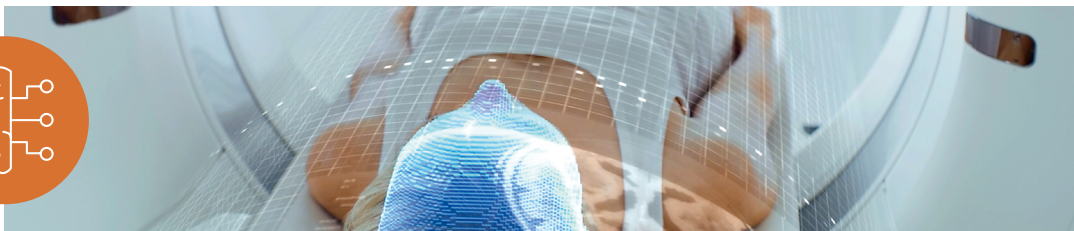
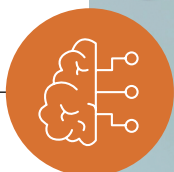
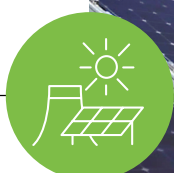


# Rapport annuel 2021



Retrouvez également le rapport annuel  
du CEA sur [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

# RAPPORT ANNUEL 2021

## SOMMAIRE

---

Avant-propos

### **Le CEA et son écosystème**

Un organisme écoresponsable

De la recherche à l'industrie

Science en société

### **6 GRANDES MISSIONS**

Défense et sécurité

Énergies

Transition numérique

Technologies pour la santé

Recherche fondamentale

Assainissement-démantèlement

### **Le CEA EN BREF**

Chiffres clés 2021

Organisation du CEA

---

Nous suivre sur...





## Avant propos

Le CEA a pour missions de faire progresser la science et le savoir au service de la société, d'accompagner la réindustrialisation de notre pays et de contribuer à la souveraineté technologique française et européenne en relevant les grands défis de ce siècle : l'énergie et l'environnement, le climat, la santé, la défense et la sécurité, le numérique. Sur ces enjeux, le CEA contribue activement à apporter les réponses attendues par les pouvoirs publics, les industriels et, plus largement, les citoyens, fort de sa feuille de route stratégique qui repose sur trois piliers - la transition énergétique et climatique, le numérique, la santé - adossés à un socle de recherche fondamentale. Après la réflexion menée en 2020 sur son approche de la problématique énergétique, le CEA a effectué, en 2021, un travail similaire de prospective sur le numérique avec plus de 200 experts du domaine issus de l'ensemble de ses directions opérationnelles. Présentées en fin d'année, leurs conclusions ont permis d'affiner la vision et la stratégie du CEA en matière de numérique.

Malgré la crise sanitaire, la motivation des équipes du CEA - pluridisciplinaires, agiles et engagées sur l'ensemble du territoire - n'a jamais faibli et a permis de tenir les grands jalons de ses programmes. Comme l'illustrent les résultats présentés dans ce document, le CEA démontre au quotidien l'efficacité et la modernité de son modèle, un modèle d'organisation de recherche technologique grâce auquel, à l'instar de ses homologues internationaux, il est capable de faire le lien entre la connaissance la plus avancée et l'industrie pour améliorer la vie quotidienne des citoyens et promouvoir l'activité économique.





## Un organisme socialement responsable

La démarche du CEA consiste à éclairer la décision publique et à donner les moyens scientifiques et technologiques aux entreprises françaises et européennes ainsi qu'aux collectivités de mieux maîtriser quatre mutations sociétales majeures : la transition énergétique, la transition numérique, la santé du futur et la défense.

### RESSOURCES HUMAINES ET FORMATION

**Adapter les emplois aux évolutions de la société, trouver de nouveaux leviers d'attractivité pour disposer des compétences clés de l'entreprise, favoriser la mobilité, motiver les salariés par la valorisation de leurs compétences et les accompagner dans la définition de leur projet professionnel, encourager le dialogue social et les lieux d'expression... Autant d'enjeux humains et organisationnels auxquels le CEA cherche à répondre.**

Malgré la crise sanitaire, la dynamique engagée en 2020 dans un contexte exceptionnel n'a pas faibli en 2021. Le CEA a ainsi réalisé 981 recrutements (843 en 2020) et passé le cap des 1 000 alternant(e)s accueilli(e)s à l'occasion de son action en faveur de l'insertion professionnelle des jeunes.

