

08 LA REVUE DU CEA



Recherche à risque

AUDACE !



Au même titre que quatre autres organismes nationaux de recherche – le CNRS, l’Inserm, l’Inrae et Inria – le CEA s’est vu confier l’année dernière par l’État la coordination d’un programme dit de « recherche à risque », financé par France 2030 à hauteur de 40 M€ pour 2024 en collaboration avec l’ensemble de ses partenaires académiques. Baptisé « Audace ! », son objectif est de stimuler la créativité des chercheurs en leur permettant d’explorer des pistes inédites et d’imaginer les innovations en rupture de demain. Car comme l’a écrit en son temps l’auteur dramatique Crébillon père, « *le succès fut toujours un enfant de l’audace !* ».





« Un espace de ressourcement scientifique et intellectuel »



Éclairage croisé d'Anne-Isabelle Etievre, directrice de la recherche fondamentale (DRF), et Philippe Chomaz, directeur scientifique et des programmes de la DRF, sur « Audace ! », le programme de recherche à risque confié par l'État au CEA et mené avec les universités Grenoble-Alpes et Paris-Saclay.

La recherche à risque, tautologie ou vrai concept ?

Anne-Isabelle Etievre — Par essence, toute recherche est à risque dans la mesure où elle ne prédit pas son résultat, même si elle a, la plupart du temps, un objectif et une finalité assumés.

Sous l'impulsion du plan France 2030, différents programmes (PEPR, IHU...) ont vu le jour ; ils sont souvent disciplinaires et parfois très dirigés (en matière de budget, de critères, de temporalité...). Ceux que portent l'agence nationale de la recherche (ANR) en France et le Conseil européen de la recherche (ERC) en Europe requièrent également un début de preuve de concept. Cela réduit la prise de risque et la place pour une recherche réellement amont. Or, dans un organisme comme le CEA qui a une culture programmatique très forte, il est important de veiller à conserver cette part de recherche très exploratoire pour préparer les découvertes et les innovations de demain et d'après-demain.

Pourquoi mettre en place aujourd'hui des programmes de recherche à risque ?

A.-I. Etievre — La mise en place de ces programmes découle d'une volonté de l'État de soutenir également un espace de ressourcement scientifique et intellectuel aux côtés de ses autres initiatives, comme cela se fait déjà dans d'autres pays, par exemple depuis longtemps aux États-Unis au sein du Department of Energy (DOE) ou plus récemment en Allemagne.

L'objectif est de donner carte blanche aux chercheurs pour explorer des idées nouvelles, hors des sentiers battus, pour des recherches théoriques, expérimentales ou instrumentales, sans demande d'application sociétale et sans obligation de résultat, qui sont habituellement des critères importants dans les appels à projets.

En quoi ces programmes se distinguent-ils des autres ?

A.-I. Etievre — Ces programmes offrent un cadre innovant voulu par l'ANR : confier la gestion intégrale, y compris budgétaire, de ces programmes aux organismes de recherche qui ont été mandatés pour les mener à bien. L'objectif : privilégier l'agilité et la facilité de mise en œuvre, notamment

en allégeant drastiquement le reporting demandé. Sur la base du budget qu'il a reçu de l'État – 40 M€ pour le CEA – chaque programme finance ensuite, au forfait, les projets qu'il a sélectionnés et chaque projet est responsable de l'enveloppe dont il bénéficie via une simple lettre d'engagement.

Philippe Chomaz — Seul prime le suivi scientifique et technique des projets avec, à mi-parcours, un jalon unique mais critique dit de « Go/No Go ». Pour le dire clairement : soit le projet démontre qu'il est sur la bonne voie pour relever le défi qu'il s'est donné en passant ce jalon et il est poursuivi (« go »), soit il est réorienté voire arrêté (« no go »).

Comment décrire le programme « Audace ! » du CEA ?

Ph. Chomaz — Le CEA a organisé son programme autour de deux types de recherche. D'une part, des projets dits « structurants », financés sur quatre ans avec un jalon à mi-parcours, et qui représentent 80 % du budget du programme. D'autre part, des actions dites « d'amorçage » d'une durée plus réduite, qui encouragent l'émergence d'idées nouvelles, le test

de concepts originaux et qui pourraient devenir demain un projet structurant ou aller vers d'autres financements comme l'ERC, suivant les résultats obtenus.

