

NUMÉRIQUE DU FUTUR

vision et stratégie du CEA



DIGITAL TECHNOLOGY

The CEA's vision and strategy

VERSION FRANÇAISE p.3

ENGLISH p.30



Au cœur des orientations stratégiques du CEA validées par l'État en mai 2019, nos activités au service de la transition numérique constituent un champ majeur de recherche et de développement. Leur diffusion à tous les compartiments de la vie sociale et économique fait de l'accès à ces technologies un enjeu majeur de souveraineté et de prospérité ainsi qu'un atout pour surmonter les grands défis que sont la transition énergétique et la médecine du futur.

En 2020, j'ai souhaité lancer un travail destiné à consolider notre stratégie dans ce domaine à partir d'une évaluation de nos forces, réparties dans l'ensemble de l'organisme - en les situant au regard des principaux organismes de recherche dans le monde - et d'une réflexion sur les grands axes de développement du numérique pour les années à venir.

Il s'agissait pour cette Mission Numérique de proposer des axes stratégiques permettant au CEA, tout en consolidant sa profondeur scientifique et technologique, de jouer pleinement son rôle de soutien à l'industrie française en tenant compte des défis environnementaux et sociétaux liés à la diffusion du numérique.

L'enjeu est de taille : accompagner un déploiement responsable du numérique et permettre à la France de maîtriser des technologies clés pour son autonomie stratégique et la résilience de son économie.

Les résultats de la mission numérique définissent, au-delà des grands objectifs de recherche et développement, les moyens à mettre en œuvre pour mobiliser les synergies autant internes qu'avec les partenaires de recherches du CEA, principalement en France et en Europe, au service de cette ambition.

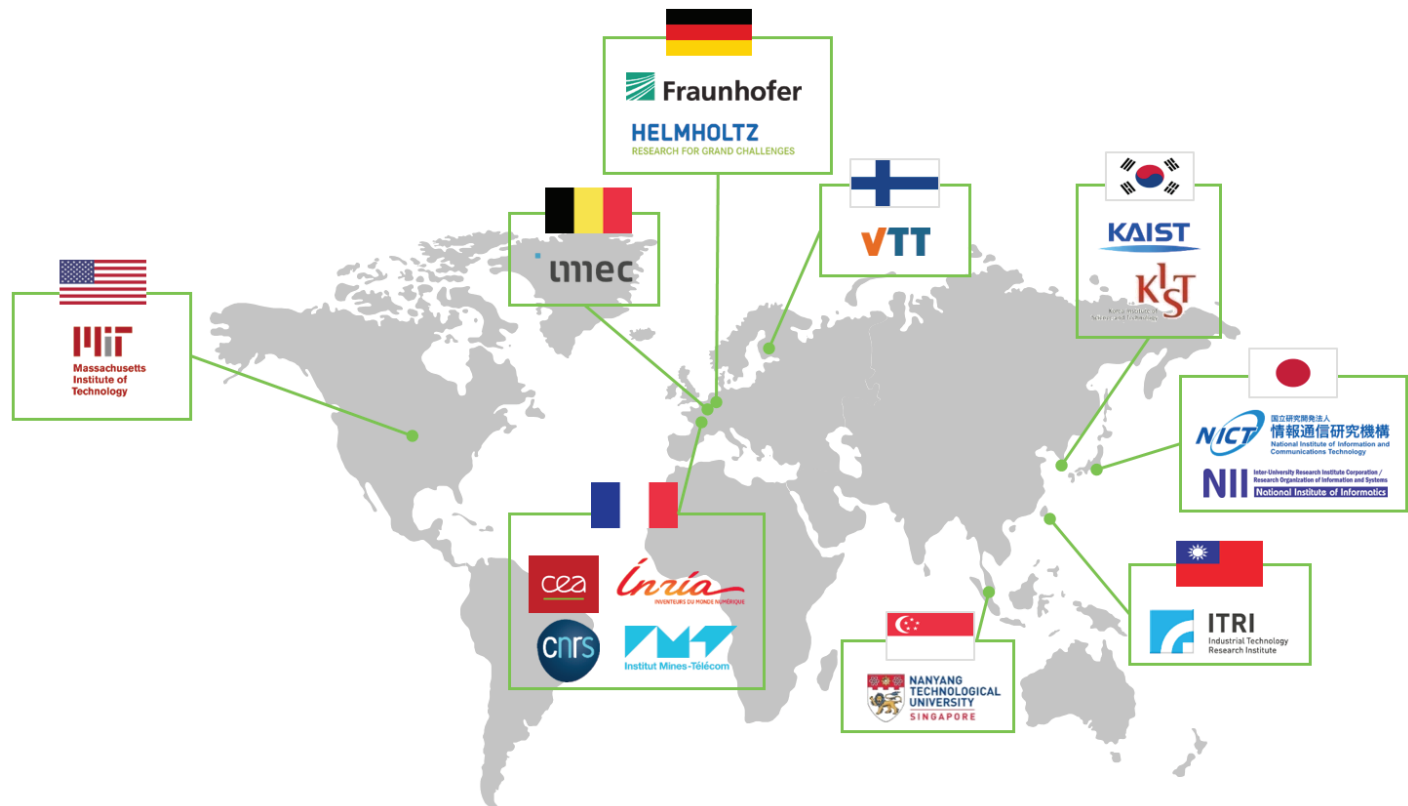
François Jacq
Administrateur Général du CEA

SOMMAIRE

Position du CEA dans le numérique, au plan national et international	5
Aperçu en quelques chiffres clés	6
Vision du numérique du futur	8
9 Axes forts choisis par le CEA	9
• Numérique frugal et durable	10
• Numérique au service de la transition énergétique	12
• Numérique pour la santé	14
• Usine et installations du futur	16
• Cybersécurité	18
• IA de Confiance, IA embarquée	20
• Solutions matérielles et logicielles pour le calcul	22
• Systèmes de calcul distribués communicants	24
• Perception numérique, capteurs avancés et instrumentation	26
Digital for science	28
Numérique et société	29

POSITION DU CEA DANS LE NUMÉRIQUE, AU PLAN NATIONAL ET INTERNATIONAL

Le CEA est l'un des rares acteurs du numérique mondial associant une recherche fondamentale exploratoire reconnue internationalement, une recherche fondamentale amont associée aux feuilles de routes technologiques, une recherche technologique fortement couplée à l'industrie et de grandes communautés scientifiques utilisant et co développant des outils du numérique au-delà de l'état de l'art. La comparaison avec un panel de 14 autres acteurs importants permet de mieux apprécier la position du CEA dans ce domaine.



APERÇU EN QUELQUES CHIFFRES CLÉS



des dépôts de brevets
du CEA se rapportent
au domaine du numérique



de ses publications
se rapportent au domaine du
numérique

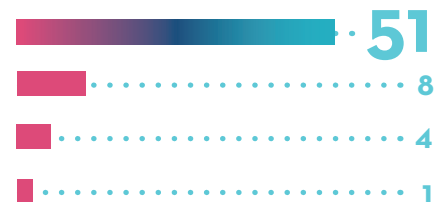


déposant de brevets
du panel, au cumul
des **3** dernières années



5^e position concernant les publications, avec plus de
59100 publications de 2000 à 2019.
La dimension scientifique du CEA est un atout
différenciant par rapport aux RTO européens

59100



Le CEA compte par exemple
51 ERC pour **8** à l'IMEC,
4 au Fraunhofer, **1** à VTT



La cartographie globale des compétences au CEA
fait ressortir une masse critique de :

+ 3000 chercheurs travaillant dans le domaine du numérique



50 plateformes dédiées au numérique

VISION DU NUMÉRIQUE DU FUTUR



Notre message est simple : le numérique est un enjeu international de compétitivité, de souveraineté et de société. Avec plus de 3000 scientifiques dans ce domaine, le CEA en est un des principaux acteurs français. Nous sommes convaincus que, du calcul à la robotique, des applications médicales à celles de l'énergie et de la défense, le CEA est capable de faire émerger de nombreuses innovations numériques au service de la science et de l'industrie dans les années à venir, avec le souci de leur impact sociétal et dans un esprit de frugalité pour limiter leur impact environnemental. La passion qui anime nos équipes, notre capacité collective à intensifier leurs échanges et leur créativité, seront tout autant que leur excellence scientifique les leviers de cette ambition.

**Stéphane SIEBERT •
Pascale BAYLE GUILLEMAUD**

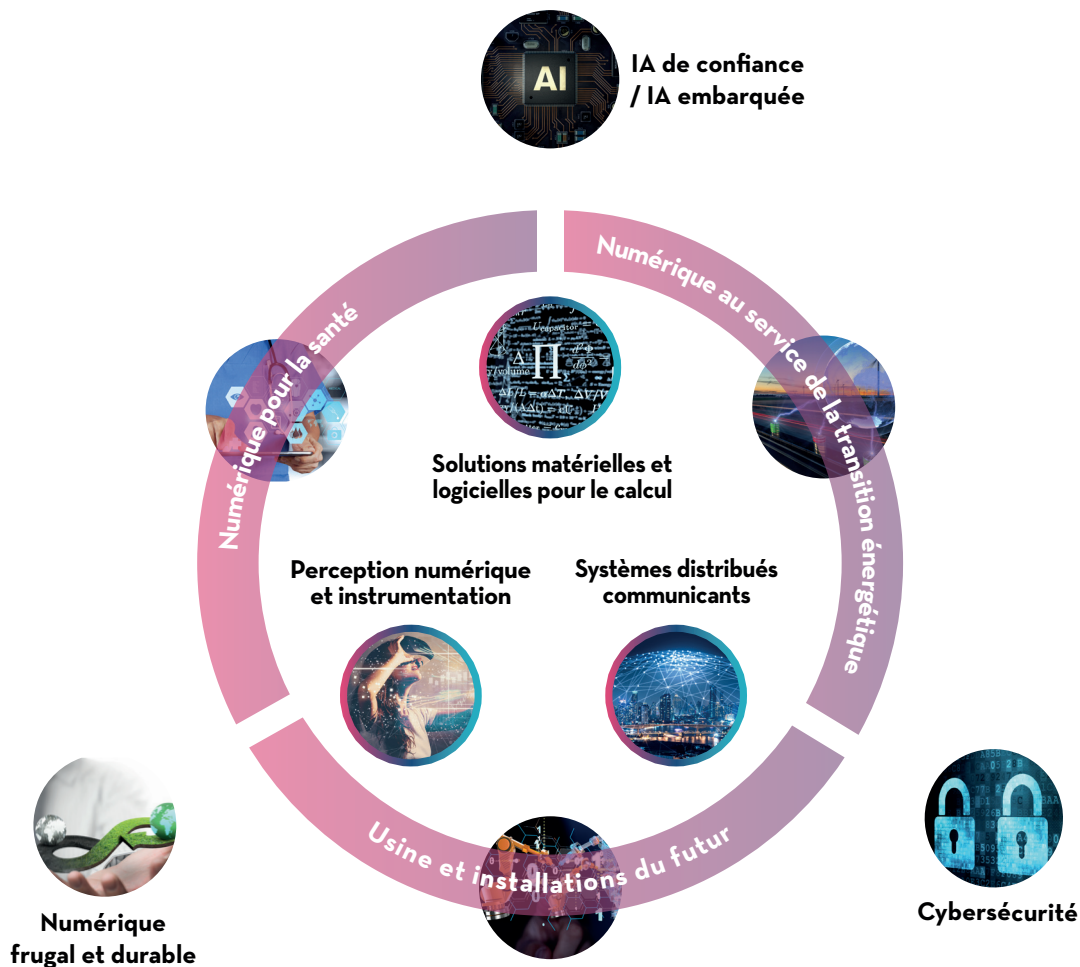
Prévoir l'évolution du numérique est un exercice difficile, beaucoup d'évolutions majeures ont échappé aux prédictions... Néanmoins de grandes tendances sont perceptibles, elles peuvent éclairer nos choix technologiques :

- la continuité du monde numérique en situation nomade et résidentielle tendant à la superposition continue d'un espace virtuel au monde physique;
- le rôle déterminant des interfaces entre l'utilisateur et le monde virtuel pour rendre la communication la plus simple et fluide possible : au-delà du clavier, les interfaces vocales, sensibles, voire sensibles aux émotions ne cessent de progresser. Le nombre et la taille moyenne des écrans sont appelés à doubler dans les prochaines années, à la faveur de l'augmentation de leur qualité (définition, brillance, consommation), de la réduction de leur coût et de nouvelles fonctionnalités multisensorielles;
- le numérique va transformer profondément le logement, les modes et espaces de travail, les usines; la transition énergétique sera numérique;
- l'internet des objets se développe à grande vitesse et sous-tend ces transformations;
- les technologies transversales : IA embarquée, cyber, jumeau numérique sont partout; elles constituent un enjeu de maîtrise technologique et de dissémination large. Le traitement des données massives deviendra une modalité essentielle de la recherche scientifique;
- le socle hardware du numérique : capteurs et calcul sont un enjeu de souveraineté dans un contexte de tension internationale. L'Europe devra soutenir ses domaines de leadership tout en assurant ses approvisionnements à long terme. Le calcul va se ramifier en différentes solutions optimisées pour le calcul intensif, le calcul embarqué basse consommation, les applications d'intelligence artificielle, le quantique... L'intégration 3D, le rapprochement des mémoires et du calcul, les nouveaux matériaux semi-conducteurs font partie des défis technologiques des 10 ans à venir. Ils s'inscrivent tous dans la contrainte de frugalité qui va conditionner le développement d'un numérique soutenable, à laquelle le CEA s'attachera tout particulièrement;
- enfin, la sécurisation des données constituera un défi majeur pour concilier services numériques et sécurité / liberté individuelle.