Il a également poursuivi la déclinaison de ses engagements pris à travers les accords collectifs, notamment dans le cadre de son plan national triennal en faveur des personnes en situation de handicap et son plan d'actions en matière d'égalité professionnelle.

Outre la réunion régulière des instances représentatives du personnel, le CEA a signé avec les partenaires sociaux un accord de méthode visant à définir et mettre en œuvre une stratégie de modernisation sociale avec un projet pluriannuel de négociation des grands thèmes de développement social.

Fortement mobilisés durant la crise en 2020, les outils collaboratifs à distance se sont généralisés pour favoriser les échanges à tous les niveaux, entre la Direction des ressources humaines et des relations sociales (DRHRS) et les managers, entre managers et salariés mais également entre collègues de travail. Et de nouvelles pratiques sont désormais ancrées, comme l'organisation régulière de séminaires, partout et sur tous les sujets d'intérêt.



# 981

**RECRUTEMENTS  
DURANT L'ANNÉE 2021 ET  
+ DE 1 000 ALTERNANTS**





Dans le domaine de la formation, de nombreuses actions ont été menées notamment par l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN), par exemple dans le domaine de la culture de sûreté pour les personnels du CEA qui travaillent en INB, dans celui de l'intelligence artificielle ou encore autour de la filière hydrogène. Sur la base de quatre projets financés par France Relance dans le domaine du nucléaire et des compétences pour le nucléaire, l'INSTN a également mené à bien, en 2021, la rénovation et la digitalisation de ses chantiers écoles sur les sites de Saclay, Marcoule et Cherbourg. Les formations à destination des managers ont également continué à évoluer pour prendre en compte les transformations de nos modes de travail et leurs implications en matière de management des collaborateurs. Ces formations sont désormais proposées sur une durée plus longue et en mode phigital pour la plupart.

## DÉVELOPPEMENT DURABLE

**Depuis plusieurs décennies, le CEA place le développement durable au cœur de ses enjeux, à travers ses programmes de R&D, en cherchant à réduire l'empreinte environnementale de ses activités sur ses centres, tout en favorisant leur soutenabilité économique et le bien-être des parties intéressées, au premier rang desquelles les personnels travaillant dans ses unités. L'année 2021 a permis au CEA de structurer les actions menées, de les mettre en visibilité tant en interne qu'auprès des pouvoirs publics et de ses partenaires, de lancer de nouvelles pistes de progrès en matière de développement durable, notamment grâce à la redynamisation du réseau des acteurs de terrain.**

Le contrat d'objectifs et de performance du CEA pour la période 2021-2025, signé en juillet 2021, a été établi en cohérence avec les objectifs de développement durable (ODD) de l'agenda 2030 de l'ONU, mettant en lumière sa contribution forte aux grands enjeux de développement durable et réaffirmant son positionnement sur des domaines de recherche majeurs en lien avec ces enjeux (les transitions énergétique et numérique et le développement de technologies pour la médecine du futur).

Pour structurer les actions menées, le premier plan quadriennal de développement durable du CEA a été élaboré en 2021, et décline les **cinq engagements du CEA**.



**1<sup>ER</sup> ENGAGEMENT****Le CEA contribue au progrès par la connaissance et par la technologie au travers de ses résultats de recherche et ses publications.**

L'année 2021 a vu de nombreuses actions se réaliser en matière de diffusion de la culture de l'économie circulaire au sein du CEA, avec l'objectif d'en faire un levier d'innovation opérationnelle.

Le Pacte vert européen et le *New European Circular Economy Action Plan* sont désormais pris en compte dans la stratégie européenne du CEA. Ainsi, le concept d'économie circulaire progresse dans les projets menés par l'organisme, avec des actions d'acculturation et de formation interne, principalement dans les directions des énergies et de la recherche technologique, des enseignements étant également dispensés à l'INSTN. Des thèses focus sont financées sur ce thème sous l'égide du Haut-commissaire à l'énergie atomique et un programme transverse, associant les directions des énergies, de la recherche technologique et de la recherche fondamentale, dédié aux procédés de fabrication, recyclage et analyse du cycle de vie a été mis en place. La revue d'information scientifique Clefs CEA a consacré son numéro du 1<sup>er</sup> semestre 2021 à la fabrication additive et traitera de l'économie circulaire au 2<sup>e</sup> semestre 2022.