Cette structuration est similaire de celle adoptée par l'INRAE et l'INSERM et se démarque un peu des programmes de recherche à risque de l'INRIA ou le CNRS, même si nous menons, tous, nos programmes pour l'ensemble de la communauté scientifique nationale, en nous coordonnant dans nos méthodes et nos approches.

Autre spécificité : le CEA a fait appel à sept experts de très haut niveau scientifique pour l'aider dans la sélection des projets et accompagner ceux retenus dans leur maturation et l'appréciation du « Go/No Go ». C'est une pratique qui tranche avec la simple évaluation par les pairs et elle est riche de très nombreux échanges.

Quelle est sa mise en œuvre ?

A.-I. Etievre — Bien que nouveau dans sa démarche, ce programme a reçu, dans un temps très court, un nombre élevé de propositions très intéressantes, aussi bien pour les actions d'amorçage que pour les



L'objectif est de donner carte blanche aux chercheurs pour explorer des idées nouvelles, hors des sentiers battus, pour des recherches théoriques, expérimentales ou instrumentales, sans demande d'application sociétale ni obligation de résultat. »

Anne-Isabelle Etievre, directrice de la recherche fondamentale (DRF)

projets structurants. Cela témoigne de la vitalité scientifique du CEA, ainsi que de ses partenaires académiques, et d'une vraie appétence!

Ph. Chomaz — La sélection des projets structurants et des actions d'amorçage s'est faite selon des processus distincts. Pour les actions d'amorçage, un appel à idées a été lancé et un premier filtrage a été confié aux directeurs d'unité des porteurs au CEA ou des établissements partenaires. Les propositions qui ont franchi cette étape ont ensuite été examinées par la gouvernance opérationnelle du programme, qui en a retenu 45 sur 157 (voir encadré). Pour les projets structurants, qui sont plus engageants car financés en moyenne à hauteur de 3 M€ chacun, les instituts du CEA ont été mobilisés pour faire remonter des propositions validées en termes de pertinence scientifique et de faisabilité technique. Une première sélection des projets jugés les plus prometteurs a été réalisée. Ces derniers ont ensuite, chacun, discuté de leur projet avec les experts de haut niveau puis ont présenté leur projet devant le comité de pilotage du programme. L'ensemble de ces étapes a



Le CEA a fait appel à sept experts de très haut niveau scientifique pour l'aider dans la sélection des projets et accompagner ceux retenus dans leur maturation et l'appréciation du "Go/No Go". »

Philippe Chomaz, directeur scientifique et des programmes de la DRF

permis de sélectionner 10 projets parmi les 35 proposés. Ces projets bénéficient de l'accompagnement des instituts au quotidien, un peu comme du compagnonnage, et de points de rencontre réguliers, notamment avec leur comité de suivi impliquant l'ensemble des tutelles impliquées.

Quels enseignements tirer de cette première phase? Quelles perspectives?

A.-I. Etievre — Cette première phase est un test. Nous devons faire la preuve de notre capacité à animer collectivement l'émergence de nouvelles idées, à travailler tous ensemble et non plus en vase clos.

Au CEA, nous nous réjouissons d'avoir vu émerger beaucoup de projets et de partenariats, bien au-delà de ce que nous avions imaginé. Les projets qui ont été retenus couvrent l'ensemble de nos domaines de recherche et sont menés en collaboration avec des partenaires académiques représentant plus de 80 établissements dans toute la France.

Une nouvelle dynamique a été initiée pour faire de la recherche un peu différemment. ●

Les actions d'amorçage

Financées chacune à hauteur d'environ 100 000 € sur 12 à 18 mois, les 46 actions d'amorçage retenues associent deux porteurs, l'un d'une unité associée au CEA et l'autre d'une unité hors CEA. Elles couvrent une large palette de domaines de recherche: énergies, technologies pour la médecine du futur, sciences numériques, sciences de la matière et sciences du vivant.

Explorer l'avenir

Dix projets structurants ont été sélectionnés dans le cadre du programme « Audace ! ». Couvrant tous les domaines de recherche du CEA, ils témoignent de la vitalité de nos équipes et de leur appétence pour explorer les frontières.

Déchiffrer le plissement cortical : prévenir des dysfonctionnements cérébraux

L'IDÉE

Déterminer si les motifs du plissement de la surface corticale, qui sont propres à chaque être humain comme ses empreintes digitales, recèlent un sens jusqu'à présent caché, une sorte de « langage », qui renseignerait sur les risques d'une future pathologie cérébrale.