AXES FORTS CHOISIS PAR LE CEA



Le CEA s'investit dans **9 axes**
du numérique, dans lesquels il vise
l'excellence au niveau national et
international.



NUMÉRIQUE FRUGAL ET DURABLE



L'un des enjeux de développement durable est de faire de la sobriété numérique un axe fort de responsabilité individuelle et collective au CEA. Pour que nos programmes de recherche, notre informatique et téléphonie ou nos usages intègrent davantage cette exigence, travaillons ensemble pour explorer de nouvelles voies de progrès !

Armelle MESNARD



Je travaille sur la spintronique, née du mariage entre la microélectronique standard et le spin de l'électron. Mes recherches portent sur le développement de circuits électroniques moins gourmands en énergie et reconfigurables, éléments clés pour les futures applications numériques frugales.

Lucian PREJBEANU

Limitier l'impact environnemental des applications du numérique est devenu un enjeu majeur. Choix des matériaux, optimisation de la consommation énergétique des composants électroniques, toutes les pistes sont à l'étude au CEA pour atteindre cet objectif.

Les applications du numérique représentent une part croissante de la consommation mondiale d'électricité, qui deviendra rédhibitoire en l'absence de rupture technologique. De plus, la masse des équipements numériques devrait doubler de 2010 à 2025, à la faveur notamment de l'explosion du nombre d'objets connectés et de l'informatique embarquée. Un changement de paradigme est nécessaire, afin d'intégrer la frugalité comme une performance à atteindre au même titre que les autres : rapidité, puissance de calcul, miniaturisation, résolution, etc.

La consommation se répartit entre fabrication des équipements (environ 30 % de l'énergie) et exploitation. Celle-ci se divise, en termes de consommation d'électricité, en utilisateurs (44 %), réseau (32 %), centres informatiques (24 %). Parmi les principaux équipements consommateurs on trouve, dans l'ordre décroissant : les ordinateurs, les télévisions, les smartphones, les objets connectés. Les écrans et les processeurs sont les composants énergivores.

Le traitement dans le *cloud* est nettement plus coûteux en énergie que le traitement local en raison des surconsommations liées à la télécommunication et aux centres de calcul. La première voie de la frugalité énergétique consiste donc à développer les traitements locaux et limiter les transferts de données brutes. Le calcul embarqué est au cœur de cette tendance.

L'optimisation des composants de la microélectronique par opération de calcul a déjà conduit à une diminution de l'énergie consommée de 14 ordres de grandeur en 80 ans d'histoire du calcul et (environ) 8 ordres de grandeur dans l'histoire de la microélectronique. Mais le basculement vers la frugalité exige de nouvelles ruptures franches, visant à gagner encore plusieurs décades plutôt que quelques pourcents.

S'agissant des matériaux, la tension se manifeste en particulier dans le domaine des terres rares. L'enjeu est ici la substitution des matériaux **(i)** considérés comme polluants **(ii)** coûteux ou en voie de raréfaction.

Le CEA prend en compte ces enjeux, notamment pour la fabrication des composants du numérique (analyse de cycle de vie, économie de matériaux critiques, matériaux de substitution, réparabilité...) et leur usage (architectures et composants basse consommation, architecture des réseaux de données et utilisation de réseaux distribués...), suivant trois axes fortement interdépendants :

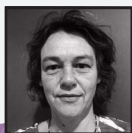
- la recherche scientifique et technologique en vue de diminuer la consommation globale d'énergie et de matériaux critiques ou polluants liés au numérique. Des ruptures sont recherchées pour réduire massivement la consommation d'énergie à la fois au niveau des briques élémentaires telles les transistors ou les mémoires, au niveau de l'architecture des puces avec de nouveaux paradigmes comme le calcul dans la mémoire ou l'analogique, au niveau algorithmique et génie logiciel, au niveau du traitement de la donnée à la source et enfin au niveau système. Une démarche d'« écoconception » rassemble l'optimisation énergétique des composants et des systèmes;
- l'implication dans les normes, labels et méthodes du développement durable pour définir une échelle mesurant sobriété et frugalité d'une solution ainsi que son impact environnemental;
- l'axe sociétal en lien avec les usages et le monde économique.



Nous avons lancé la thématique « électronique durable » au CEA-Leti avec l'Université Grenoble Alpes (projet NEED for IOT). Notre approche va des matériaux pour l'électronique aux systèmes et inclut les sciences humaines. Elle se décline sur un nombre croissant de projets internes et collaboratifs.

Thomas ERNST

NUMÉRIQUE AU SERVICE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



Je travaille sur la caractérisation des batteries par des techniques Grands Instruments. Nous recueillons des téraoctets de données qu'il faut corrélérer avec des méthodes basées sur l'IA, en lien avec la modélisation multi-échelle. Les résultats permettent de décrire l'évolution des matériaux et l'impact sur les performances.

Sandrine LYONNARD



Nous développons de nouveaux BMS (Battery Management Systems) intelligents en associant des algorithmes de gestion innovants, basés modèle et adaptés aux usages et des capteurs intégrés avec des composants d'électronique embarquée optimisée. Ces BMS peuvent améliorer la performance, la sécurité et la durée de vie des batteries d'un facteur 2.

Séverine JOUANNEAU

Passage d'un système énergétique centralisé à un système distribué, intégration des énergies renouvelables intermittentes... la transition énergétique impose de relever de nombreux défis. Le numérique propose de précieux outils pour y parvenir.

Le numérique permet de fournir les outils pour gérer la complexité apportée par la transition énergétique en passant d'un système énergétique centralisé à un système distribué et intermittent tout en orchestrant le foisonnement des productions et des consommations d'énergie. La propulsion électrique pour les transports nécessite une optimisation de l'électronique de puissance et de contrôle. Parallèlement, l'intégration des énergies renouvelables intermittentes aux réseaux a besoin d'une conversion performante et d'un contrôle de stabilité. Ces applications appellent des composants énergétiques nucléaires et renouvelables augmentés par le numérique pour « faire plus et plus longtemps », des réseaux augmentés par le numérique pour « faire autant autrement » et un numérique sobre au service de l'efficacité énergétique – pour « faire plus avec moins de matière et d'énergie ».

Le diagnostic et le pronostic des composants énergétiques doivent être maîtrisés pour en assurer le pilotage optimal, à travers les capteurs, leur intégration, l'électronique de traitement, la modélisation et les traitements embarqués en temps réel. Les améliorations de rendement ont un impact majeur sur l'économie de ces systèmes. Le numérique est attendu à tous les niveaux : composant, architecture du système de conversion, système de gestion intelligent de type BMS ou EMS pour les batteries, pile à combustible, champ solaire, jusqu'au système de supervision et de contrôle du réseau local. Les champs de recherche du CEA comprennent ainsi :

- **les briques énergétiques « augmentées »** : au-delà du « composant », il s'agit d'appliquer des algorithmes basés données et basés modèles pour le diagnostic, le pronostic et le pilotage des briques. Les travaux portent sur la réduction de modèles pour le temps réel, l'évolution vers des briques plus communicantes et sécurisées, l'intégration de nouveaux capteurs spécifiques associés à des traitements sobres et efficaces;

- **l'électronique de puissance et de pilotage des moteurs électriques** : l'objectif « Green Electronics » impose des convertisseurs de puissance à très haut rendement, de forte densité de puissance et présentant une flexibilité accrue grâce au pilotage numérique. Les semi-conducteurs *grand gap* ont un rôle essentiel dans cette rupture avec le GaN et le SiC. Pour diminuer drastiquement les pertes dans les convertisseurs, le CEA travaille à la maturité technologique de ces composants pour les rendre compétitifs par rapport au silicium. L'autre rupture visée, plus lointaine, utilise le diamant comme semi-conducteur de puissance;
- **l'intégration des convertisseurs** : l'objectif est de multiplier par 10 la densité des convertisseurs à l'horizon de 10 ans grâce à une fréquence de fonctionnement très élevée qui permet la réduction de la taille des composants passifs et un contrôle commande en rupture pour le pilotage des convertisseurs *grand gap*;
- **les architectures modulaires et multi-niveaux pour le stockage et la conversion d'énergie pour les réseaux multi-vecteurs** : il s'agit de développer des standards de convertisseurs haute performance pour des architectures modulaires et multi-applicatives, grâce à un contrôle optimal et du hardware adapté pour effectuer le couplage entre la conversion d'énergie et les systèmes de stockage;
- **les réseaux énergétiques intelligents** : pour rendre interopérables et faire évoluer les outils existants et mutualiser des fonctions génériques telles que le traitement des incertitudes ou les méthodes d'optimisation. A plus long terme, un axe de recherche porte sur les méthodes numériques avancées destinées à amplifier les approches d'optimisation et de pilotage, à investiguer de nouvelles voies en rupture de modélisation et de conception de réseaux d'énergie par la criticalité auto-organisée.



Dans le cadre du programme EER, le projet TRILOGY vise à développer une plateforme de simulation de réseaux énergétiques multi-vecteurs (réseau électrique, chaleur, gaz), intégrant les méthodes et outils disponibles au CEA pour traiter des situations multi-échelles depuis le composant élémentaire jusqu'au niveau national global.

Stéphane SARRADE



Nous travaillons sur les composants de puissance en nitrure de gallium, et avons démontré des gains en rendement de conversion, en volume des modules, en coût, avec des chargeurs, onduleurs et convertisseurs performants, une révolution pour le véhicule électrique, l'aéronautique, et les produits de grande consommation.

Jean-René LEQUEPEYS

NUMÉRIQUE POUR LA SANTÉ



A Clinattec, nous concevons des thérapies innovantes pour les maladies neurodégénératives. Pour optimiser l'efficacité de ces thérapies, nous utilisons des méthodes ultra-performantes d'imagerie et de profilage moléculaire. Ces études génèrent des avalanches de données qui nécessitent des approches computationnelles dédiées pour leur analyse.

Virginie BRUN



Mon laboratoire développe des systèmes pour la santé. Avec la start up Diabeloop, nous avons développé un pancréas artificiel dans lequel nos algorithmes déterminent de façon personnalisée les doses d'insuline à injecter au patient diabétique. Sa commercialisation est en cours en France et à l'international.

Aurore LEPECQ

L'exploration du vivant génère une quantité de données complexes que les outils développés au CEA permettent d'analyser afin de proposer une médecine personnalisée. Le numérique contribue à améliorer l'efficacité des soins et l'innovation organisationnelle en santé.

Le numérique devient déterminant dans l'exploration du vivant et l'organisation des soins.

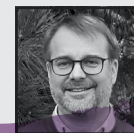
- **les capacités d'exploration du vivant** couvrent toutes les échelles depuis les molécules jusqu'aux populations, en passant par les organes en fonctionnement. Elles révolutionnent la biologie et la médecine, avec les omiques, l'imagerie, et plus généralement l'exploitation des données biologiques multi-échelles spatio-temporelles. La complexité des données nécessite des traitements informatiques et des approches biologiques innovants, très avancés au CEA avec les travaux à NeuroSpin, les premiers projets multi-omiques comme le couplage des omiques avec l'imagerie cérébrale pour les maladies neurodégénératives ou encore les jumeaux numériques d'imagerie en tomographie par émission de positons intégrant le patient numérique et le système de détection. Le couplage de bases de données riches et robustes et des supercalculateurs du CEA permet d'envisager des traitements davantage personnalisés, soit en rapprochant les données d'un patient de celles contenues dans ces bases de données, soit en développant un jumeau numérique du patient dont la trajectoire temporelle sera guidée par l'analyse des données. C'est l'un des enjeux du projet de plateforme numérique dédié à l'innovation en santé N4HCloud.

Au-delà des approches de bio-informatique, le développement du calcul embarqué dans les instruments augmente sensiblement les capacités d'exploration du vivant. L'analyse omique par IA en est un exemple, tout comme l'IA embarquée dans les nouvelles générations de détecteurs de positons.

- l'apport du numérique permet d'améliorer **l'efficacité des soins** en automatisant de nombreuses tâches dévolues aux soignants, en optimisant le « parcours patient », en renforçant les liens avec la médecine de ville et en développant des dispositifs médicaux plus performants. Il fait appel à une large palette technologique, depuis la virtualisation jusqu'à la robotisation en passant par toutes les technologies de l'électronique et des

logiciels, pour les dispositifs médicaux et les assistants numériques personnels, avec des capteurs toujours moins invasifs et des dispositifs de transmission à très faible consommation. Les essais cliniques ont par exemple démontré la large supériorité d'une puce apprenante pour la délivrance du traitement de maladies chroniques, dans le cas du diabète. Ainsi, le CEA est en mesure de contribuer à l'innovation organisationnelle en santé en rapprochant les communautés médicales, de la recherche et de l'industrie comme dans les écosystèmes de Grenoble, Toulouse et Saclay avec les initiatives Hub4AIM, Innov'Pole Santé et PASREL. L'IA de confiance, la cybersécurité et la robotique sont des technologies clés à cet effet : assistance à la décision médicale en réunion de concertation pluridisciplinaire, analyse sémantique du système d'information hospitalier, projet de cobot en chambre d'hospitalisation.

