le cadre de l'étude clinique ELISA.

Ses fonctionnalités s'étendent de l'automatisation des étapes du paramétrage du code Monte-Carlo à l'exploitation de sa sortie sous forme de cartographie de dose 3D du patient directement exploitable par les utilisateurs cliniques.

- 1 Scanner GE Discovery CT 750HD sur la plateforme DOSEO
- 2 Accélérateur ELEKTA Versa HD et son système d'imagerie de positionnement sur la plateforme DOSEO
- 3 Expérience de validation sur le scanner GE Discovery CT 750HD de la plateforme DOSEO



RÉFÉRENCES

Transfert industriel :

Le prototype IDMS permet une évaluation personnalisée des doses d'imagerie par rayons X, offrant ainsi un outil au clinicien pour améliorer leur prise en compte, notamment pour le positionnement en radiothérapie. IDMS est actuellement en cours de transfert à la société RT3C.

Projets majeurs :

- AID-IGRT (ANR)
- QUADOS (ANSM)
- HARMONIC (H2020)
- ELISA (Cancéropôle Île-de-France)

Publications majeures :

- *« Monte Carlo-based software for 3D personalized dose calculations in image-guided*

radiotherapy», Le deroff C. et al., Phys Imaging Radiat Oncol. 2022,

- *« Complete patient exposure during paediatric brain cancer treatment for photon and proton therapy techniques including imaging procedures*», De Saint-Hubert M, Boissonnat G. et al.

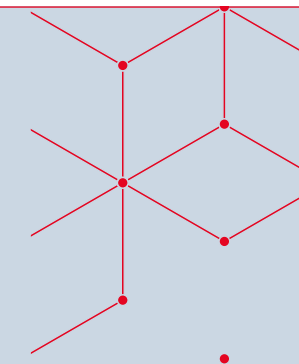


NUCLÉAIRE DU FUTUR



La filière nucléaire est la troisième filière industrielle française, derrière l'aéronautique et l'automobile, avec plus de 2 600 entreprises, dont 80% de PME et de microentreprises, réparties sur l'ensemble du territoire. La digitalisation des activités nucléaires va jouer un rôle majeur dans la capacité de cette filière à réaliser le plan ambitieux de relance décidé par l'État avec la construction des EPR2 et le développement des petits réacteurs modulaires (SMR). En effet, l'innovation numérique apporte des technologies indispensables en raison des nouveaux enjeux du domaine : optimiser la performance opérationnelle du parc existant dont la durée d'exploitation a été prolongée, accélérer la conception et la construction des nouveaux réacteurs tout en garantissant la sûreté, réaliser efficacement le démantèlement et la gestion des déchets. Le CEA-List contribue à adresser ces enjeux de performance opérationnelle en s'appuyant sur les technologies du numériques selon trois axes :

- les outils de conception et d'automatisation pour accélérer la conception et la réalisation des chantiers de construction et de démantèlement,
- l'optimisation des interventions (exploitation, arrêts de tranches ou démantèlement) via des technologies de soutien à l'opérateur pour renforcer sa sécurité et optimiser le temps d'intervention,
- apporter la confiance numérique dans la transition digitale via des technologies intégrant la confiance dans le continuum des données et des infrastructures « *edge-to-cloud* » pour permettre la création de nouveaux services à partir des données.



NOS AVANCÉES 2023

► **Contribution à la chaîne d'ingénierie de Framatome pour la conception des systèmes de contrôle-commande EPR**

► **Une instrumentation et des outils numériques avancés pour la caractérisation de colis de déchets radioactifs**

► **Discrimination neutrons/gamma à basse énergie par scintillateur plastique : un défi relevé par l'apprentissage automatique**

Accélérer la conception et la réalisation des chantiers de construction et de démantèlement

LES OUTILS DE CONCEPTION ET LE JUMEAU NUMÉRIQUE FONCTIONNEL

L'accélération de la construction des futurs réacteurs (EPR2 ou petits réacteurs modulaires), passe d'abord par une optimisation de la phase de conception. Pour cela, nous développons des outils d'ingénierie collaborative et des jumeaux numériques fonctionnels permettant de modéliser l'ensemble du système en y intégrant toutes les contraintes : réglementaires, de sûreté, d'approvisionnement, de la chaîne de fournisseurs ou de cycle de vie. Cela permet également d'intégrer dès la conception les besoins de surveillance, de maintenance mais également de démantèlement. Ainsi la conception peut être réalisée de manière plus globale en raccourcissant les cycles et fournit ensuite une maquette numérique fonctionnelle intégrant toutes les composantes nécessaires à la construction, à l'exploitation et à la déconstruction.

LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES ET LA FORMATION À L'INTERVENTION

Un enjeu majeur pour accélérer la construction des nouveaux réacteurs et la gestion des compétences. En effet, après un ralentissement important du nombre de constructions de réacteurs depuis plusieurs décennies, la filière a un enjeu majeur de formation et de montée en compétences pour construire les 14 EPR2 annoncés par l'État d'ici 2050. Cette gestion des compétences et de la formation est également un enjeu de taille pour le démantèlement et la gestion des déchets. En effet, les cycles sont très longs et la connaissance des installations et de leurs déchets a besoin d'être assurée sur plusieurs décennies. Au CEA nous développons des outils de capitalisation de la connaissance basés sur l'analyse automatique de documents par l'intelligence artificielle. Nous développons également des outils de jumeau numérique et de simulation interactive pour étudier la faisabilité et former les opérateurs sur des tâches complexes et à risque. Par exemple, nous avons développé un jumeau numérique d'engins téléopérés de déstockage de fûts de déchets. Ces engins interviennent, pilotés par un opérateur à distance, dans des casemates de stockage avec une forte radioactivité.



WORLD NUCLEAR EXHIBITION

WNE (« World Nuclear Exhibition »), le salon mondial du nucléaire civil, a eu lieu du 28 au 30 novembre 2023 à Paris. Le CEA est un acteur incontournable de la filière et le List y a présenté ses technologies via un workshop sur « L'innovation numérique pour la performance opérationnelle de l'usine nucléaire » et cinq démonstrateurs technologiques innovants :

- **NanoRCTD** : dispositif transportable, automatisé et pilotable à distance pour le prélèvement de mesure d'activité volumique de radionucléides en solution.
- **NuTRACKER** : système industriel portable de détection et classification de rayonnements gamma, neutrons thermiques et rapides.
- **SlamNuCoMo** : dispositif de géolocalisation de la mesure et de reconstruction en 3D et en temps réel pour une cartographie radiologique de la zone analysée. Le système couplant vision et IA est intégrable à tout système de mesure.
- **Robot d'inspection et de maintenance** : une base mobile autonome équipée d'un bras à 360° et d'un capteur pour évaluer la corrosion dans les canalisations.
- **Simulation interactive couplée aux capteurs d'une tenue de protection nucléaire MRV5 T-Vision** dont l'objectif est de reproduire fidèlement en réalité virtuelle et augmentée le comportement des opérateurs en environnement extrême (étude de scénarios, formation).

L'OPÉRATEUR AUGMENTÉ POUR RENFORCER SA SÉCURITÉ ET OPTIMISER LE TEMPS D'INTERVENTION

Un autre axe d'amélioration de la performance opérationnelle est l'optimisation des interventions de contrôle ou de maintenance pendant l'exploitation ou le démantèlement des installations. Les technologies numériques permettent non seulement de former et de préparer les interventions mais également de fournir des outils d'assistance et d'aide à la décision en temps réel durant l'intervention. Nous développons par exemple des technologies de réalité augmentée ou de cartographie radiologique dynamique et géolocalisée.