LE DÉFI

Concevoir une IA dédiée à la découverte de ce langage, utilisant comme pierre de Rosette 100 000 IRM multimodales du cerveau humain à tous les âges de la vie et associées à des données génétiques, comportementales et cliniques, qui sont depuis peu accessibles à l'ensemble de la communauté scientifiques.

LE PROJET

Construire un dictionnaire de l'ensemble des motifs signifiant du plissement cortical, sorte d'« idéogrammes corticaux », dans la population générale pour identifier d'éventuelles anomalies architecturales locales dont la fréquence est notablement augmentée dans les pathologies neuro-développementales.

L'IMPACT POTENTIEL

Déceler très tôt des anomalies développementales du cerveau associées à certaines pathologies pour mieux évaluer les risques encourus par les sujets et permettre des prises en charges préventives précoces.



Santé

Poumon augmenté: mieux vivre avec un greffon



L'IDÉE

Donner plus de chances aux greffes pulmonaires de fonctionner durablement, en dotant ex-vivo les poumons de meilleurs gènes de résistance avant la transplantation.

LE DÉFI

Parvenir à maintenir un greffon de poumon en vie hors du corps suffisamment longtemps pour y intégrer par thérapie génique des gènes protecteurs.

LE PROJET

Développer une plateforme de perfusion de haute technologie pour alimenter un poumon en oxygène et en nutriments, tout en surveillant son état avec des capteurs intelligents. Objectif : allonger la durée de vie du greffon hors du corps de 4h à 24h, afin d'avoir le temps de le nettoyer et de lui transférer des gènes protecteurs.

L'IMPACT POTENTIEL

Diminuer les complications infectieuses qui touchent 35 à 60 % des patients transplantés. Augmenter la qualité et la résistance des greffons pulmonaires dont le rejet chronique concerne aujourd'hui 20 à 30 % des cas la première année et 50 % à cinq ans.

BRAINSYNC: aider le cerveau à réapprendre

L'IDÉE

Comprendre les mécanismes d'apprentissage et de prise de décision du cerveau, afin de concevoir des protocoles de réhabilitation de patients ayant subi un accident vasculaire cérébral (AVC) grâce à des IA innovantes et des neuroprothèses.

LE DÉFI

Développer des modèles innovants d'IA reflétant les circuits cérébraux d'apprentissage, tout en construisant en parallèle un atlas haute résolution par IRM 7T des relations entre les lésions cérébrales et le handicap qui viendra enrichir ces modèles et les adapter au réapprentissage moteur dans le cas d'un AVC.

LE PROJET

Cartographier avec précision les lésions corticales en lien avec les déficits moteurs des patients AVC pour décrypter le code neural des fonctions d'apprentissage et identifier des modèles prédictifs du réapprentissage moteur. À terme, proposer des approches de réhabilitation et de compensation personnalisée basée sur les neuroprothèses WIMAGINE et des IA innovantes.

L'IMPACT POTENTIEL

Faire progresser l'état des connaissances en neurosciences, répondre au besoin des neurologues de prédire le plus tôt possible la capacité de récupération des patients atteints d'AVC, et ainsi contribuer à l'émergence d'une interface cerveau-machine augmentée par l'IA pour la réhabilitation motrice.

AIR CAPTURE : **recycler le CO₂**

L'IDÉE

S'inspirer du vivant pour capter et convertir le CO₂ atmosphérique en carburants et produits chimiques carbonés, afin de proposer une solution efficace et économiquement viable de réduction de ce gaz à effet de serre dans l'air en le recyclant et ainsi éviter l'utilisation d'hydrocarbures fossiles.

LE DÉFI

Convertir un gaz (CO₂) à la fois inerte et extrêmement dilué dans l'atmosphère, qui est également mélangé avec des gaz très réactifs comme l'oxygène, pour produire des molécules carbonées dont notre économie a besoin.

LE PROJET

S'inspirer du métabolisme des plantes et de certaines bactéries pour développer des systèmes moléculaires pour le captage et la conversion du CO₂ atmosphérique, puis les tester en conditions réelles grâce à un banc d'essai dédié. Objectif : faire la preuve de concept d'un système intégré, efficace et durable pour le captage et la conversion du CO₂.

L'IMPACT POTENTIEL

Poser les bases d'une technologie contribuant à la neutralité carbone et permettant de produire les carburants nécessaires dans une société de l'après fossiles.