Enfin, les synergies entre la transition numérique et la révolution biologique sont prometteuses, ce qui amène le CEA à travailler sur le dispositif médical à composante biologique. L'organoïde sur puce mariant la microélectronique, la microfluidique et les bio-technologies comme la maîtrise des cellules souches et de la fabrication de tissus biologiques est un des projets majeurs du CEA dans ce domaine.



Nous travaillons au développement de méthodes statistiques permettant d'intégrer nos analyses métabolomiques à d'autres types d'approches en vue d'améliorer les performances des signatures moléculaires en vue d'une future utilisation médicale.

Christophe JUNOT



Le département que j'anime élucide les mécanismes d'apparition des maladies en identifiant les variations génétiques qui en sont responsables, par l'analyse d'un grand nombre de patients et une modélisation multi échelles basée sur l'innovation permise par l'IA et la puissance du calcul à haute performance.

Jean-François DELEUZE

USINE ET INSTALLATIONS DU FUTUR



Le laboratoire dont je suis responsable travaille sur le développement et la validation d'outils numériques de simulation des procédés de fabrication additive afin de pouvoir optimiser les paramètres de fabrication pour de meilleures propriétés mécaniques de la pièce finale.

Séverine PAILLARD



Je travaille sur les restes de supernova. Mes recherches utilisent des observations spatiales en rayons X et des simulations numériques hydrodynamiques 3D. Les résultats obtenus permettent de diagnostiquer l'explosion, son évolution et son impact déterminant sur le milieu interstellaire.

Anne DECOURCHELLE

En travaillant sur la robotique, le jumeau numérique et la fabrication additive, le CEA participe à la transformation numérique qui bouleverse l'industrie manufacturière et les grandes installations. Avec au final, un gain en flexibilité et une meilleure qualité et traçabilité des produits.

La transformation numérique bouleverse l'industrie manufacturière. De la robotique à la réalité virtuelle ou augmentée, en passant par le traitement des données de production, tous les systèmes adoptent peu à peu les nouvelles technologies du numérique pour gagner en agilité et en flexibilité, améliorer la qualité et la traçabilité des produits. Les technologies numériques permettent la supervision fine de l'outil de production dans son ensemble, la (re)configuration rapide des moyens de production, leur robotisation ainsi que la collecte et le traitement des données. Le CEA développe des solutions comprenant des composants matériels et logiciels destinés au domaine de l'usine et des grandes installations scientifiques du futur, suivant trois technologies clefs du numérique qui viendront assister l'opérateur :

- **la robotique**, avec deux objectifs particuliers **(i)** la programmation intuitive pour rendre le robot de plus en plus autonome et **(ii)** la manipulation ou préhension intelligente :
 - ▶ IA pour la perception : améliorer la robustesse de l'IA pour la vision, et enrichissement sémantique et fonctionnel (stratégies de prises, fonctionnalisation des outillages...);
 - ▶ prise de décision en fonction du contexte : par exemple pour automatiquement reprogrammer une ligne de production en fonction de pannes et des disponibilités des agents;
 - ▶ programmation intuitive : pour ne plus avoir à « programmer le robot », mais simplement lui montrer une tâche que sa compréhension et son autonomie vont lui permettre de réaliser et lever ainsi le verrou du coût de la programmation des robots;
 - ▶ manipulation/préhension intelligente : grâce à l'amélioration de la vitesse d'exécution, de la dextérité ainsi que la robustesse de fonctionnement.
- **le jumeau numérique** pour interagir avec l'ensemble du système de production et contrôler finement les installations. Le jumeau numérique s'applique aux systèmes d'énergie élémentaires, à une installation, voire une usine ou un réacteur nucléaire. Les recherches du CEA répondent à une vision holistique s'efforçant de décloisonner les différentes étapes du cycle de vie : conception, mise en service, fonctionnement, évolution... en traitant 6 verrous :

- ▶ données et interopérabilité : collecte massive et distribuée de données fiables, sécurisées, sémantisées, et structurées pour élaborer les modèles du jumeau numérique;
 - ▶ représentativité : la simulation numérique, socle du jumeau, vise une fidélité accrue en utilisant le HPC ou le calcul embarqué, ainsi que l'intégration multi-physique et multi-échelles couplé au traitement et à l'analyse des données (capteurs, observations, expériences) dont le recours aux algorithmes d'IA, en substitut et/ou complément;
 - ▶ cycle de vie : jumeau numérique vivant tout au long du cycle de vie, couplant produit et process, apportant une vision globale et capitalisant sur toutes les étapes pour améliorer le processus de production ou de recherche;
 - ▶ conduite du changement : migration d'anciens systèmes et d'anciennes pratiques (par exemple la formation avec l'utilisation de dispositifs en réalité étendue);
 - ▶ capitalisation et gestion de la connaissance : outils de mise au point du jumeau numérique plus intuitifs, passant d'une logique descriptive à une logique d'aide à la structuration des connaissances, et à la résolution des problèmes de production;
 - ▶ problématique énergétique et carbone : fournir des outils de mesure, de modélisation et de simulation permettant de construire le jumeau carbone d'un produit.
- **la fabrication additive** permet de gagner en vitesse et en agilité en s'appuyant sur une fabrication sur demande et une organisation logistique permettant la minimisation des stocks et la livraison à temps de produits en série et sur mesure :
 - ▶ monitoring en ligne de la fabrication (des centaines d'informations recueillies pour chaque pièce fabriquée) pour s'assurer de la qualité des pièces, détecter d'éventuels artefacts, mettre en place des stratégies correctives en temps réel afin d'atteindre les objectifs de qualité et mieux comprendre le procédé pour le faire progresser;
 - ▶ déploiement de stratégies de qualification des procédés inspirées de l'aéronautique et du médical;
 - ▶ automatisation des étapes, incluant le post-traitement des pièces (dépoudrage, polissage, finition) pour aboutir aux pièces finales sans étape limitante et de manière reproductible;
 - ▶ chaînage numérique des outils numériques de conception, de simulation du procédé de fabrication et de l'usage, afin de pouvoir anticiper dès la conception les contraintes de fabrication sur la pièce finale, de valider virtuellement l'usage et de réaliser des itérations rapides jusqu'au produit final.



Mon département apporte les connaissances dans la maîtrise rhéologique des poudres, en s'appuyant sur des techniques de caractérisation et par l'utilisation d'outils de simulation assurant le contrôle des procédés de fabrication additive, participant à une solution « pièce certifiée en sortie de procédé ».

Chrystel DEGUET



Je travaille sur le robot interactif apprenant, mes recherches portent sur les méthodes de démonstration de réalisation d'une tâche en guidant le robot à la main.

Les résultats obtenus sont une grande facilité de programmation du robot permettant d'en démultiplier les usages.

Yann PERROT



Je suis responsable du Laboratoire Revêtements par Projection. Nous intégrons la CFAO Robotique aux technologies de dépôt par projection thermique et

pneumatique. Les résultats modifient le périmètre des applications (construction 2D, 3D) avec des temps réduits entre le concept et la fabrication.

Emmanuel HERVE

CYBERSÉCURITÉ



Je suis responsable du Centre d'Evaluation de la Sécurité des Technologies de l'Information. Grâce à sa maîtrise des attaques et aux outils développés en interne, ce laboratoire réalise des évaluations sécuritaires (circuits, cartes à puce...) au meilleur niveau de l'état de l'art mondial.

Anne FRASSATI



Je travaille sur le développement de protocoles de cryptographie reposant sur des principes quantiques et offrant des garanties de sécurité sans précédent. Nous utilisons massivement des techniques d'optimisation convexe et des techniques d'apprentissage machine.

Nicolas SANGUARD

Afin d'améliorer la résistance des systèmes critiques aux cyberattaques, le CEA développe des composants de confiance conçus pour être plus résistants et résilients, ainsi que de nouveaux outils pour augmenter la compétence en cybersécurité de leurs utilisateurs.

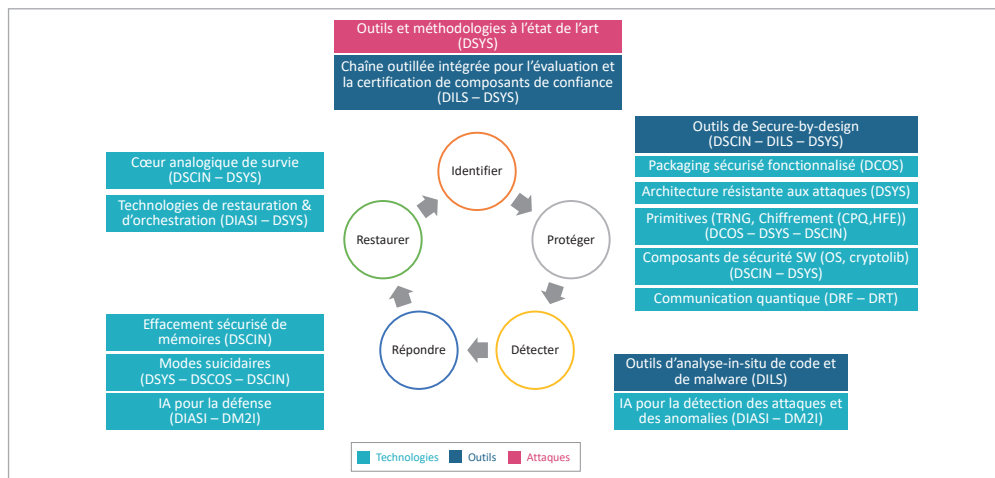
Les systèmes numériques sont confrontés à des attaquants de mieux en mieux armés, disposant de moyens de plus en plus importants. Les objets industriels connectés (l'interconnexion massive d'équipements et d'objets connectés augmente d'autant la vulnérabilité de ces infrastructures), les infrastructures critiques (qui permettent de produire les biens et d'assurer les services essentiels à la nation), et les nouveaux services numériques qui assurent le fonctionnement et la résilience de la société (logistique, commerce en ligne, vote électronique...) font ainsi face à des cybermenaces croissantes.

La sécurisation des secteurs critiques nécessite des composants de confiance, conçus pour être plus résistants et résilients, et de nouveaux outils qui augmentent la compétence en cybersécurité de leurs utilisateurs, pour leur permettre d'acquérir la capacité de « cybercentaures ». Ces nouveaux outils permettront d'automatiser et de fiabiliser les actions de conception, de validation et de maintien en condition de sécurité des systèmes critiques et infrastructures sensibles.

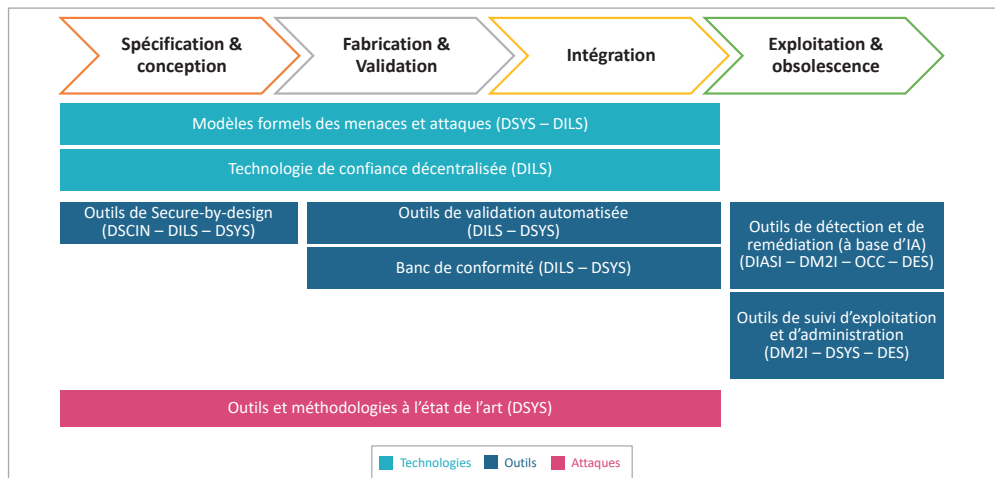
L'ambition du CEA est de devenir un centre de compétence à visibilité mondiale en technologies et outils pour sécuriser les composants clés des industries de sécurité et de la défense (IA, connectivité, calcul massif) :

- primitives de sécurité et briques technologiques (logiciel, matériel) ;
- outils d'analyse de la sécurité.

Cette ambition impose d'être capable d'apporter des solutions aux enjeux de résistance des systèmes critiques : défaillances (sûreté), malveillances (sécurité), effritements et chocs (résilience), en abordant le composant comme une « infrastructure critique » devant être capable de se défendre et de s'adapter constamment aux nouvelles situations. La figure suivante illustre l'approche prévue.

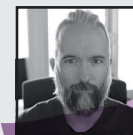


Le CEA développe en conséquence des outils adaptés durant tout le cycle de vie de l'objet (conception, exploitation, MCS) comme indiqué ci-dessous.



Je suis responsable du programme cybersécurité. La double expertise du CEA en numérique et cybersécurité opérationnelle lui permet d'être un maillon clé dans les grandes initiatives nationales et européennes, au service du développement d'une filière d'excellence et de la souveraineté nationale.

Bruno CHARRAT



Je suis responsable pour l'Institut List du domaine-clé de la cybersécurité : nos équipes sont reconnues en Europe et dans le monde pour nos approches très innovantes, permettant par exemple de protéger les données où qu'elles se trouvent, d'identifier des vulnérabilités cachées, ou encore d'automatiser les réactions aux intrusions.