Suite à l'exercice de prospective qu'il a mené sur ses activités dans le domaine du numérique, le CEA s'organise pour faire de la sobriété numérique un axe de réflexion, de recherche, d'enjeu partagé, à travers sa stratégie d'informatique et de téléphonie d'entreprise, mais également comme élément irriguant ses programmes opérationnels. Cette ambition concerne ses axes de recherche en matière de réduction de la consommation globale d'énergie et de matériaux critiques ou polluants liés au numérique, une implication du CEA dans les normes et labels de frugalité, enfin un axe plus sociétal en lien avec les usages et le monde économique. Elle s'est notamment traduite en 2021 par la définition de la feuille de route du Leti en matière d'efficacité énergétique et électronique durable et le plan d'actions associé pour les 10 prochaines années.

Par ailleurs, dans les domaines du climat et de l'environnement, de nombreux projets sont en cours, portés par la Direction de la recherche fondamentale du CEA, dans le cadre de partenariats le plus souvent européens et à travers des chaires industrielles (sur la mesure des émissions de gaz à effet de serre par exemple).

**2<sup>E</sup> ENGAGEMENT****Le CEA réduit l'empreinte de ses activités par ses actions de gestion environnementale.**

En 2021, le CEA a défini sa politique environnementale, ainsi que ses directives pour 2022 et poursuivi sa stratégie en matière de performance énergétique dans le cadre de son schéma pluriannuel de stratégie immobilière, du plan de relance et de ses responsabilités environnementales. Ce projet répond à un triple objectif :

- intégrer la recherche de performance énergétique dans tous les processus liés à la construction neuve, la rénovation, l'exploitation et la maintenance des installations et infrastructures ;
- réduire les consommations énergétiques à périmètre fonctionnel constant d'au moins 3 % par année ;
- définir une nouvelle politique énergétique.

Le bilan des émissions de gaz à effet de serre (BEGES) au titre de 2020 a été réalisé pour l'ensemble du CEA et un plan d'actions associé a été élaboré. Avec un bilan établi pour 2020 à 139 501 tonnes équivalent de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>e) émises, les émissions du CEA sont en recul de -13 % par rapport à 2019. Les principaux postes d'émissions



restent ceux associés à la consommation d'énergie pour 95 016 tCO<sub>2</sub>e, soit 68 % du total des émissions considérées (66 % en 2019) dont la consommation de combustible pour 49 079 tCO<sub>2</sub>e et l'électricité achetée et produite pour 41 916 tCO<sub>2</sub>e. Enfin, les émissions liées aux déplacements représentent 37 570 tCO<sub>2</sub>e, soit 27 % du total des émissions considérées (31 % en 2019) dont 33 195 tCO<sub>2</sub>e au titre des déplacements domicile/travail.

L'année 2021 a également permis au CEA de s'inscrire dans le cadre de la démarche gouvernementale des services publics écoresponsables (SPE) et de réaliser, à ce titre, un premier bilan pour 2020 en matière d'éco-responsabilité, mesurée à partir des vingt engagements pris par l'État en matière d'achats, d'alimentation, de consommation d'énergie... Concernant la gestion des mobilités, le CEA a réalisé son plan de gestion triennal de parc automobile et défini sa doctrine en matière d'attribution de véhicules de fonction. Des instructions internes ont également été déployées en application des consignes gouvernementales (interdiction de certains carburants notamment).

Un projet de recherche de performance énergétique des bâtiments du CEA a été lancé en 2021. Associant les directions fonctionnelles concernées et le CEA-Liten, il vise à développer des démonstrateurs issus des technologies et de l'expertise du CEA et à les proposer pour expérimentation sur ses sites. Les grandes problématiques qui seront traitées concernent le réseau de chaleur de Cadarache, l'auto-consommation et l'autoproduction d'énergie sur des bâtiments tertiaires de Saclay et Marcoule, enfin le réseau de froid de Saclay.