LA CONFIANCE NUMÉRIQUE

La transformation numérique de la filière passe obligatoirement par la mise en œuvre d'infrastructures et d'outils répondants aux exigences de sécurité et de sûreté. Nous développons depuis plusieurs années des outils de vérification de sûreté et de cybersécurité des logiciels et du contrôle commande mais un des enjeux majeurs à venir est celui de l'intelligence artificielle et de la gestion des données. Pour cela, nous travaillons sur le développement de solutions d'intelligence artificielle de confiance et nous participons également aux instances de standardisation sur le sujet. L'enjeu à venir pour la filière est celui des espaces et de la fédération de données grâce aux clouds hydrides, sécurisés et décentralisés. En effet, les innovations technologiques permettent de projeter des infrastructures numériques de confiance qui permettront de créer des services et de la valeur à partir de données de différents acteurs sans les partager, par exemple par des applications d'apprentissage fédéré sur des espaces de données décentralisés.

STANDARDISATION : IA ET NUCLÉAIRE

Le CEA participe au groupe de normalisation IEC 45A Nuclear Instrumentation «Instrumentation and control of nuclear facilities.» En particulier, Daniela Cancila du List fait partie de la délégation française pour positionner la France sur les travaux «AI and Nuclear» Des discussions sur des possibles standards sont en cours à la IEC 45A/WGAI2.

Le List participe également à deux groupes techniques de l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) : «Safety Implications of the Use of Artificial Intelligence in Nuclear Power Plants» et «Artificial Intelligence and its Existing and Near-term Deployment in Operating Nuclear Power Plants.» Nous sommes également contributeur du livre blanc à venir «Deployment of Artificial Intelligence Applications for the Nuclear Power Industry: Considerations and Guidance.»



- 1 Opération d'assemblage en réalité virtuelle immersive avec retour d'effort.
- 2 SlamNuCoMo et cartographie dynamique : Andrea Macario Barros et Frédérick Carrel
- 3 T-Vision : Tenue Ventilée Immersive adaptée aux Simulations Interactives d'Opérations Nucléaires



Xavier Zeitoun
Ingénieur-chercheur

« Le jumeau numérique, combiné aux outils d'optimisation permet d'adresser le verrou de l'allocation des systèmes analogiques et de participer à la résilience du service de contrôle-commande des centrales. »