Florent KIRCHNER



Une action malveillante sur un système industriel du CEA peut mettre en péril le fonctionnement d'une installation. Chargé de mission cybersécurité des systèmes industriels, j'assure la veille technique, la sensibilisation des exploitants et l'expertise en lien avec des organismes internationaux pour garantir la prise en compte de ces menaces.

Stéphane PEREZ

IA DE CONFIANCE IA EMBARQUÉE



J'évalue des méthodes d'apprentissage statistique, comme les régressions régularisées, sur leur capacité à prédire de façon fiable la part de risque génétique dans les maladies humaines complexes, dans un contexte de très grande dimension du génome humain.

Edith LE FLOCH



La mémoire est la source majeure de consommation énergétique liée à l'usage de l'IA. Le but de nos recherches est de créer des circuits constitués de mémoires résistives pour densifier les mémoires/synapses et les rapprocher du calcul. Ils seront capables de faire de l'IA en consommant beaucoup moins d'énergie.

Elisa VIANELLO

Le déploiement de l'intelligence artificielle impose de garantir la confiance des utilisateurs et de réduire la consommation des systèmes, grâce à des ruptures algorithmiques et technologiques par un traitement local des données et de nouvelles solutions matérielles et logicielles.

La première condition du déploiement massif de l'intelligence artificielle est d'en assurer la qualité, la sûreté et la sécurité pour établir la confiance des utilisateurs. Au-delà, les objectifs de consommation et de protection des données favorisent un traitement local, dans un objet connecté et intelligent : l'IA embarquée est supposée représenter à terme plus de 80 % des applications. Le CEA concentre ses efforts sur la double dimension confiance et embarqué. Ils couvrent les domaines suivants :

- algorithmes, des données aux technologies, pour la frugalité et la confiance par construction;
- formalisation, incertitude et qualification pour la caractérisation des performances et de la confiance;
- architectures de circuits;
- composants et technologies combinant la performance et la sobriété en embarqué.

Les sujets traités comprennent :

- explicabilité des algorithmes et démonstration de leur fiabilité (exemple : découverte constructiviste des modèles de classification et de décision machine où l'apprentissage est vu comme un ensemble de transformations successives et explicables de modèles déjà structurés);
- mise au point d'outils permettant un large déploiement des solutions d'IA;
- mise au point de processeurs dédiés à faible consommation, autorisant l'apprentissage local : calcul neuromorphique, architecture à Spike, visant à réduire de 2 ordres de grandeur la consommation par unité de traitement;
- conception de *neuronal processeur unit* avec des architectures hybrides intégrant des niveaux calcul, des réseaux de neurones et des matrices de capteurs.

Les solutions matérielles et logicielles développées au CEA visent les applications où la qualité et la performance de l'IA sont critiques : traitement de grandes masses de données, analyse de contenu, supervision intégrée de systèmes complexes (infrastructures, grands équipements), robotique intelligente, traitements localisés au sein de composants embarqués.



Je travaille sur un nouveau concept de processeur fondé sur l'utilisation de petits circuits appelés « chipelets » que l'on assemble pour former un système de calcul numérique à la fois performant, basse consommation et bas coût, représentant un avantage compétitif pour des startups en IA embarquée.

Denis DUTOIT



La maîtrise de bout en bout de la confiance et de la frugalité est un enjeu majeur de l'IA. C'est la force du CEA de travailler sur toute la chaîne, et d'intégrer ses avancées scientifiques et techniques des données, aux algorithmes et à l'implantation matérielle.

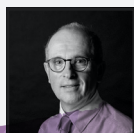
François TERRIER

SOLUTIONS MATÉRIELLES ET LOGICIELLES POUR LE CALCUL



Je travaille sur le dépôt de matériaux à changement de phase pour les mémoires PCRAM. Mes recherches portent sur l'élaboration de matériaux innovants pour supporter l'activité de recherche amont sur la physique de ces dispositifs jusqu'à l'intégration et l'implémentation industrielle.

Chiara SABBIONE



Chargé de mission « prospective HPC », j'assure veille technologique et expérimentations sur tous les éléments (GPU, quantique...) qui pourraient servir à concevoir et réaliser les prochaines générations de supercalculateurs nécessaires au bon déroulé des missions du CEA.

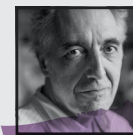
Guillaume COLIN DE VERDIÈRE

Le CEA contribue à la maîtrise de différents systèmes de traitement de l'information avec l'objectif de rester dans la course pour des éléments essentiels au fonctionnement des machines de calcul. Les développements principaux concernent 3 volets : technologique, architectures logicielles et matérielles pour le calcul et architectures pour les technologies quantiques.

Les processeurs de calcul forment le cœur du numérique. Leur distribution évolue en fonction d'une part des besoins croissants d'intelligence des objets, d'autre part des contraintes de temps de réponse et de consommation (*cloud* vs *local*). Le CEA doit contribuer à la maîtrise nationale des technologies de calcul, dans leur diversité :

- les architectures pour le HPC en vue des machines exascale;
- les nœuds avancés (10 nm et moins) en technologie basse consommation FDSOI pour l'automobile, la défense et les autres marchés européens;
- les mémoires non volatiles et de façon générale les nouveaux concepts permettant de réduire le coût énergétique des accès mémoires (*in memory computing*);
- les solutions permettant de densifier les circuits à finesse de gravure (et coût) constante, en utilisant l'intégration 3D, les chipelets sur interposeur, ou le calcul parallèle intégrant des couches logicielles de plus en plus efficaces et optimisées;
- la conception de circuits dédiés aux applications d'apprentissage profond, permettant d'optimiser à la fois les phases d'apprentissage en local et d'exécution, exploitant notamment des mécanismes neuromorphiques;
- la conception de circuits à haute performance pour des applications de souveraineté;

- enfin, de nouveaux paradigmes comme les nouveaux matériaux semi-conducteurs 2D, la spintronique ou le calcul quantique avec :
 - ▶ des machines LSQ, à base de qubits de spin sur silicium (objectif d'un prototype à 100 qubits en 2024, puis une machine opérationnelle >10 Mqubits avec code correcteur à l'horizon 2030);
 - ▶ des qubits supraconducteurs avec un potentiel de cohérence quantique supérieur à celui des qubits supraconducteurs actuels, notamment des spins couplés à des circuits supraconducteurs ou des qubits volants dans des gaz électroniques bidimensionnels;
 - ▶ les algorithmes et la pile logicielle.



Mon équipe Quantronique conçoit et réalise des circuits supraconducteurs couplés à des systèmes quantiques pour le traitement de l'information quantique. Nous avons démontré un processeur quantique élémentaire à base de jonctions Josephson, mais cherchons des systèmes avec une plus grande cohérence quantique.

Daniel ESTEVE



Je suis chef de laboratoire et expert en technologies et dispositifs CMOS sur FDSOI, sujet sur lequel j'ai travaillé de la recherche amont au CEA en utilisant la salle blanche 300mm, au transfert industriel chez STMicroelectronics (Crolles) et Globalfoundries (Dresde), où j'ai été détaché.

François ANDRIEU



Mes travaux concernent des architectures de calcul utilisant à la fois les avancées technologiques et des algorithmes efficaces. Une rétine « intelligente » — intégrant capteur et traitement en empilement 3D — et des accélérateurs IA pour des systèmes IoT à très faible consommation ont été réalisés.

Marc DURANTON

SYSTÈMES DE CALCUL DISTRIBUÉS COMMUNICANTS



Je travaille sur les réseaux et algorithmes distribués au cœur des blockchains. Ces algorithmes permettent aux utilisateurs de partager et de vérifier des données sans organe central de contrôle. Je m'intéresse à rendre ces algorithmes robustes aux cyberattaques à l'aide de mécanismes non-énergivores.

Sara TUCCI



Je développe des composants photoniques pour les communications quantiques en combinant simulation numérique et nanofabrication. Nous venons de découvrir la première source déterministe de photon unique dans le silicium et explorons l'intégration sur puce de détecteurs de photon unique.

Jean-Michel GERARD

A la faveur de besoins croissants en sécurisation et en frugalité des calculs complexes, la tendance est à la décentralisation de leur réalisation dans des systèmes distribués. Trois axes sont à l'étude au CEA : le quantique, les réseaux et les systèmes répartis.

L'augmentation du débit et la réduction de la latence des télécommunications vont se poursuivre, ouvrant la voie à l'hyper connectivité et à des applications majeures permises par la transmission instantanée de jumeaux numériques de grande précision (grâce notamment à la 6G). La décentralisation vers des systèmes répartis est une autre tendance forte, portée par les besoins de sécurisation et de frugalité. Elle nécessite une algorithmique tenant compte de la distribution des calculs et des données, une communication à très haut débit et grande fiabilité au sein du système distribué, une sécurité totale des données qui circulent, une tolérance aux pannes et défaillances locales.

Pour répondre à ces défis trois axes de recherches sont poursuivis au CEA :

- **les communications quantiques**

Les limitations actuelles - telles que la faible portée des liaisons fibrées ou la vulnérabilité des systèmes - dues aux imperfections des composants seront repoussées grâce :

- ▶ au développement de protocoles nouveaux permettant de garantir la confidentialité et la fiabilité des communications, avec un système de distribution de clé dit *device-independent*;
- ▶ à l'amélioration des performances de composants existants, notamment les sources déterministes de photons uniques et à l'exploration de nouveaux concepts comme les sources de paires de photons enchevêtrés en vue de la réalisation de relais efficaces pour les réseaux quantiques;
- ▶ à l'intégration sur une puce SOI de l'ensemble des composants photoniques nécessaires à la génération, manipulation et détection / mesure de photons uniques.

- **les réseaux et télécommunications**

L'objectif est de suivre l'évolution rapide des technologies des télécommunications

- ▶ développer une solution complète de bulle de connectivité pour accompagner le développement de la numérisation de l'industrie;
- ▶ démontrer la connectivité multicouches physiques (liens mmW très faible latence, lien IoT très basse consommation);
- ▶ préparer les solutions HW et SW pour la 6G.

- **les systèmes répartis**

L'objectif est de développer des nouvelles technologies distribuées pour la confiance décentralisée :

- ▶ les algorithmes de consensus et les mécanismes de cryptographie pour sécuriser les communications entre les objets et le système de stockage distribué;
- ▶ les ateliers de spécification, conception et validation qui permettent de fournir des solutions de confiance;
- ▶ la blockchain verte pour l'IoT / Edge;
- ▶ l'extension des technologies pour la confiance à des systèmes permettant d'établir des responsabilités certifiées, automatiquement intégrables aux blockchains ciblées.



Après avoir travaillé plus de 10 ans sur la 5G, une nouvelle ère se profile avec les premières études sur la 6G. Nous dirigeons nos réflexions sur des technologies alliant performance et sobriété. Notre objectif est de préparer les technologies matérielles de demain dédiées aux systèmes de communication.

Jean-Baptiste DORÉ

PERCEPTION NUMÉRIQUE, CAPTEURS AVANCÉS ET INSTRUMENTATION



Je travaille sur l'électronique de spin ; mes recherches utilisent de la microfabrication et des mesures de magnéto-transport et de bruit. Les résultats obtenus s'articulent autour de la compréhension de transport et bruit et permettent de réaliser des capteurs magnétiques de grande sensibilité.

Myriam PANNETIER LECOEUR



Nous travaillons sur les écrans interactifs et multisensoriels avec la technologie *smart pixels* qui permet une richesse colorimétrique inégalée.

L'apport de l'haptique transmet à l'utilisateur une sensation tactile à travers le contrôle fin des vibrations sur l'écran et recrée ainsi une illusion de toucher HD.

Moustapha HAFEZ

Essentiels dans de nombreux domaines, les capteurs innovants et les écrans font l'objet de recherches au CEA, qui s'investit essentiellement dans trois domaines : l'instrumentation scientifique, les interfaces Homme Machine et les capteurs industriels.

Les capteurs innovants sont essentiels à l'instrumentation scientifique, l'imagerie spatiale, aux applications quantiques, en passant par les neurosciences, le monitoring des gaz à effet de serre et la détection de rayonnements, comme aux produits numériques grand public et à la digitalisation des filières industrielles. Capteurs et écrans sont également au cœur de la perception numérique multisensorielle (vision, toucher, son ...) qui capte les informations d'environnement et d'activité de l'utilisateur pour restituer une information beaucoup plus riche et ciblée par le biais d'interfaces homme-machine avancées. Le déploiement d'un univers virtuel dual, sans couture, entre le domicile, le travail, la mobilité et le plein air progressera avec les capacités des composants de la perception numérique. Le CEA s'investit dans 3 domaines :

- **instrumentation scientifique**

- ▶ les capteurs quantiques dits « 2.0 » permettant d'utiliser directement les propriétés quantiques dans leur principe comme les détecteurs et sources de photons uniques et détecteurs de spins;
- ▶ d'autres types de détecteurs très sensibles, voire ultimes (détection d'objets élémentaires, de particules ou de photons uniques) et des instruments scientifiques intelligents.

- **interface Homme Machine (IHM)**

- ▶ combinaison de la visualisation et de l'émission, retour haptique et audio sur des écrans de toutes tailles, puis dans l'air;
- ▶ dynamique d'image et richesse colorimétrique avec les écrans immersifs basés sur les *smart pixels* à base de microleds;
- ▶ pixel multisensoriel (émission de lumière, mais aussi tactile et audio directif);
- ▶ génération automatique et affichage des informations adaptées en fonction des états émotionnels relevés et du contexte environnant.