Aimants nanostructurés : **se passer de matières critiques pour la transition énergétique**

L'IDÉE

Élaborer une nouvelle génération d'aimants pour les secteurs des transports et de l'énergie, à partir de matériaux abondants et aux propriétés magnétiques remarquables obtenues par nanofabrication pour s'affranchir du recours aux matières critiques, les fameuses terres rares.

LE DÉFI

Explorer un nouveau concept d'aimants, avec le fer comme élément principal, en imaginant des méthodes inédites d'élaboration depuis l'échelle nanométrique et en repensant entièrement les techniques de synthèse.

LE PROJET

Élaborer des bâtonnets nanométriques à base de nitrure de fer (Fe₁₆N₂) – un composé abondant qui possède une aimantation particulièrement élevée sous cette forme. Les assembler, sans les dégrader, pour obtenir des aimants de taille macroscopique avec des performances rivalisant avec les meilleurs aimants permanents actuels à base de terres rares.

L'IMPACT POTENTIEL

Réduire notre dépendance aux terres rares ainsi que les impacts environnementaux associés à leur production.

Énergie

Numérique

Cybersécurité matérielle : le jumeau qui vous veut du bien

L'IDÉE

Evaluer la sécurité d'un composant électronique dès sa conception, et de façon précise, grâce à un jumeau numérique complet matériel et logiciel pour proposer des contre-mesures efficaces à des cyber-attaques avancées comme celles utilisant des lasers.

LE DÉFI

Gérer la complexité d'un système embarqué dans toutes ses dimensions - physique (matérielle), logique (microarchitecture) et logicielle ainsi que leurs interactions entre elles et leur environnement extérieur, dans un cadre où le nombre d'attaques à considérer est très important.

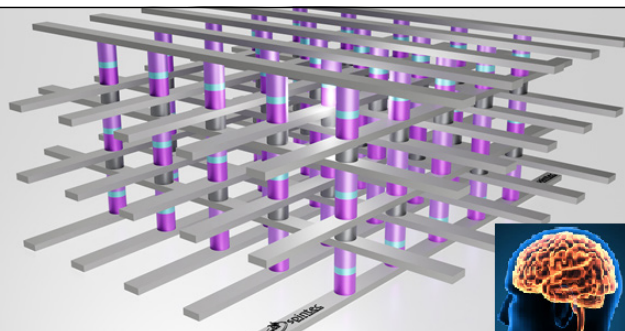
LE PROJET

Développer un jumeau numérique complet du composant en fonctionnement. Au niveau matériel, partitionner le système en différentes zones sensibles pour modéliser les effets réels du laser sur l'une d'entre elle. Puis propager les effets de cette attaque physique au niveau microarchitecture et logiciel, procéder à la vérification formelle des effets induits sur le fonctionnement du système afin d'en garantir la sécurité en parant toute défaillance.

L'IMPACT POTENTIEL

Contribuer à renforcer la sécurité des composants d'un système embarqué dès leur conception, en termes de robustesse et de prédictibilité en créant un premier outil de vérification sécuritaire et de prédiction comportementale.

APPRENTISSAGE-3D : révolutionner les systèmes d'IA



L'IDÉE

Utiliser la technologie spintronique pour réduire drastiquement le transport de données, donc la consommation d'énergie, en favorisant l'apprentissage local des réseaux neuronaux directement au sein d'une puce.

LE DÉFI

Exploiter un substrat matériel tridimensionnel inspiré du cerveau pour développer les premiers réseaux de neurones matériels auto-apprenants, capables d'optimiser leur propre fonctionnement en temps réel et à très faible consommation d'énergie, en tirant parti des propriétés uniques de la spintronique.

LE PROJET

Réaliser la première démonstration d'un réseau neuronal physique 3D entièrement fonctionnel en plusieurs étapes : développement de matrices de neurones spintroniques 2D interconnectées pour démontrer l'apprentissage *in-situ* ; démonstration de la reconfigurabilité et de l'auto-organisation des synapses artificielles ; empilement des réseaux 2D pour former la première architecture 3D fonctionnelle ; enfin, optimisation de l'apprentissage en temps réel et validation sur des tâches cognitives complexes.

L'IMPACT POTENTIEL

Ouvrir la voie à des systèmes IA extrêmement efficaces énergétiquement (d'un facteur mille par rapport aux architectures actuelles), capables d'apprendre en autonomie sans besoin de mises à jour massives des poids synaptiques, pour des applications en robotique, mobilité et systèmes embarqués.

Physique

LUMIÈRE : **photo-détecter sans bruit**

L'IDÉE

Détecter la lumière photon par photon avec une précision ultime et à la limite du bruit quantique pour des avancées en astrophysique ou en optique quantique.