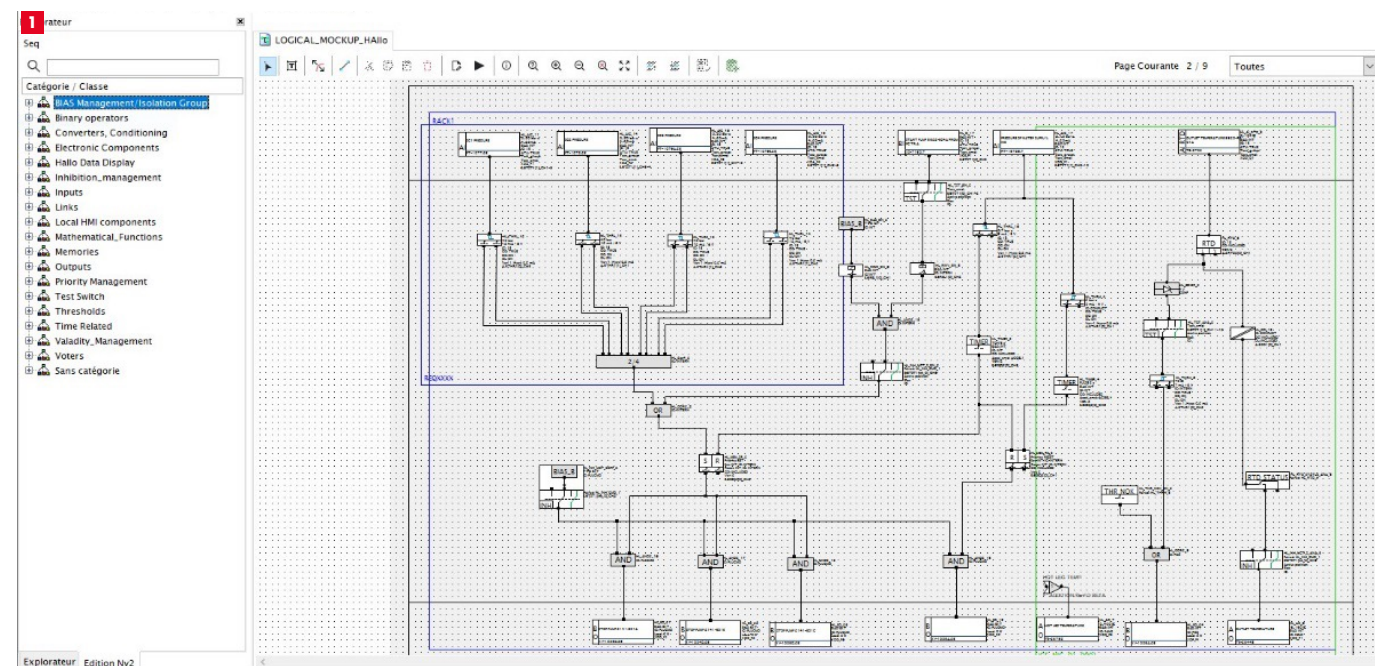
Nucléaire du futur

Contribution à la chaîne d'ingénierie de Framatome pour la conception des systèmes de contrôle-commande EPR

Framatome a fait appel à l'expertise en jumeau numérique du CEA-List pour garantir l'absence de « bug » d'une plateforme de contrôle commandée classée.

Framatome propose ToolChain, une chaîne d'outils permettant de concevoir des systèmes à la fois logiciels et analogiques. Cette ToolChain s'appuie sur un jumeau numérique du système réalisé avec une customisation de l'outil Alices de Corys.

L'allocation de fonctions sur un système analogique est cependant complexe : la logique du contrôle n'est pas opérée sur un calculateur centralisé mais répartie sur un grand nombre de cartes électroniques dédiées reliées entre elles. Le calcul et la gestion de l'allocation de cette logique comprenant plusieurs centaines d'éléments, cela rend leur connexion laborieuse et potentiellement sujette à erreur sans outil adapté.



Framatome a demandé au CEA-List d'adapter l'outil HALlo (Analog I&C Allocator), résultant du projet Orion, pour l'intégrer à cette ToolChain. HALlo calcule, à partir d'une description de circuits électroniques, une allocation des composants de ces circuits sur les cartes, qui sont à leur tour allouées dans des racks, puis dans des armoires. Le défi de ce calcul d'allocation réside dans la multiplicité des contraintes. Elles peuvent être fonctionnelles (préservation l'isolation des signaux, ...), ou venir de la technologie (nombre de fonctions par module, intensité maximale sur les pistes, ...). Enfin, certaines contraintes ne sont pas formalisées mathématiquement (lisibilité de l'architecture, ...) et sont laissées à la charge du systémier. L'intégration de HALlo dans la ToolChain laisse au systémier la main sur les décisions qui relèvent de son expertise. Les calculs d'allocations s'appuient sur un outil open source d'optimisation venant de la recherche opérationnelle et utilisent des algorithmes plus simples quand la combinatoire le permet, pour que Framatome soit autonome sur les futures évolutions de HALlo.

Avec l'aide des équipes de Corys, HALlo construit maintenant sa description des circuits à partir de la ToolChain, donne la main au systémier pour certaines décisions et écrit l'allocation calculée dans ToolChain.

1 L'atelier de la ToolChain Framatome pour les EPR

RÉFÉRENCES

Transfert industriel :
HALlo a été déployé dans ToolChain de Framatome. Le transfert sera complété par

une formation dispensée par les chercheurs du CEA-List, qui permettra aux équipes de Framatome d'être autonomes sur

les évolutions du code de HALlo. Ces travaux ont été présentés à la ROADEF 2023.



Adrien Sari

Ingénieur-chercheur,
Mesure physique nucléaire

« L'association de techniques de mesure nucléaire et de l'intelligence artificielle est la clé pour améliorer la gestion des colis de déchets radioactifs. »

Nucléaire du futur

Une instrumentation et des outils numériques avancés pour la caractérisation de colis de déchets radioactifs

Le projet EURATOM Micado proposait d'établir une solution à coût raisonné pour une caractérisation rapide et non-destructive des déchets radioactifs, orchestrée par la plateforme numérique DigiWaste. Dans ce cadre, le CEA-List a mis à contribution son expertise, à la fois en instrumentation nucléaire, mais également en systèmes numériques.