● capteurs industriels

- ▶ **la vision** : imageurs (visibles, infrarouges, LIDARs, temps de vol) pour la mobilité autonome et la détection et traitements proches capteurs grâce à l'intégration 3D et au traitement par algorithmes IA évènementiels (neurones à spike); visualisation de données massives et hétérogènes;
- ▶ **le toucher** : perception de la texture, la température, les mouvements ou le poids des objets. Nouveaux algorithmes de traitement (retournement temporel, filtrage inverse) permettant un rendu haptique localisé de haute définition;
- ▶ **le son** : audible et ultrasons, chaîne de traitement du signal, du matériau jusqu'au système, telle que microphones et haut-parleurs surfaciques associés à des algorithmes de contrôle actif permettant de contrôler les vibrations sur une surface et de propager le son de manière directive, pour spatialiser le son;
- ▶ **capteurs sensoriels, capteurs comportementaux et de charge mentale** : reconnaissance automatique de gestes/postures et vidéo avatar. Capture des émotions (ou *affective computing*) à partir de capteurs d'images, de sons et de *wearables* physiologiques (montres, implants);
- ▶ **capteurs physiologiques** non invasifs pour les dispositifs médicaux;
- ▶ **capteurs ambiants** : à distance (images, sons, ondes radar ou acoustiques, gaz) et par propagation pour analyser l'état du sol ou la qualité de l'air);
- ▶ **fusion de données multi-capteurs** : synthèse de l'information provenant de dizaines de capteurs différents pour effectuer des traitements plus avancés et alimenter les IHM nouvelles générations, en réalisant automatiquement l'interprétation des données.



Je travaille sur les LiDARs (*Light Detection and Ranging*) pour développer une nouvelle génération de capteurs optiques de perception 3D permettant une architecture innovante : miniaturisé et robuste grâce à la photonique intégrée sur silicium. Des résultats prometteurs motivent la création dès 2022 d'une start-up grand lauréat i-Lab 2021.

François SIMOENS

Le numérique crée de nouvelles voies de développement de la science. Le CEA entend les exploiter au mieux en se dotant de plateformes dédiées à 3 vecteurs du numérique pour la science :

- **la conception numérique des matériaux** : la simulation multi échelle du niveau atomique au niveau macroscopique en passant par des échelles agrégées intermédiaires constitue une approche différenciante susceptible d'accélérer les ruptures dans des domaines comme la microélectronique, les énergies renouvelables, les matériaux pour le nucléaire et de façon générale tous les matériaux à propriétés physiques exigeantes. A cet effet, le CEA met en commun ses bases de données et ses modèles au sein d'une plateforme mutualisée de conception de matériaux;
- **le traitement de données** : les infrastructures de recherche et les nouveaux équipements de caractérisation produisent une masse de données complexes, souvent hétérogènes, que les laboratoires ne sont plus à même d'exploiter par les moyens classiques. De la recherche fondamentale à la recherche technologique, pour les matériaux, l'astrophysique, les grandes infrastructures, la santé, l'imagerie... le CEA a décidé de créer une plateforme mutualisée de collecte et de traitement des données qui fédère une communauté d'experts en vue de faire converger les données expérimentales et simulées, exploiter le maximum de données grâce aux algorithmes d'analyse et à l'intelligence artificielle, afin d'optimiser les procédés et la gestion des infrastructures, d'améliorer les performances de la simulation, de mieux comprendre les phénomènes physiques complexes en veillant au respect des orientations de la politique nationale et européenne de science ouverte tout en prenant en compte les enjeux de protection du potentiel scientifique et technique de la Nation;
- **le génie logiciel** : les pratiques de génie système et logiciel doivent évoluer pour améliorer la fiabilité des logiciels tout en réduisant leurs coûts de développement et facilitant leur maintenance, permettre leur réutilisation, et mutualiser les développements quand c'est possible. Afin de mener ses propres développements et ceux qu'il réalise avec des industriels, le CEA crée une plateforme pour l'innovation collective en ingénierie numérique. Deeplab sera capable d'interopérer avec les grandes plateformes ouvertes que des équipes du CEA utilisent déjà mais développera également en propre des services partagés, en s'appuyant sur des méthodes formelles de conception et sur l'IA.

La diffusion du numérique à l'ensemble des secteurs économiques bouleverse les chaînes de valeur ainsi que les modes de fonctionnement individuels et collectifs. Les perspectives ouvertes par l'IA, le déploiement de l'IoT créent de nouvelles opportunités, mais suscitent tout autant de réserves, de questionnements, voire de craintes. La puissance des réseaux en matière de diffusion de l'information, la capacité à traiter des données massives ainsi que l'impact environnemental du numérique pourraient remettre en question le modèle de fonctionnement de notre société. Ces questions ont déjà fait l'objet de plusieurs analyses au niveau national ainsi qu'à l'échelle européenne et internationale. Des mesures réglementaires sont en cours d'élaboration.

En tant qu'établissement public de recherche acteur de la transition numérique, le CEA entend se saisir de ces questions tant pour répondre aux aspirations des collaborateurs du CEA que pour jouer son rôle d'acteur socialement responsable. Les enjeux spécifiques aux travaux qu'il mène doivent être analysés en tenant compte des contextes interne et externe, afin d'évaluer l'impact de sa recherche et le cas échéant de proposer des mesures préventives.

Le CEA se dotera d'un comité opérationnel d'éthique sur le numérique, renforcera l'animation et le dialogue interne ainsi que la collaboration avec les SHS, s'interrogera sur sa participation au débat public, valorisera les activités de diffusion de la culture scientifique et technique, et investira de nouvelles formes de communication.



Il est important pour un organisme de recherche comme le CEA de s'interroger sur sa part de responsabilité dans la diffusion de nouvelles technologies comme l'intelligence artificielle, la 5G, la réalité augmentée, la cybersécurité... Notre rôle en tant que chercheur-citoyen est de nous projeter au-delà des domaines scientifiques et technologiques, en imaginant les applications et les usages que nos travaux rendent possibles. Notre mission de recherche et d'innovation doit ainsi être responsable et éthique, au service des enjeux humains, sociétaux et environnementaux.

Émilie VIASNOFF

VERSION FRANÇAISE p.3

ENGLISH p.30

FOREWORD



A significant portion of the research and development happening at the CEA is in service to the digital transition. In fact, these activities occupy a major position in the CEA strategy plan approved by the French government in May 2019. Not only will digital technology be crucial to addressing grand challenges like the energy transition and the medicine of the future, our sovereignty and prosperity will depend on how successful we are at ensuring broad access to these technologies across all subsegments of the economy and society.

In 2020 I initiated a review of our digital technology strategy, starting with an organization-wide inventory of our strengths, which we benchmarked against the world's other major research organizations. We also began to draw the contours of our digital technology research and development for the coming years. The idea was to identify the strategic research areas that would position the CEA to step fully into its role of supporting France's industrial economy while addressing the environmental and societal issues raised by the adoption of digital technology and maintaining the organization's scientific and technical depth.

Guiding the responsible implementation of digital technology and ensuring France's sovereignty on technologies vital to the nation's strategic independence and the resilience of its economy are no small tasks.

Our digital technology strategy sets forth our main research and development goals, of course. But it also outlines the resources we will deploy in service to this mission. Some of these resources will be used to generate synergies both within our organization and with our research partners, primarily in France and other European countries.

François Jacq
Chairman, CEA

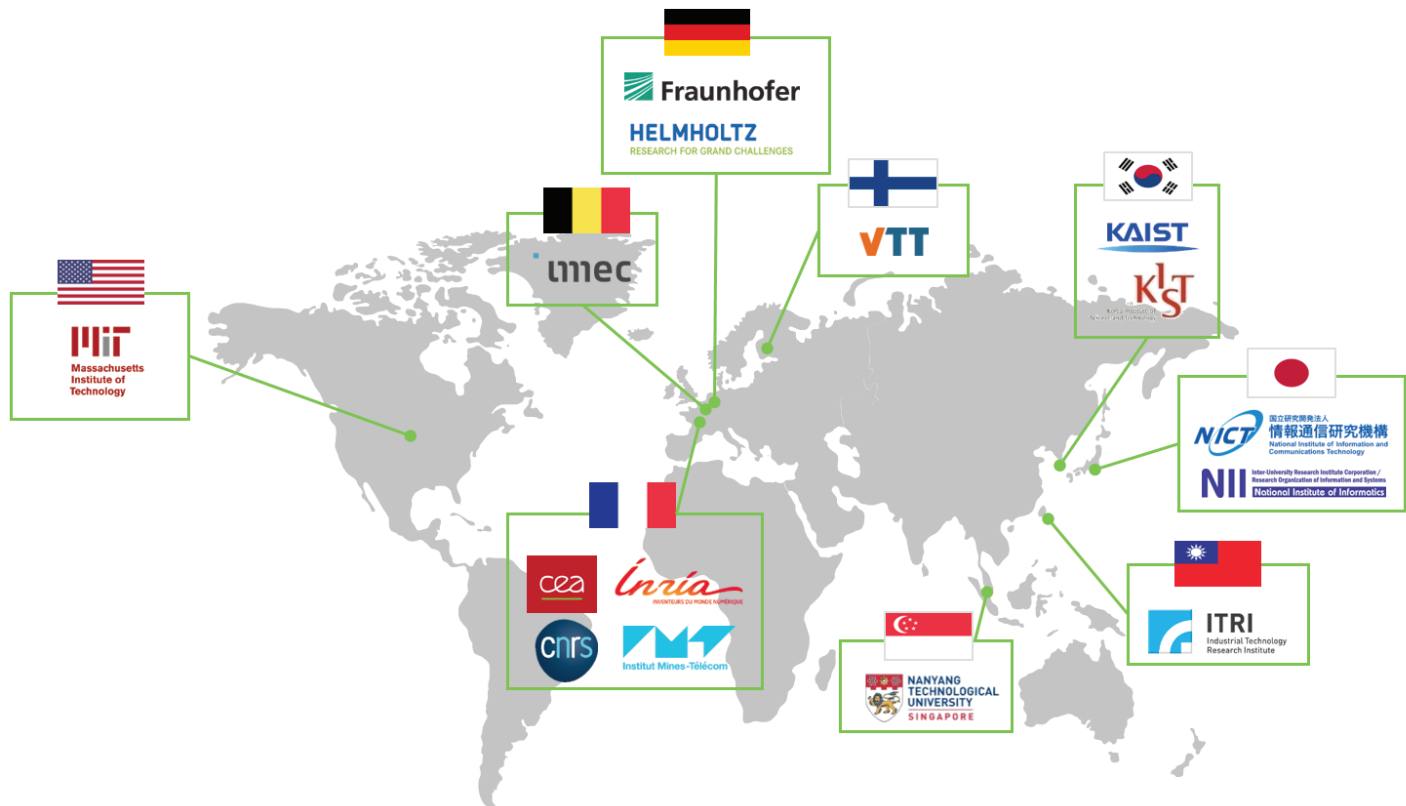
CONTENTS

The CEA's position in digital technology in France and internationally	33
The CEA in figures	34
The CEA's vision of the digital technology	36
The CEA's 9 strategic focus areas	37
• Sustainable, frugal digital technology	38
• Digital technology for the energy transition	40
• Digital technology for health	42
• The factory and infrastructure of the future	44
• Cybersecurity	46
• Trusted AI and embedded AI	48
• Hardware and software solutions for computing	50
• Communicating distributed computing systems	52
• Digital perception, advanced sensors, and instrumentation	54
Digital technology for science	56
Digital technology and society	57

THE CEA'S POSITION IN DIGITAL TECHNOLOGY IN FRANCE AND INTERNATIONALLY

The CEA is one of very few research and technology organizations in the world to combine world-class exploratory research, early-stage basic research aligned with technology roadmaps, technology research in close collaboration with businesses, and large scientific communities that co-develop and use beyond-state-of-the-art digital technologies.

The CEA holds a position of leadership among a cohort of fourteen other major research and technology stakeholders in the digital arena.