### 3<sup>E</sup> ENGAGEMENT

**Le CEA agit pour le développement social à travers les accords qu'il signe avec ses partenaires sociaux, et en particulier les accords sur la qualité de vie au travail, l'égalité professionnelle ou l'emploi des personnes en situation de handicap.**

En 2021, le CEA a lancé une action nationale en faveur de l'insertion professionnelle des jeunes *via* l'alternance et mis en œuvre un plan de sauvegarde des emplois de R&D dans le cadre de France relance.

### 4<sup>E</sup> ENGAGEMENT

**Le CEA agit pour le développement économique**

Outre sa contribution à la compétitivité des entreprises par l'innovation, le CEA est, en tant qu'acheteur, un acteur du développement économique. Il a poursuivi en 2021 sa politique d'achats responsables et innovants avec la déclinaison d'un plan d'actions dédié, l'animation de groupes de travail inter-centres sur le déploiement de solutions pour le recyclage des masques de protection ou pour le réemploi des matériaux issus de bâtiments modulaires. Le CEA s'est également doté d'une politique de la sous-traitance et, fin 2021, a signé la Charte des relations fournisseurs achats responsables (RFAR).

Enfin, l'année 2021 a permis de réfléchir et préparer la création d'une Direction déléguée à l'innovation, aux start-up et aux participations (DISP).

### 5<sup>E</sup> ENGAGEMENT

**Le CEA promeut l'ouverture et le dialogue autour de ses activités, en particulier par ses actions pédagogiques et les commissions locales d'information autour de ses centres de recherche.**

Le CEA a renforcé en 2021 sa contribution à la culture et l'éducation des savoirs liés à la transition écologique et énergétique. À titre d'exemple, l'INSTN a organisé une rentrée climat 2021 pour tous ses étudiants et propose toute l'année l'animation de



fresques du climat dans les unités demandeuses. Les unités du CEA organisent ou contribuent à de nombreux colloques scientifiques en lien avec leurs activités de recherche, mais également dispensent ou participent à l'enseignement au sein de cursus de formations initiales ou continues, en association avec leurs partenaires académiques, comme l'université de Paris-Saclay ou de Montpellier.

Concernant la promotion de sa politique d'ouverture des publications et données de recherche, le CEA a signé en 2021 une charte pour la science ouverte et mis à profit l'année pour structurer ses actions en lien avec les instances nationales de la recherche.

Pour accompagner toutes ces actions, notamment au plus près du terrain, le CEA s'appuie sur sa stratégie de communication interne et externe et sur un réseau de correspondants pour le développement durable, redynamisé tout au long de l'année 2021. De nombreux outils d'appropriation de la thématique du développement durable ont été déployés en 2021 et des actions de mise en visibilité externe des initiatives CEA ont été également conduites, comme l'engagement dans la démarche SPE, la contribution au « Mois de l'innovation publique », la participation au club de développement durable des établissements publics (130 membres) ainsi qu'à divers autres réseaux regroupant les institutions essentiellement de la sphère publique autour de thématiques de développement durable.

## INTÉGRITÉ SCIENTIFIQUE

**En tant qu'organisme conscient de ses responsabilités, le CEA a positionné l'intégrité scientifique au cœur de ses activités de recherche, comme valeur indispensable au lien de confiance entre science et société. Au cours de l'année 2020, le CEA a finalisé la mise en place de son dispositif en matière d'intégrité scientifique, conformément à la politique engagée en 2018. L'année 2021 a permis de renforcer l'animation du réseau d'acteurs dédiés et de proposer différentes actions (séminaire, sensibilisation, outils de travail).**

Malgré la crise sanitaire, le Comité à l'intégrité scientifique (CIS) du CEA, composé de représentants de chaque direction opérationnelle et des directions fonctionnelles principalement concernées, s'est réuni à cinq reprises en 2021. Les dix-sept correspondants à l'intégrité scientifique (CORIS) ont également été réunis à trois reprises durant l'année, l'ensemble des acteurs (CIS et CORIS) ayant en outre participé à un séminaire annuel commun de travail. Le réseau ainsi constitué bénéficie d'outils et de ressources partagés, renouvelés ou créés en 2021, notamment pour les accompagner dans leurs actions de sensibilisation de terrain.