Dans le cadre du projet Micado, le CEA-List a enrichi la plateforme DigiWaste de deux instruments innovants et de différents apports en Intelligence Artificielle (IA).

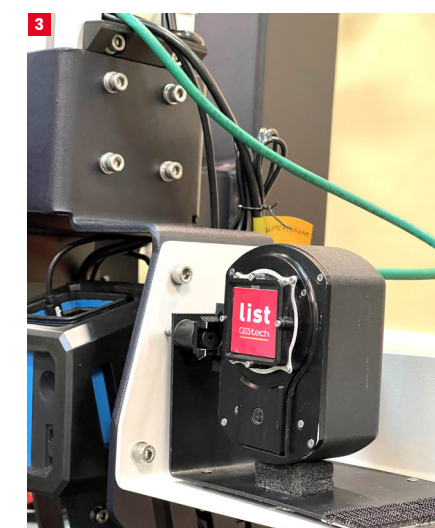
Un système de mesure par interrogation photonique active (figure 1), utilisant un accélérateur linéaire d'électrons, a été déployé pour caractériser de manière rapide et fiable des colis de déchets radioactifs bétonnés. Les développements réalisés ont démontré la faisabilité de la méthode de mesure avec une durée d'irradiation de dix minutes seulement, tout en réduisant la taille du dispositif de détection. Une jouvence de

l'électronique de mesure qui permet désormais de procéder à des mesures sans interruption et donc sans perte de signal, améliorant ainsi les comptages post-irradiation jusqu'à 35%.

Nanopix, la plus petite caméra gamma à masque codé au monde (figure 2), a embarqué une nouvelle génération d'électronique assurant un fonctionnement pérenne sur la plateforme de mesure tout en permettant sa transition numérique via l'envoi des résultats directement sur une base de données regroupant les informations issues des différents systèmes. Par ailleurs, la reconstruction d'image a été fortement améliorée par un algorithme fondé sur la méthode d'optimisation itérative « *Expectation Maximization* » intégrant une pénalité définie par un champ de Gibbs. Les performances de Nanopix ont été validées sur trois fûts représentatifs.

Enfin, l'IA symbolique ExpressIF® a été utilisée pour formaliser l'expertise d'Orano afin de proposer automatiquement la liste des mesures nécessaires à la caractérisation des déchets à partir des mesures déjà effectuées et de leurs incertitudes. ExpressIF® a été appliquée à la déconvolution des spectres afin de proposer une reconnaissance isotopique.

- 1 Intégration de Nanopix sur la plateforme Micado
- 2 Dispositif de mesure par interrogation photonique active sur la plateforme SAPHIR du CEA-List
- 3 La caméra gamma Nanopix



Par l'apport de technologies de détection de pointe, le CEA-List a participé à la démonstration de l'intérêt du couplage de méthodes de mesure différentes pour la caractérisation de colis de déchets radioactifs. La numérisation des résultats sur la plateforme DigiWaste a permis d'exploiter l'IA pour optimiser le processus de caractérisation en formalisant la connaissance experte des opérateurs et en recoupant l'ensemble des données connues. Le système ainsi développé pourrait apporter une aide considérable pour améliorer la traçabilité des colis de déchets radioactifs en Europe.

RÉFÉRENCES

Application :

Numérisation de l'analyse de colis de déchet radioactifs, recoupement des résultats d'analyse complémentaires. Ces travaux ont été présentés à la ROADEF 2023.