THE CEA IN FIGURES



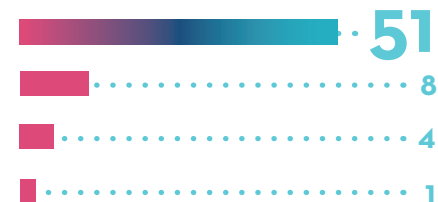
of the CEA's patent applications
concern digital technology



of the CEA's publications
concern digital technology



leading patent filer of the cohort
by total patents filed
over the past **3** years



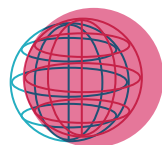
5th for publications, with over
59,100 publications from 2000 to 2019.
Scientific depth is one of the things that
distinguishes the CEA from the other European RTOs

The CEA has won **51** ERC
grants, compared to **8** for IMEC,
4 for Fraunhofer and **1** for VTT



Home to broad, deep digital technology research and development,
the CEA has built up a critical mass of:

3,000+ researchers investigating topics related to digital technology



50 digital technology R&D platforms

THE CEA'S VISION OF THE DIGITAL TECHNOLOGY



Our message is a simple one: Technology plays a key role in economic competitiveness, national sovereignty, and the welfare of our societies. The CEA, one of France's leading research and technology organizations, has assigned more than 3,000 scientists to tech projects. And, whether it is computing, robotics, medical technology, energy, or defense, we believe in our ability to bring many new and innovative technologies to science and business in the coming years. The good of our society and our planet are key factors in our efforts to develop more responsible, frugal technologies. We have the passionate, dedicated people, the level of scientific excellence, and the culture of creativity and collaboration to realize our ambition

**Stéphane Siebert •
Pascale Bayle Guillemaud**

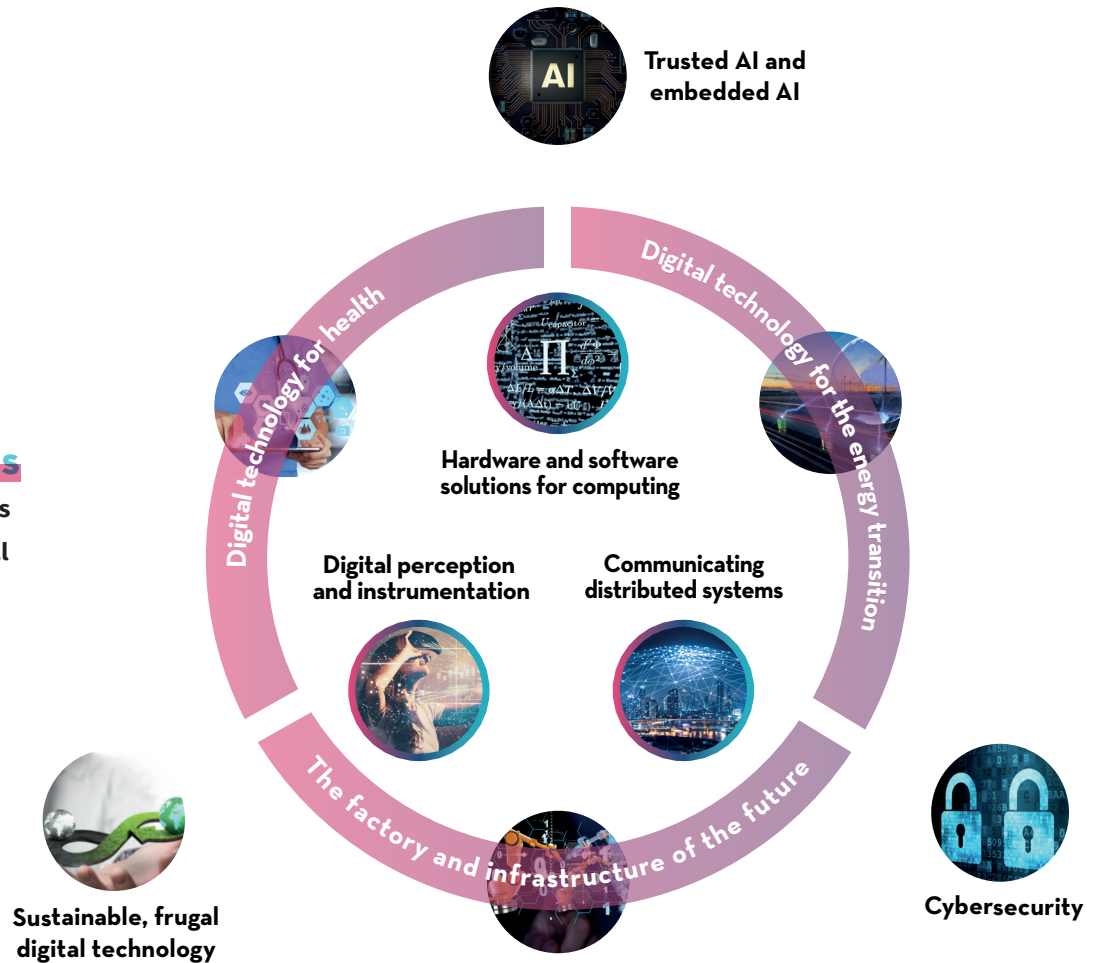
It is impossible to predict how digital technology will evolve. Major advances that seem to come out of nowhere are not new to the world of technology. But the contours of the digital future are visible and can and should inform our decisions.

- Whether people are at home or on the move, a seamless overlay of virtual elements onto the physical world will create an immersive experience.
- The interfaces between users and the virtual world will play a decisive role in making communication as simple and seamless as possible. Advances in voice, sensory, and even affective computing technologies will enable new input modalities far beyond what a keyboard can do. Displays will double in number and in size in the coming years. Tomorrow's screens will offer higher definition and brightness and lower energy consumption. They will be more affordable and will have multisensory capabilities.
- Digital technology will transform our homes, places of work, and factories. The energy transition will be digital.
- The Internet of Things, which will drive these transformations, will grow rapidly.
- Technologies like embedded (Edge) AI, cybersecurity, and digital twins will become pervasive and enable new use cases. We will have to demonstrate control of these technologies and ensure that everyone has access to them. Massive data analytics will become a key scientific research modality.
- The hardware infrastructure—sensors and processors—will play a vital role in guaranteeing national sovereignty amid international geopolitical tensions. Europe will need to step up to support the industries in which it is a leader and secure the long-term resilience of the supply chain. Computing will sprout new branches optimized for intensive computing, low-power embedded computing, artificial intelligence, and quantum computing. The main challenges of the next decade will include developing tightly integrated memory and computing—3D integration—and new semiconductor materials. Frugality will condition the development of these technologies, which will have to be sustainable. The CEA is particularly committed to responding to this imperative.
- Data security will be central to delivering digital services without sacrificing individual liberties.

THE CEA'S 9 STRATEGIC FOCUS AREAS



We conduct research in
9 strategic focus areas
around digital technology. Our goal is
to achieve national and international
excellence in all of them.



SUSTAINABLE, FRUGAL DIGITAL TECHNOLOGY



At the CEA, we feel strongly that frugal digital technology is one of the keys to sustainable development. We also believe that this is our responsibility as individuals and as an organization. Whether it is our phone and computer networks, our research programs, or anything else we do at work, we want everyone to help find new, more sustainable solutions.

Armelle Mesnard



I work in the field of spintronics, a combination of electron spin and conventional microelectronics. My research is on energy-efficient reconfigurable electronic circuits, which will play a major role in tomorrow's frugal digital technologies.

Lucian Prejbeanu

Limiting the environmental impacts of digital technology is now a major concern. At the CEA, we are tackling this challenge from all angles, from materials to components.

Digital technology is responsible for a growing share of the world's total energy consumption. If something doesn't change drastically, the situation will be untenable. The number of digital devices in use is expected to double between 2010 and 2025 on exponential growth of the IoT and embedded computing. Looking ahead, frugality will have to be a performance metric just like speed, processing power, miniaturization, and resolution. This represents a paradigm shift.

Around 30% of digital-technology-related energy consumption can be attributed to manufacturing. The rest occurs during use, and is divided among users (44%), networks (32%), and data centers (24%). Computers, TVs, smartphones, and IoT devices are the main culprits (in descending order) when it comes to energy consumption. Displays and processors are particularly energy hungry.

Cloud computing uses much more energy than local computing. This is due to the "extra" energy used to transfer data between computers. Therefore, developing local computing and limiting the transfer of raw data is the main route toward energy frugality. This is known as embedded, or Edge, computing. In the 80-year history of computing, energy consumption has already been reduced by a factor of fourteen; in the history of microelectronics, it has been reduced by around a factor of eight by optimizing microelectronic components for specific operations. But the time for incremental improvements has passed. To achieve frugality, breakthroughs that reduce energy consumption by several tens of percentage points are needed.

The pressure on materials—rare earth elements—is especially high. The challenge is to find alternatives to polluting, expensive, and scarce materials.

At the CEA, we address these challenges through our nine strategic focus areas. In terms of component manufacturing, we perform lifecycle analyses, limit the use of critical materials, seek out alternative materials, and design for reparability. We also implement low-power computing architectures and components, data network architectures, and distributed networks. Our activities are organized around three highly interdependent areas:

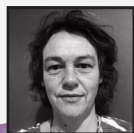
- Scientific and technological research to reduce overall energy consumption and the use of critical or polluting materials in digital technology solutions. Our research on potential technological breakthroughs to massively reduce energy consumption addresses basic technologies like transistors and memory, chip architectures with new paradigms like in-memory and analog computing, algorithms, software engineering, and processing data at the source, as well as system-level solutions. We use eco-design approaches to optimize components and systems for lower energy consumption.
- Contributions to emerging sustainable development standards, certifications, and methods. One objective is to create a scale to measure a solution's energy efficiency, frugality, and environmental impacts.
- Technology and society, with a focus on user-centered development and the needs of businesses.



A new project on IoT, NEED, in conjunction with Université Grenoble Alpes (UGA) brought sustainable electronics research to CEA-Leti. We are investigating everything from materials for electronics to systems and have integrated the social sciences into our research. We are now running increasing numbers of projects either alone or with partners on this topic.

Thomas Ernst

DIGITAL TECHNOLOGY FOR THE ENERGY TRANSITION



My work involves characterizing batteries on large instruments. The terabytes of data we are gathering need to be correlated using AI and multi-scale modeling. This tells us how the materials evolve and the impact of any changes on performance.

Sandrine Lyonnard



We are developing new smart BMSs (Battery Management Systems) using innovative, model-based algorithms adapted to different use profiles and integrated sensors with optimized embedded electronics. These BMSs can improve battery performance, safety, and lifespans by a factor of two.

Séverine Jouanneau

The shift from a centralized to a distributed energy system and the integration of intermittent renewable energy are just two of the challenges of the energy transition. Digital technology enables powerful tools that will support these transformations.

The complexity inherent to the energy transition—the shift from centralized to distributed and intermittent energy systems—can be managed using digital technology. Digital technology can also orchestrate the proliferation of energy producers and consumers. Electric propulsion systems for transportation will need optimized power and control electronics. High-performance power conversion and stability control solutions will be required to support the integration of intermittent renewable energy into the grid. These emerging use cases will depend on digitally augmented nuclear and renewable energy components to do more, longer. Energy grids enhanced by digital technology will help do just as much, but differently. And frugal digital technology will enable energy efficiency by doing more with less energy and raw materials.

Diagnostic and predictive solutions will also be required for optimized energy management. These solutions will be built on sensors, sensor integration technologies, chips, modeling, and real-time embedded computing. Better yields will also have a major impact on the economics of tomorrow's energy systems. Digital technology will bring improvements to components, conversion system architectures, and smart BMSs and EMSs for batteries, fuel cells, solar farms, and local grid supervision and control. Our research encompasses:

- **Augmented energy technologies** beyond discrete components, i.e., applying data-based and model-based algorithms for troubleshooting, forecasting, and management. Here our research focuses on model reduction for real-time computing, the move to secure technologies with enhanced communication capabilities, and the integration of new purpose-built sensors coupled with frugal, efficient processing.

- **Power electronics and electric motor control:** The transition to green electronics will require very-high-yield power converters offering high power density and greater flexibility—enabled by digital technology. Wide bandgap semiconductors—GaN and SiC—will be instrumental in achieving the necessary breakthroughs. We are bringing these technologies to maturity, both to drastically reduce converter losses and to bring costs down to a level where they can compete with silicon. Another breakthrough for power semiconductor devices—this one with a longer time horizon—is diamond.
- **Our converter integration research** is targeting tenfold converter density increases over the next decade. This will be made possible by very high operating frequencies and, therefore, smaller passive components, plus a breakthrough control system for managing wide bandgap converters.
- **We are developing modular, multi-level architectures for energy storage and conversion for multi-vector energy grids.** Here, our goal is to develop high-performance converter standards for modular and multi-application architectures. This will require optimal control solutions and hardware developed specifically for coupling energy conversion and storage systems.
- **In terms of smart grids,** the idea is to upgrade and bring interoperability to existing tools and to deploy generic functions like uncertainty management and optimization methods. Our longer-term research includes advanced digital methods to bolster grid optimization and management, and breakthrough grid modeling and design approaches based on self-organized criticality.



The TRILOGY project (part of the Energy Efficiency and Grids program) is developing a multi-vector (electricity, heat, gas) energy grid simulator built on CEA tools and methods. The goal is to address multi-scale scenarios from elementary component to national grid.

Stéphane Sarrade



Our work on gallium nitride power components has resulted in demonstrated conversion efficiency, module volume, and cost improvements on high-performance chargers, inverters, and converters. These advances will revolutionize electric vehicles, aeronautics, and consumer products.

Jean-René Lequepeys

DIGITAL TECHNOLOGY FOR HEALTH



Our Clinatec biomedical research center innovates therapies for neurodegenerative diseases. We are using ultra-high-performance imaging and molecular profiling to increase the efficacy of these therapies. We have also developed special computational approaches to analyze the massive amounts of data generated by these techniques.

Virginie Brun



My laboratory develops medical devices and systems. We worked with startup Diabeloop to develop an artificial pancreas for diabetic patients. It contains algorithms we developed to calculate the dose of insulin to inject. The product has been or will soon be released in France and internationally.

Aurore Lepecq

The exploration of living organisms generates large volumes of complex data. At the CEA we have tools that can analyze this data for the purposes of personalized medicine. Digital technology has the power to make medical care more efficient and drive organizational innovation.

Today it is almost impossible to imagine investigating living organisms or orchestrating patient care without digital technology.