Afin de renforcer les activités de partage de bonnes pratiques avec les autres organismes de recherche, le CEA a conforté sa participation aux réseaux spécialisés d'IS en 2021, comme le réseau RESINT, l'OFIS, POLETHIS de l'Université Paris Saclay. Enfin, il a également participé à la rencontre annuelle des signataires de la charte nationale de la déontologie des métiers de la recherche et à divers colloques.







## De la recherche à l'industrie

**Acteur majeur d'innovations, le CEA valorise les technologies qu'il développe, en particulier dans les domaines des énergies, de la santé, du numérique, afin de soutenir la compétitivité des entreprises, favoriser la création d'emplois et, plus globalement, contribuer à la souveraineté technologique de la France.**

**C'est une des missions prioritaires du CEA. Depuis sa création, l'organisme s'attache à protéger les résultats de ses recherches et les technologies mises au point dans ses laboratoires pour les valoriser auprès des industriels, au bénéfice de la société. Une démarche que le CEA accélère, amplifie et structure depuis une trentaine d'années, en s'appuyant sur une politique active de dépôts de brevets et de transfert, en concédant des licences aux industriels et en créant des entreprises valorisant ses technologies.**

Le CEA figure parmi les «100 premiers innovateurs mondiaux» en 2021, selon le classement Clarivate. Il est ainsi le premier organisme de recherche déposant de brevets en France et le deuxième en Europe, avec un portefeuille constitué de près de 7270 familles de brevets actives. Ces brevets relèvent majoritairement des secteurs des énergies, de la santé et du numérique (microélectronique, instrumentation), adressant les grandes transitions en cours : énergétique, numérique et médicale. Cette démarche offre aux entreprises partenaires un cadre de recherche innovant et sécurisé.

Pour favoriser ce transfert technologique et rester à l'écoute des besoins exprimés, le CEA s'appuie sur trois piliers qui font sa force :

- une culture de valorisation partagée par l'ensemble de ses collaborateurs et soutenue par une stratégie de propriété intellectuelle volontariste ainsi qu'un dispositif complet d'accompagnement à la création d'entreprises ;
- une recherche technologique à l'état de l'art couplée à de la recherche plus fondamentale, toutes deux adossées à des plateformes uniques en France voire en Europe, lui permettant de couvrir toute la chaîne de valeur (de la R&D au prototypage) ;
- une organisation transversale, s'appuyant sur l'ensemble des compétences nécessaires au transfert technologique et à la diffusion des expertises et innovations.

En 2021, le CEA a poursuivi ou noué plus de 700 partenariats avec des industriels, de la start-up aux grands groupes en passant par des PME et des ETI. Il a formalisé dans une charte les principes de propriété intellectuelle et leurs fondements applicables à ces partenariats industriels. Six entreprises valorisant des technologies CEA ont également vu le jour. *Via* sa filiale CEA Investissement, opérée par Supernova Invest, son partenaire de capital-investissement, l'organisme a notamment participé à la création de la co-entreprise Genvia avec Schlumberger, Vinci, Vicat et la région Occitanie dans le domaine de l'électrolyse haute température.



## OBJECTIF START-UP !

Convaincu que la création d'entreprises portant des innovations de rupture (deep tech) est à la fois un relais clé du transfert technologique et un enjeu économique structurant de l'activité industrielle, le CEA favorise, depuis bientôt 40 ans, la création et le développement de start-up issues de ses technologies.

Avec le lancement du programme Magellan en juin 2020, il a démultiplié les initiatives d'essai dans la perspective de doubler d'ici cinq ans le nombre de start-up essaimées annuellement de ses laboratoires. Ce dispositif permet d'accompagner les collaborateurs du CEA dans leur projet de création d'entreprise, des premières idées jusqu'à la création de la start-up. Le CEA soutient également ces start-up dans leur développement *via* CEA Investissement.

Depuis son lancement il y a 18 mois, le programme Magellan a ainsi permis d'analyser plus de 110 propositions et d'accompagner une trentaine de projets de start-up.

En 2021, les start-up issues du CEA ont poursuivi leur développement avec des annonces majeures : l'installation à Grenoble du site de production d'Aledia qui a fait son entrée au palmarès NEXT 40 de la French Tech ; plusieurs levées de fonds significatives comme celles d'Isorg (16 M€), Primo 1D (15 M€), Extractive (4,6 M€) ou encore Wise Integration (2,7 M€), preuves de leur capacité d'innovation.