Projet majeur :

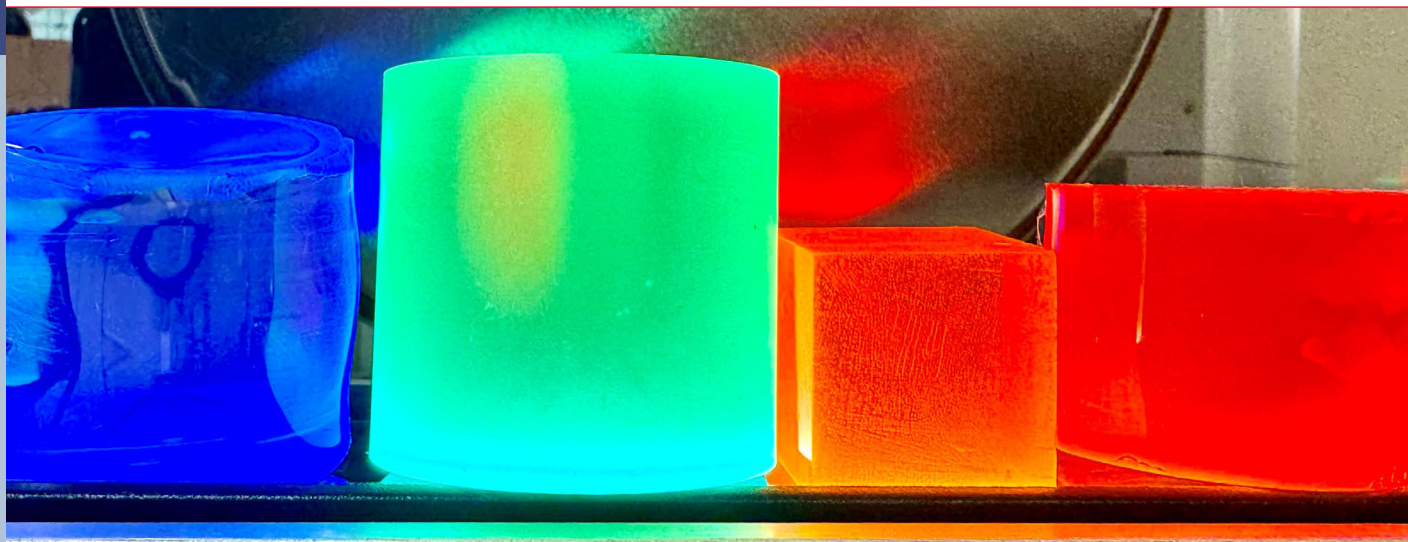
Projet EURATOM MICADO / Grant agreement No 847641

Publications majeures :

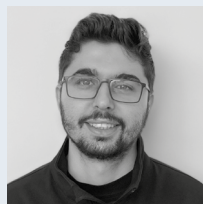
• I. Meleshenkovskii, et al., « *Feasibility study of the photofission technique for radiological characterization of*

220-L concrete-lined nuclear waste drums using 7 or 9 MeV linacs».

• « *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* », Volume 1029, 2022

**Ali Hachem**

Docteur en apprentissage automatique embarqué pour l'instrumentation nucléaire



« Nous cherchons à améliorer les performances des systèmes d'instrumentation nucléaire grâce à l'apprentissage automatique. »

Nucléaire du futur

Discrimination neutrons/gamma à basse énergie par scintillateur plastique : un défi relevé par l'apprentissage automatique

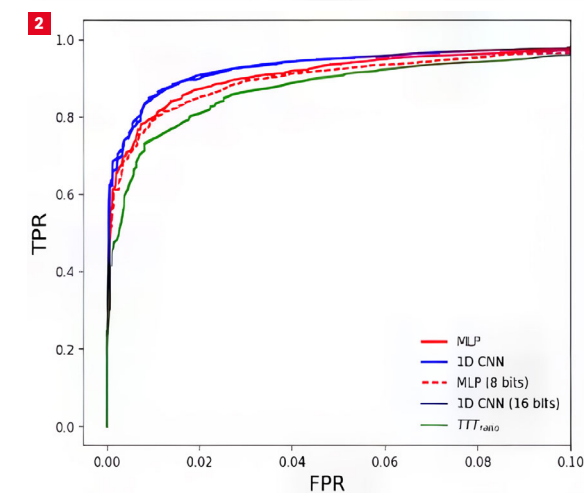
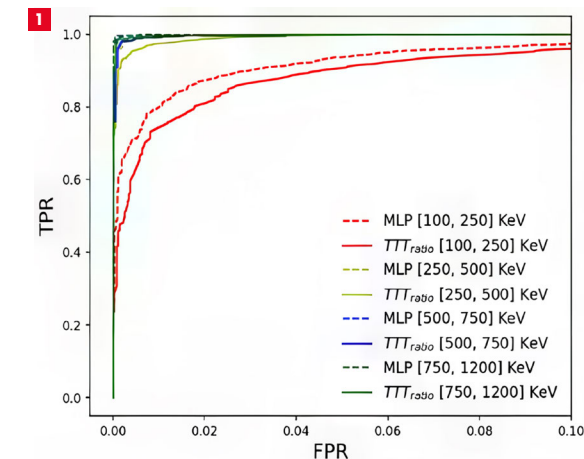
Dans diverses applications, la classification des signaux de détecteurs de rayonnements est cruciale. Les algorithmes communément utilisés pour discriminer les rayonnements neutrons et gamma dans des scintillateurs plastiques ont cependant des limitations à la fois en matière de performance de discrimination mais également « d'embarquabilité ». Les algorithmes de *machine learning* développés ont permis d'améliorer les performances de discrimination mais également de réduire la fréquence d'échantillonnage et ainsi d'envisager des systèmes de détection en ligne portables.