- **Living organisms can now be explored at all scales from individual molecules to functioning organs to entire populations.** These technologies are revolutionizing biology and medicine, with advances in omics, imaging, and, more generally, the exploitation of biological data on multiple spatial and temporal scales. Because the data is so complex, innovative biological approaches and computing solutions are needed. At the CEA, our research in this area is very advanced. Our NeuroSpin lab, for example, is running its first multi-omics projects. These include using omics with brain imaging for neurodegenerative diseases and leveraging digital twins of positron emission tomography imaging integrating the digital patient and the detection system. Rich and robust databases combined with the CEA's supercomputers will enable more personalized treatment, either by comparing a patient's data with the databases, or by developing a digital twin of the patient, whose care over time will be guided by data analysis. The N4HCloud digital platform for innovation in healthcare will address this challenge.

In addition to bioinformatics, the development of instruments with embedded computing will significantly increase the capacity to explore living organisms. Two examples are AI-based omics and AI embedded in new generations of positron detectors:

- Digital technology can automate many of the tasks caregivers perform for **more efficient care**, optimize the patient pathway, strengthen ties with out-of-hospital practitioners, and aid in the development of more effective medical devices. The range of technologies involved is vast: Virtualization, robotization, electronics, software, medical devices, personal digital assistants, increasingly less invasive sensors, and very-low-power data transmission systems will all bring improvements. One example

is the use of learning chips to deliver treatment for chronic diseases like diabetes. Clinical trials have demonstrated the superior performance of this kind of solution. The CEA is also driving organizational innovation in healthcare. The innovation ecosystems in Grenoble, Toulouse, and Saclay are bringing the medical research and industrial communities together around the Hub4AIM, Innov'Pole Santé, and PASREL initiatives. Trusted AI, cybersecurity, and robotics will be key to enabling things like medical decision assistance in multidisciplinary consultation meetings, semantic analysis of the hospital information system, and cobots in hospital rooms.

Last, but not least, promising synergies between the digital transition and the biological revolution have spurred the CEA to address medical devices with biological components. The organoid-on-a-chip, which combines microelectronics, microfluidics, and biotechnologies like stem cell engineering and the fabrication of biological tissue, is one of the CEA's major focuses.



We are developing statistical methods to integrate our metabolomic analyses with other types of approaches to improve the performance of molecular signatures for future medical use.

Christophe Junot



The department I lead investigates the mechanisms that underpin the onset of disease. We analyze large numbers of patients and use multi-scale modeling enabled by AI and high-performance computing to identify the genetic variations responsible for disease.

Jean-François Deleuze

THE FACTORY AND INFRASTRUCTURE OF THE FUTURE



The lab I head develops and validates numerical simulation tools for additive manufacturing processes. The idea is to optimize the manufacturing parameters to obtain parts with better mechanical properties.

Séverine Paillard



My research focuses on supernova remnants. I use X-ray observations from space and 3D numerical hydrodynamic simulations to study the physics of supernova explosions, how they evolve, and their decisive impact on the interstellar medium.

Anne Decourchelle

The CEA's research on robotics, digital twins, and additive manufacturing is helping advance the digital transformation of the manufacturing industries and of major infrastructures. The rewards will be more flexible, agile production tools and better product quality and traceability.

Digital transformation is reshaping the manufacturing industries. New digital technologies are gradually making inroads into manufacturing, whether it is through robotics, virtual and augmented reality, or production-data processing tools. These advances are making production more flexible and agile while improving product quality and traceability. With digital technologies, an entire plant can be supervised in granular detail, production lines robotized and rapidly reconfigured, and data collected and processed. The CEA is developing solutions that include hardware and software for the factories and large research facilities of the future, with a focus on three key digital technologies to assist human operators:

- **Robotics**, with two objectives: intuitive programming for increasingly autonomous robots and smart gripping and handling.
 - ▶ AI for perception to enable more robust AI for vision, plus semantic and functional enhancements (grasping strategies, functionalized tooling).
 - ▶ Context-dependent decision making to automatically reschedule a production line according to equipment downtime and operator availability.
 - ▶ Intuitive programming, where robots will no longer need to be “programmed.” Instead, operators will simply “show” smart, autonomous robots what they want them to do. This will remove the programming-related cost barriers to the adoption of robots.
 - ▶ Smart gripping and handling will be enabled by faster execution, greater dexterity, and more robust operation.
- **Digital twins** to enable interaction with the entire production system and manage equipment in granular detail. Digital twins can mimic elementary energy systems, larger equipment, factories, and nuclear reactors, for instance. Our research is aligned with a holistic vision of the lifecycle and addresses design, commissioning, operation, and upgrades on a continuum, with the goal of overcoming six main technological challenges:

- ▶ Data and interoperability, with the massive and distributed collection of reliable, secure, semantic, structured data to build digital twins.
 - ▶ Representativeness, with higher-fidelity digital simulation, the foundation of the digital twin, using HPC and embedded computing, multi-physics and multi-scale integration, and data processing and analysis (sensors, observations, experiments), potentially using AI in addition to or instead of certain solutions.
 - ▶ The digital twin and the lifecycle, including both product and process to provide a comprehensive representation and capitalize on every step in the production or research process to make improvements.
 - ▶ Change management, with the migration of legacy systems and practices through activities like training using extended reality devices.
 - ▶ Knowledge capture and management to build more intuitive tools for developing digital twins and to move from a descriptive logic to a logic of assistance structuring knowledge and solving production problems.
 - ▶ Energy and carbon issues, with the development of measurement, modeling, and simulation tools to build the carbon twin of a product, for example.
- **Additive manufacturing** will enable on-demand manufacturing and just-in-time logistics, minimizing inventory and supporting the on-time delivery of both mass-produced and custom products, resulting in greater speed and agility.
 - ▶ In-line process monitoring, where hundreds of data points will be gathered for each part manufactured, will support quality assurance, artifact detection, real-time corrective measures to reach quality targets, and process improvements.
 - ▶ Implementation of process qualification strategies inspired by the aeronautics and medical industries.
 - ▶ Automation of process steps, including post-processing (dewaxing, polishing, finishing), to obtain final parts reproducibly and unfettered by the limitations of any particular process step.
 - ▶ Digital toolchains and simulation chains spanning manufacturing processes and product use to address impacts of manufacturing constraints on the final part from the design stage, validate product use virtually, and rapidly iterate up to the final product.



My department investigates the rheological control of powders using characterization techniques and simulation tools. Our goal is to help develop controllable additive manufacturing processes capable of producing certified parts with no post processing.

Chrystel Deguet



My research focuses on interactive learning robots and, specifically, how to show a robot how to do a task by guiding it by hand. Our work has made programming robots very easy, which means they can be used for an even wider variety of tasks.

Yann Perrot



I head up the spray coating lab. We use robotic CAD/CAM with thermal and pneumatic spray deposition techniques. The results we have obtained open up the scope of potential applications to 2D and 3D construction, for example, shortening the time it takes to get from concept to production.

Emmanuel Herve

CYBERSECURITY



I manage the IT security assessment center at the CEA. The center does security evaluations of chips and smart cards. We are at the international state of the art, with advanced knowledge of threats and our own proprietary tools.

Anne Frassati



My research focuses on quantum cryptographic protocols offering unprecedented levels of security. We are making massive use of convex optimization and machine learning techniques.

Nicolas Sangouard

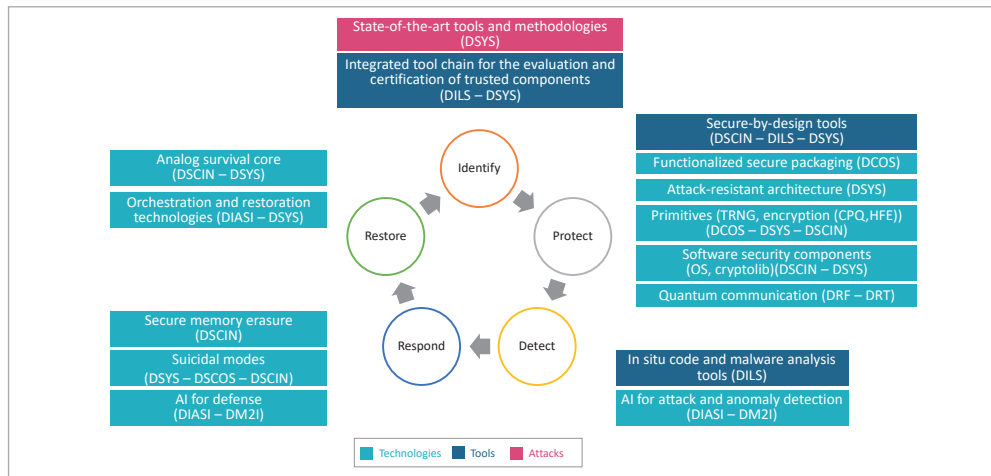
The CEA is developing trusted components designed to be more robust and resilient with the aim of improving ability of critical systems to withstand cyberattacks and new tools to help users improve their cybersecurity skills.

Cybercriminals are becoming increasingly sophisticated and have substantial resources at their disposal for attacking digital systems. Industrial IoT devices and the associated widespread interconnection of equipment and networks increases vulnerability to attacks. Critical infrastructures that support essential manufacturing and service activities and new digital services (logistics, e-commerce, online voting) that keep society running smoothly are also the objects of growing threats.

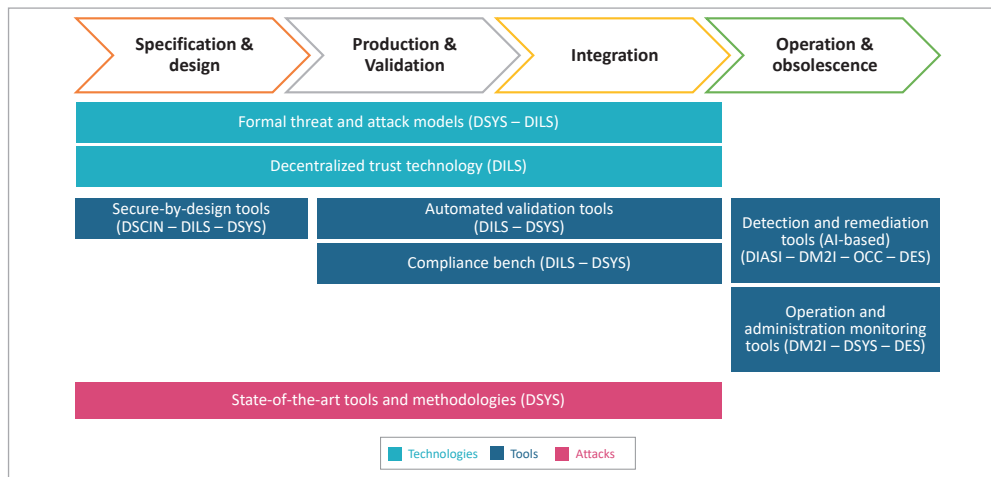
Trusted components designed to be more robust and resilient will be needed to secure these critical sectors. New tools to improve users' cybersecurity skills will also be required to enable a "cybercentaur" approach to security. Some tools will automate and improve the reliability of design, validation testing, and maintenance of critical systems and sensitive infrastructures. Here, the CEA's ambition is to become a world-class center for expertise in technologies and tools to secure the key components (IA, connectivity, massive computing) of the security and defense industries.

- Security primitives and basic technologies (software, hardware)
- Security analysis tools

To achieve this, we will have to be capable of delivering solutions that respond to the requirements of critical systems in terms of protection against failures (safety), malicious acts (security), and erosion and impacts (resilience) by treating the component as a critical infrastructure that must be able to defend itself and constantly adapt to new situations. The diagram on the next page illustrates the CEA's planned approach.

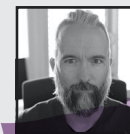


At the CEA, we are developing tools that address the entire object lifecycle from design to operation to cybersecurity maintenance.



I am responsible for the cybersecurity program. With deep knowledge of digital technology and operational cybersecurity, the CEA is poised to play a key role in major national and European initiatives to develop a top-notch cybersecurity industry and ensure national sovereignty in this area.

Bruno Charrat



I lead CEA-List's activities in the key field of cybersecurity. Our researchers have earned recognition not only in Europe, but around the globe, for their innovative approaches. Their advances help protect data wherever it is located, identify hidden vulnerabilities, and automate responses to intrusions.

Florent Kirchner



A malicious action against a CEA industrial system could jeopardize the operation of an entire facility. I manage cybersecurity projects to protect industrial systems. Part of my job is to stay up to date on the latest developments, educate operators, and work with international organizations to ensure that these threats are known so that appropriate measures can be taken.

Stéphane Perez

TRUSTED AI AND EMBEDDED AI



I am evaluating the potential of statistical learning methods like regularized regressions to reliably predict the genetic risk factor in complex human diseases.

My work is part of the much broader field of research concerning the human genome.

Edith Le Floch



When it comes to AI and energy consumption, memory is the biggest culprit. We are developing circuits with resistive memory to achieve denser memory/synapses and

bring memory and computing closer together. These circuits will be able to do AI with much lower power consumption.

Elisa Vianello

For artificial intelligence to be used widely, users will need to be able to trust it and system power consumption will have to be brought down. Local data processing and new hardware and software solutions built on disruptive new algorithms and other technologies will underpin the adoption of AI.