LE DÉFI

Développer des photo-détecteurs innovants en contrôlant l'effet d'avalanche selon lequel un photon unique génère une cascade d'électrons

LE PROJET

Concevoir l'architecture des diodes à avalanche (APDs) à base de tellure de mercure-cadmium et développer les circuits de lecture CMOS associés en minimisant leur bruit dans l'objectif de démontrer leur capacité à détecter un photon unique sur une surface compatible avec un pixel pour l'imagerie.

L'IMPACT POTENTIEL

En métrologie quantique, augmenter la localisation de sources optiques ponctuelles, pour des applications allant de la microscopie à l'astrophysique. En information quantique, permettre la génération d'états de la lumière nécessaires pour l'avantage quantique de manière beaucoup plus efficace que ce qui a été obtenu jusqu'à présent.

Intrication Attoseconde : explorer les propriétés quantiques de la matière

L'IDÉE

Étudier et contrôler en temps réel les états et dynamiques quantiques des atomes, molécules et agrégats à l'échelle naturelle des mouvements des électrons, l'attoseconde (10^{-18} s).

LE DÉFI

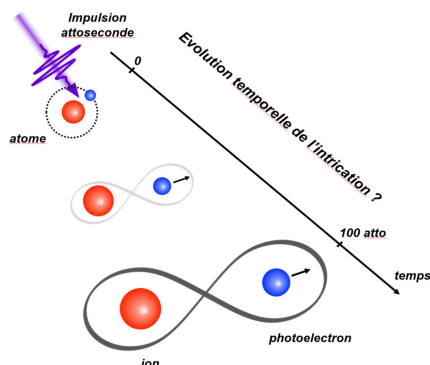
Combiner les outils théoriques et expérimentaux de la science attoseconde et de l'optique quantique pour mesurer la dynamique de l'intrication et de la décohérence à l'échelle attoseconde – soit à une vitesse de six ordres de grandeur plus rapide que ce qu'il est actuellement possible de faire.

LE PROJET

Étudier la dynamique de l'intrication entre un électron et un ion en trois étapes : préparer un état intriqué entre un électron et un ion à l'aide du processus quantique de photoémission attoseconde ; caractériser l'état quantique final de l'électron par tomographie quantique en superposant un champ laser intense qui servira de sonde ; reconstruire, à partir de cet état, toute l'évolution temporelle de l'intrication depuis les premiers instants, et identifier les moyens de la contrôler.

L'IMPACT POTENTIEL

Approfondir notre compréhension de la physique quantique en dévoilant les mécanismes sous-jacents à l'intrication et la décohérence au cœur de la matière, ce qui pourrait, à terme, se concrétiser par des applications technologiques dans le domaine de l'information quantique. Par exemple, permettre un traitement de l'information quantique plus efficace par un meilleur contrôle du nombre d'opérations réalisables en un temps de cohérence donné.



RMN ultra-rapide imager les solides et tissus à haute résolution

L'IDÉE

Réaliser des expériences d'imagerie haute résolution par résonance magnétique hyperpolarisée (RMN-DNP) de matériaux solides, tissus vitrifiés, synthétiques ou naturels comme les calculs rénaux ou les neurones.

LE DÉFI

Développer une approche de micro-imagerie par résonance magnétique à haute résolution d'un échantillon porté à température cryogénique et en rotation rapide (jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de tours par seconde) autour d'un axe particulier appelé angle magique tout en déployant une méthode de polarisation dynamique nucléaire (DNP) permettant d'amplifier le signal détecté de plusieurs ordres de grandeur.

LE PROJET

Concevoir une instrumentation de rupture utilisant un dispositif de cryogénie à l'hélium pour atteindre de très basses températures entre -230 et -250 °C, tout en réduisant le diamètre extérieur de la sonde de mesure avec son isolation innovante. Puis, mettre au point la méthodologie de mesure, de préparation des échantillons et de traitement des données.

L'IMPACT POTENTIEL

Imager des échantillons millimétriques de matériaux solides ou de tissus vitrifiés à une résolution spatiale micrométrique avec un contraste chimique inégalé pour des applications allant des sciences du vivant à l'énergie. Plus largement, contribuer au développement de la spectroscopie RMN ultra-rapide.

Le CEA fête ses



en 2025.

Notre recherche
prépare les
technologies
de demain.



*Découvrez notre histoire
et le programme
des événements ici.*