Afin de développer des modèles basés sur de l'apprentissage et de valider leurs performances, il est nécessaire d'avoir des jeux de données représentatifs et correctement étiquetés. Une méthode pour générer des ensembles de données neutrons/gamma correctement séparés et étiquetés avec un scintillateur organique a été proposée et évaluée. Le processus est capable de produire des ensembles de données étiquetés, même dans des situations où la capacité de discrimination de la chaîne d'acquisition utilisée est limitée. La méthode consiste à effectuer une mesure de temps de vol avec une source de Cf252 et d'exploiter la différence de vitesse de déplacement entre neutrons et gamma. Les impulsions considérées comme des neutrons sont ensuite analysées pour retirer les impulsions présentant de l'empilement. Enfin une analyse s'appuyant sur une méthode de comparaison de charge permet d'éliminer les dernières impulsions non considérées comme neutrons.

Sur ces bases de données acquises et étiquetées, nous avons comparé les performances des méthodes de l'état de l'art (« Tail to Total Ratio ») et nos modèles basés sur des réseaux de neurones avec deux architectures : « Multi Layer Perceptron » (MLP) et « Convolutionnal Neural Network (CNN) ». Les performances des approches CNN et MLP sont supérieures à celles des approches couramment utilisées dans la littérature comme la comparaison entre charge retardée et charge totale (« TTRatio, Tail To Total Ratio »), en particulier pour les faibles énergies, de l'ordre de 100 à 250keV comme le montre la figure 1.

Pour pouvoir développer des détecteurs performants et portables, il est également nécessaire de pouvoir embarquer les algorithmes de discrimination. La figure 2 compare les résultats entre les modèles théoriques et les modèles d'apprentissage portés sur une plateforme matérielle FPGA.

Ces travaux ont fait l'objet de deux publications en revues internationales et d'un dépôt de brevet sur une étude complémentaire cherchant à extraire des caractéristiques pour généraliser l'approche à une plus grande variété de détecteurs.



- 1 Courbe ROC pour les différentes approches proposées
- 2 Courbes ROC obtenues après intégration sur FPGA
- 3 Scintillateur organique discriminant

RÉFÉRENCES

Publications majeures :

• A. Hachem, Y. Moline, G. Corre, B. Ouni, and F. Carrel, « *Labeling Strategy to Improve Neutron/Gamma Discrimination with Plastic Scintillator Using Artificial Neural Network* », Nuclear Engineering and Technology journal, 2023

• A. Hachem, Y. Moline, G. Corre, and F. Carrel, « *MultiLayer Perceptron Model vs Comparison Charge Method for Neutron/Gamma Discrimination with Plastic Scintillator* ». IEEE Transactions on Nuclear Science, 2023

Brevet :

A. Hachem, Y. Moline, and G. Corre, « *Form Factor Pulse Discrimination Method in Organic/Inorganic* »



Institut CEA-List
2 bd Thomas Gobert
91120 Palaiseau