The first prerequisite to the massive rollout of AI is to guarantee a certain level of quality, safety, and security to gain users' trust. Power consumption and data protection will also need to be addressed. Processing data directly on smart connected devices will be the solution of choice. Ultimately, more than 80% of applications will use embedded, or Edge, AI. At the CEA, we are working on both trusted AI and embedded AI. Our research addresses:

- Algorithms, for everything from data to technology development, to achieve frugal-by-design and trusted-by-design AI.
- Formalization, uncertainty, and qualification for the assessment of performance and trust.
- Circuit architectures.
- High-performance, energy-efficient components and technologies for embedded systems.

Topics covered include:

- Algorithm explainability and proof of reliability (example: constructivist discovery of classification and machine decision models where learning is seen as a set of successive and explainable transformations of already structured models).
- Development of tools to enable widespread deployment of AI solutions.
- Development of dedicated low-power processors to enable local learning, i.e., neuromorphic computing and spike architecture to slash power consumption per processing unit twofold.
- Design of Neural Processor Units (NPUs) with hybrid architectures integrating different computational levels, neural networks, and sensor arrays.

The hardware and software solutions developed at the CEA target applications where AI quality and performance are critical. These include big data processing, content analysis, integrated supervision of complex systems (infrastructures, large equipment), smart robotics, and computing on embedded components.



I am investigating a new processor concept where small circuits called chiplets are assembled to form a digital computing system that is powerful, energy efficient, and low cost. This kind of solution could bring embedded AI startups a real competitive advantage.

Denis Dutoit



One of the major AI-related challenges that will need to be overcome is how to guarantee end-to-end trust and frugality. With scientific and technological advances in data, algorithms, and hardware implementation, the CEA is ideally positioned to address these challenges.

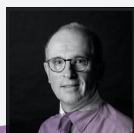
François Terrier

HARDWARE AND SOFTWARE SOLUTIONS FOR COMPUTING



My research focuses on the deposition of phase change materials for PCRAMs. Specifically, I am working on innovative materials used at every stage of PCRAM research and development, from early-stage research on the physics of PCRAMs to integration and scaleup.

Chiara Sabbione



I am leading a project to investigate future trends in HPC. There is a tech intelligence component to the project, and lab experiments on all of the elements (GPU, quantum) that could potentially be used to design and build the future generations of supercomputers that will be needed at the CEA to carry out our research.

Guillaume Colin De Verdier

One of the objectives of our research at the CEA is to stay in the race in terms of the essential elements of tomorrow's computers by developing our knowledge of different information processing systems. We are focusing on three areas: technology; software and hardware architectures for computing; and architectures for quantum technologies.

Digital technology cannot exist without processors. Increasing demand for devices with smart capabilities, lower latency (cloud vs. Edge), and lower energy consumption are driving processor sales. One of our roles at the CEA is to ensure that France does not depend on other countries for the vast array of computing technologies that exist:

- HPC architectures for exascale machines.
- Low-power FDSOI at advanced nodes (10 nm and below) for the automotive, defense, and other European markets.
- Non-volatile memories and, in general, new concepts for reducing the energy cost of memory access (in-memory computing).
- Solutions for denser circuits without increasing pattern resolution (and, therefore, cost): 3D integration, chiplets-on-interposer, and parallel computing built on more and more efficient and optimized software layers.
- Dedicated circuits for deep learning that leverage neuromorphic and other mechanisms to optimize local learning and execution.
- High-performance circuits for applications deemed critical to national sovereignty.

- New paradigms like new 2D semiconductor materials, spintronics, and quantum computing, with:
 - ▶ Large-scale quantum machines based on silicon spin qubits; the CEA's target is a 100-qubit prototype in 2024, and an operational >10 Mqubit machine with correction code by 2030.
 - ▶ Superconducting qubits with better potential for quantum coherence than current superconducting qubits; spins coupled to superconducting circuits and flying qubits in two-dimensional electron gases are two potential solutions.
 - ▶ Algorithms and the software stack.



My quantronics team designs and builds superconducting circuits coupled to quantum systems for quantum information processing.

Our elementary quantum processor using Josephson junctions has been demonstrated, but we are looking for systems with better quantum coherence.

Daniel Esteve



I am a CEA lab manager and expert in CMOS on FDSOI devices and technologies.

My research in this field has spanned early-stage research using the CEA's 300 mm clean room and tech transfer projects at STMicroelectronics (in Crolles, France) and Globalfoundries (in Dresden, Germany).

François Andrieu



My research focuses on computing architectures that leverage the latest technological advances and efficient algorithms. Some of our developments are a

smart retina using sensors and 3D stacked computing chips and AI accelerators for ultra-low power IoT systems.

Marc Duranton

COMMUNICATING DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS



I investigate distributed networks and algorithms based on blockchain. The advantage is that users can share and verify data without going through a third party.

I am interested in making these algorithms robust to cyberattacks using non-energy-consuming mechanisms.

Sara Tucci



In my research, I use numerical simulation and nanofabrication to develop photonic components for quantum communications.

We recently discovered the first deterministic single-photon source on silicon and are now investigating how to integrate single-photon detectors on chips.

Jean-Michel Gerard

In a context where complex calculations are increasingly being moved to distributed systems, ensuring that these calculations are frugal and secure is a growing need. At the CEA, we are exploring three areas: quantum, networks, and distributed systems.

Data transmission speeds will continue to increase, and latency will decrease. Better performance will enable hyperconnectivity, and the instantaneous transmission of high-precision digital twins (over 6G networks) will drive the emergence of new services. The shift away from centralized systems and toward distributed systems is another major trend, and one that will respond to demand for greater security and frugality. To navigate this change, algorithms capable of factoring in distributed computing and data, very fast and reliable communication within the distributed system, absolute data security, and tolerance for local failures will be required.

The CEA is conducting research in three areas to respond to these challenges:

- **Quantum communications**

Current limitations like the short range of fiber optic links and system vulnerabilities due to component imperfections will be addressed by:

- ▶ Developing new device-independent key distribution protocols to ensure the privacy and reliability of communications.
- ▶ Improving the performance of existing components, including deterministic single-photon sources, and exploring new concepts like entangled-photon-pair sources for efficient quantum network relays.
- ▶ Integrating single-photon generation, manipulation, and detection and measurement components on a SOI chip.

- **Networks and telecommunications**

Our objective is to keep up with rapid advances in telecommunications technologies to:

- ▶ Develop a complete connectivity bubble solution to support the digitalization of industry.
- ▶ Demonstrate multi-layer physical connectivity (very low latency millimeter-wave links, very low power IoT links).
- ▶ Lay the groundwork for tomorrow's 6G HW and SW solutions.

- **Distributed systems**

Here, we will develop new distributed trust technologies:

- ▶ Consensus algorithms and cryptographic mechanisms to secure communications between devices and the distributed storage system.
- ▶ Specifications, design, and validation workshops to provide trusted solutions.
- ▶ Green blockchain for IoT and Edge computing.
- ▶ Extending trust technologies to systems for establishing and certifying responsibility that can be automatically integrated into specific blockchains.



After more than a decade of 5G research, the first 6G studies are here, marking the beginning of a new era. We are focusing on technologies capable of delivering performance and frugality. Our goal is to do the early-stage research that will enable new hardware technologies for tomorrow's communication systems.

Jean-Baptiste Dore

DIGITAL PERCEPTION, ADVANCED SENSORS, AND INSTRUMENTATION



My research is on spin electronics and, specifically, using microfabrication and magnetotransport and noise measurements to gain a deeper understanding of transport and noise to support the development of high sensitivity magnetic sensors.

Myriam Pannetier Lecoer



Our research focuses on interactive and multisensory displays using a smart pixel technology that delivers unrivaled colorimetric richness. A haptic feedback technology based on granular control of vibrations on the display creates the illusion of HD touch.

Moustapha Hafez

Innovative sensors and displays are vital to many applications. The CEA is conducting research into three of them: scientific instrumentation, human-machine interfaces, and industrial sensors.

In terms of scientific instrumentation, sensors play a major role in space imaging, quantum computing, neuroscience, greenhouse gas monitoring, and radiation detection. They will be crucial to the digitalization of certain industries and are also found in a wide range of consumer electronics. Advanced human-machine interfaces will depend on sensors and displays. Multi-sensory (vision, touch, sound, etc.) perception systems will capture information about the user's environment and activity to provide enriched, personalized information. A seamless virtual environment that encompasses home, work, mobility, and the outdoors will emerge as digital perception components and capabilities improve. At the CEA, our research focuses on three areas:

- **Scientific instrumentation**

- ▶ Quantum 2.0 sensors designed around single-photon detectors and sources and spin detectors to directly leverage quantum properties.
- ▶ Other types of very sensitive (and even ultimate) detectors of elementary objects, particles and single photons, and smart scientific instruments.

- **Human-machine interface (HMI)**

- ▶ Combined visualization, transmission, haptic feedback, and audio feedback on displays of all sizes, and, ultimately, in the air.
- ▶ Image dynamics and colorimetric richness with immersive microLED smart pixel displays.
- ▶ Multi-sensory pixels (light, touch, directional audio).
- ▶ Automated generation and display of information depending on the emotional states detected and the context.

● Industrial sensors

- ▶ **Vision:** imagers (visible, infrared, LIDARs, time-of-flight) for autonomous mobility and detection, 3D integration for near-sensor computing, event-driven AI algorithms (spike neurons; visualization of massive and heterogeneous data).
- ▶ **Touch:** perception of texture, temperature, movement, and weight of objects. New processing algorithms (time reversal, inverse filtering) allowing high-definition localized haptic rendering.
- ▶ **Sound:** audible and ultrasonic; the signal processing chain from material to system (microphones and surface loudspeakers with algorithms to actively control vibrations on a surface and propagate sound directionally, to spatialize sound).
- ▶ **Sensory, behavioral, and mental load sensors:** automatic gesture/posture recognition and video avatars. Solutions to capture emotions from image, sound, and wearable or implantable physiological sensors (affective computing).
- ▶ **Non-invasive physiological sensors** for medical devices.
- ▶ **Ambient sensors:** remote (image, sound, radar, acoustic wave, gas) and propagation-based (soil or air quality analysis) sensors.
- ▶ **Multi-sensor data fusion:** automated interpretation and synthesis of information from dozens of sensors to enable more advanced calculations and new generation HMLs.



I am working on a new generation of optical sensors for 3D perception based on LIDAR (light detection and ranging) technology. By using silicon photonics, we were able to design an innovative miniaturized and robust architecture. The encouraging results obtained will lead to the creation of a startup in 2022 by the i-Lab 2021 innovation competition grand prize winner.

François Simoens

DIGITAL TECHNOLOGY FOR SCIENCE

Digital technology is enabling new scientific research modalities. The CEA's strategy is to leverage digital technology for science by creating platforms in three key areas:

- **Digitally enabled materials design,** with multi-scale simulation from the atomic to the macroscopic and including intermediate aggregate scales; this novel approach has the capacity to accelerate breakthroughs in fields like microelectronics, renewable energy, materials for the nuclear industry, and, in general, any field that requires materials with advanced physical properties. The CEA is consolidating its databases and models on a shared materials design platform.
- **Data processing:** The mass of complex and often heterogeneous data produced by research infrastructures and new characterization equipment cannot be exploited using conventional methods. The CEA will set up a shared data collection and processing platform for everything from basic scientific research to technology research in fields like materials, astrophysics, large infrastructures, healthcare, and imaging. A community of experts will be created around this platform to converge experimental and simulated data and apply analysis algorithms and AI to leverage as much of this data as possible. The goals are to optimize processes and infrastructure management, enhance simulation capabilities, and better understand complex physical phenomena. The platform will also ensure compliance with French national and European open science policies while protecting France's scientific and technological assets.
- **Software engineering:** System and software engineering practices must evolve to make software more reliable, bring development costs down, and make maintenance simpler; this means enabling reuse and sharing code whenever possible. The CEA has set up a collective innovation platform for digital engineering for its own development needs and those of its R&D partners. The platform, called Deeplab, will be interoperable with the large open platforms already used by CEA researchers. However, it will also develop its own shared services, based on formal design methods and AI.

DIGITAL TECHNOLOGY AND SOCIETY

Digital technology is making inroads into all sectors of the economy, disrupting value chains, and redefining how individuals and groups function. AI and IoT are creating new opportunities, of course. The responses to these technologies range from simple questions or concerns to outright fear. The dissemination of information, the capacity to process massive data, and the environmental impacts of digital technology could very well call the way our society operates into question. Governments in France, Europe, and around the world have already begun setting up committees and issuing reports. Legislators are drafting tomorrow's laws and regulations.

The CEA, a government-funded research organization engaged in the digital transition, will address these issues, not only to fulfill our commitment to social responsibility, but also because it matters to our employees. Throughout our organization, our people are being asked to assess and, if necessary, mitigate the impacts of their research. This means conducting an analysis of their work in its organizational and broader external contexts.

We will set up a digital technology ethics committee, strengthen internal coordination and communication, ramp up collaboration with the social sciences and humanities, review our role in the public debate, intensify our scientific and technical outreach efforts, and invest in new forms of communication.



When it comes to new technologies like AI, 5G, augmented reality, and cybersecurity, it is important for research organizations like the CEA to do some introspection about their responsibilities. As responsible scientists, our role is to think beyond our work in the lab. We have to look at the implications of our work, not only how our results will be used, but what will be made possible by our results. Responsibility and ethics must guide us in our mission of research and innovation in service to people, society, and the environment.

Émilie Viasnoff



2021