## QUELQUES DONNÉES CLÉS

### Une dynamique de propriété intellectuelle

**1<sup>er</sup> organisme de recherche** déposant de brevets en France en 2021 et depuis plus de 10 ans

**2<sup>e</sup> déposant français de brevets** en Europe en 2021

**709 nouveaux brevets** déposés en 2021

**7269 familles de brevets** actives en 2021

### La montée en puissance des start-up issues du CEA

Plus de **130 millions d'euros** de levées de fonds en 2021

**67 %** des 228 start-up créées toujours en activité (93 % à 5 ans)

**75 %** des start-up dans les deep tech

**6 nouvelles entreprises** créées en 2021



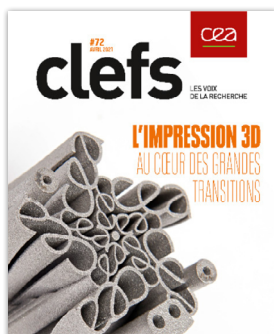
## Science et société

**En tant qu'organisme public de recherche, producteur de connaissances et de technologies, le CEA se mobilise pour développer l'information et la réflexion des citoyens sur la science et ses enjeux, et favoriser les échanges avec la communauté scientifique. Tout au long de l'année écoulée, il a renforcé son action pour contribuer à inscrire durablement la science dans la société.**

**On parle souvent de « rapprocher la science de la société » voire de « rétablir la confiance des citoyens dans la science », notamment éprouvée par la crise sanitaire. Disposant d'une large palette d'outils principalement numériques comme une médiathèque en ligne proposant de nombreuses ressources multi-médias (magazines, animations, vidéos, podcasts...), également présent sur les médias sociaux majeurs, le CEA articule son action selon trois axes prioritaires.**

### 1<sup>ER</sup> AXE

**Éclairer les questions de science qui traversent la société** pour donner aux décideurs et aux citoyens en général des clés de réflexion et de compréhension sur les grands enjeux qu'elles sous-tendent. Ainsi, durant l'année écoulée, le CEA a porté une attention particulière à l'éditorialisation de ce qui est publié sur ses différents médias, notamment sur son site web qui a été repensé pour proposer davantage de contenus en prise directe avec l'actualité et déclinés sous différentes formes (décryptages, interviews, infographies, reportages, etc.). Cette démarche, qui se poursuit dans l'objectif de rendre son écosystème print et digital encore plus cohérent et efficace, a permis au CEA de gagner en audience sur tous les médias où il est présent voire même de dépasser les objectifs qu'il s'était fixés, preuve de la qualité de sa production.



Unes des magazines *Les défis du CEA* et *Clefs CEA*.  
© CEA

Par ailleurs, les points presse dits de « décryptage » se sont poursuivis en 2021 pour présenter les actions phares menées par le CEA dans les domaines des batteries, des technologies quantiques et la cybersécurité. De même, les magazines « Les Défis du CEA » (à destination d'un public curieux de science) et « Clefs CEA » (information scientifique) ont traité, tout au long de l'année, de sujets d'intérêt comme l'électronique frugale ou les matériaux critiques pour le premier, la fabrication additive et le numérique de puissance pour le second.



**2<sup>E</sup> AXE**

Le deuxième axe concerne plus classiquement les actions que mène le CEA pour **diffuser la culture scientifique**, principalement à destination de la sphère éducative (lycéens, étudiants, enseignants). L'année 2021 a été marquée par le partenariat que le CEA a noué avec l'Onisep, éditeur public spécialisé dans l'information et l'orientation scolaire, pour la diffusion de dix vidéos métiers de sa collection « Scientifique, toi aussi ! » et une série de trois live « Les métiers en direct » à destination des élèves de la 4<sup>e</sup> à la 1<sup>re</sup>.



**Tous les mois, sur la chaîne YouTube du CEA, en 2021, un grand principe de la physique racontait comment son « invention » a fondé la science moderne.**  
© CEA/Sisso

Parmi les opérations qui ont été poursuivies, « Scientifique, toi aussi ! Construisons ensemble le monde de demain » (en format numérique) a permis à 5 600 lycéens au total de suivre trois rendez-vous en direct depuis leurs établissements scolaires. Au programme de ces trois matinées : une conférence et une table ronde sur les métiers de demain et les grands enjeux de société ainsi que des « speed-métiers ». De même, l'initiative « Science pour tous », lancée par le CEA il y a six ans (et rejointe depuis trois ans par l'Université Paris-Saclay) pour les collégiens issus de zones d'éducation prioritaire et qui n'ont pas toujours les réseaux nécessaires pour trouver des entreprises susceptibles de leur ouvrir leurs portes, a accueilli, en stage, 24 élèves de 3<sup>e</sup> du collège Paul Eluard de Sainte-Geneviève-des-Bois. Durant une semaine, ils ont ainsi découvert la vie des laboratoires franciliens, leurs équipements de pointe, les recherches qui y sont menées mais aussi les équipes et métiers qui y évoluent.

Sur le modèle des « Équations Clefs de la physique » publiées mensuellement sur YouTube en 2020, ce fut au tour des « Principes clefs de la physique » de se faire connaître en 2021 à raison de neuf épisodes diffusés entre mars et décembre (sur la relativité, l'inertie, la thermodynamique, etc.). Enfin, la web-série ScienceLoop de vulgarisation scientifique, lancée en 2019, a fait peau neuve à la rentrée 2021 pour s'adresser plus spécifiquement aux lycéens. Chaque épisode propose désormais deux animations et un vlog dans l'objectif d'humaniser et d'incarner la recherche et cinq numéros ont été mis en ligne jusqu'en mars 2022 : le télescope spatial Webb, le solaire photovoltaïque, la radioprotection et surveillance de l'environnement, le microbiote et l'usine du futur.



**3<sup>E</sup> AXE**

Le dernier axe, tout aussi majeur, est de consolider l'intégration des centres du CEA dans leur environnement local en développant des actions ciblées (visites, événements...) auprès des interlocuteurs de proximité (associations, élus, partenaires académiques et industriels, riverains, collaborateurs extérieurs).

**CEA360 : EXPLOREZ LA RICHESSE DU CEA ET DE SON ÉCOSYSTÈME !**

Le CEA a mis en ligne fin 2021 un moteur de recherche simple et intuitif pour faire découvrir aux internautes son expertise et la variété de ses activités de recherche. Qui fait quoi, où - et avec qui - au CEA ? En tapant des mots clés ou sigles de votre choix, CEA360 vous permet découvrir la richesse du CEA et d'en savoir plus sur son écosystème autour d'un thème, d'un centre, d'une unité ou encore d'un partenaire.

C'est par [ici](#)



Visuel de CEA360.  
© M. Colonna d'Istria / CEA

**LES ÉTUDIANTS DE L'UNIVERSITÉ DE NÎMES, GRANDS GAGNANTS DU HACKADEM SUP 21 !**

Lors de la finale du Hackadem Sup 21, challenge d'open innovation dédié au démantèlement nucléaire ouvert aux étudiants de l'enseignement supérieur, c'est le projet de micro-algues au service du nucléaire, porté par une équipe de l'Université de Nîmes, qui a remporté les faveurs du jury et du public.

Lancé début 2021 par le CEA et l'INSTN, ce challenge, qui avait pour thème « Imagine les nouvelles technologies au service du démantèlement », a mobilisé plus de 391 étudiants issus de 88 établissements différents pour un total de 169 dossiers déposés.



# LES 6 MISSIONS DU CEA

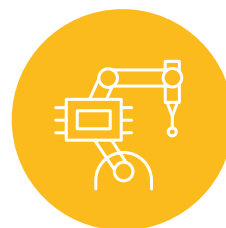
Agir pour assurer à la France et à l'Europe  
un leadership scientifique, technologique et  
industriel ainsi qu'un présent et un avenir mieux  
maîtrisés et plus sûrs pour tous !



**Défense et  
sécurité**



**Énergies**



**Transition  
numérique**



**Technologies  
pour la santé**



**Recherche  
fondamentale**



**Assainissement-  
démantèlement**



## Défense et sécurité

Le CEA est chargé de missions au service de la Défense, essentiellement de la dissuasion nucléaire, et de la sécurité nationale, à travers sa **Direction des applications militaires (DAM)**.

+ D'INFOS SUR LA DAM

Depuis l'arrêt définitif des essais nucléaires, le CEA apporte la garantie des performances des têtes nucléaires grâce au programme Simulation. Ainsi, le fonctionnement de ces armes est simulé c'est-à-dire approché par la résolution numérique d'équations complexes modélisant la physique. Cette approximation doit être suffisamment précise pour satisfaire les spécifications de performances exigées sur les armes. Pour atteindre cette précision dans les délais des programmes, le CEA co-développe avec Atos des supercalculateurs précurseurs au niveau mondial, capables de mettre en œuvre ces simulations complexes avec une puissance de calcul optimale.

En parallèle, le CEA améliore ses modèles de physique grâce à de grandes installations expérimentales, exceptionnelles par leurs performances, qu'il a construites spécifiquement pour les besoins ambitieux de sa mission : l'installation de radiographie Epure et le laser Mégajoule. L'installation radiographique Epure permet de caractériser, avec la plus grande précision, l'état et le comportement hydrodynamique des matériaux, dans les conditions de la phase pré-nucléaire du fonctionnement des armes. Le laser Mégajoule est indispensable pour simuler les phénomènes physiques rencontrés dans la phase de fonctionnement nucléaire de l'arme et pour certifier les compétences des physiciens concepteurs d'armes. Le corpus de résultats des essais nucléaires passés sert à la démonstration globale de garantie dans la démarche de simulation.



*Le corpus de résultats des essais nucléaires passés sert à la démonstration globale de garantie dans la démarche de simulation.*

### PROPULSION NUCLÉAIRE

Le CEA pilote également la conception, le développement et la réalisation des chaufferies nucléaires des bâtiments de la Marine nationale ainsi que la conception et la réalisation des cœurs équipant ces chaufferies. Ses équipes apportent leur soutien à la Marine nationale pour la maintenance de ses réacteurs et pour la mise en œuvre de ses installations nucléaires à terre, dédiées au soutien de la flotte en service à l'Île Longue et à Toulon. La continuité des programmes de chaufferies nucléaires nouvelles pour les générations successives de bateaux est un enjeu essentiel pour maintenir les compétences françaises en propulsion nucléaire.





20

**NOMBRE D'ANNÉES NÉCESSAIRES À LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DE LA CHAUFFERIE NUCLÉAIRE DE PROPULSION DU SUFFREN, PREMIER SOUS-MARIN NUCLÉAIRE D'ATTAQUE DE TYPE BARRACUDA**

## SÉCURITÉ NATIONALE

Dans la lutte contre la prolifération et le terrorisme nucléaires, le CEA apporte aussi son expertise aux services de l'État, fondée sur sa connaissance du nucléaire et des technologies de détection et d'identification.

À la demande des pouvoirs publics, le CEA conduit des recherches pour lutter contre les menaces Nucléaire, Radiologique, Biologique, Chimique et Explosifs (NRBC-E), structurées autour d'un programme interministériel de R&D, dont le pilotage a été confié au CEA. Le CEA travaille également sur les recherches en cybersécurité, en lien avec les pouvoirs publics.

Enfin, le CEA met son expertise au service de la Défense pour évaluer et maîtriser les effets et la vulnérabilité des armements conventionnels.

Pour l'ensemble de ces activités, le CEA s'appuie sur des ressources, expertises et moyens des directions opérationnelles civiles.



## Faits marquants 2021

### DISSUASION

#### Homologation de l'extension de la durée de vie de la TN75

Le 11 mars 2021, le Directeur des applications militaires du CEA a homologué une nouvelle et dernière extension de la durée de vie de la tête nucléaire TN75 pour l'ensemble de ses performances. L'objectif de cette extension est de faciliter la transition entre les systèmes d'armes M51.1 et M51.3. Cette dernière homologation concerne tous les sous-ensembles de la TN75 et apporte les éléments de démonstration nécessaires à la garantie des performances de la TN75, en cohérence avec les exigences du système d'arme. Elle confirme le haut potentiel de cette tête nucléaire très optimisée, mise en service en 1996. Cette décision marque l'aboutissement d'un travail de grande qualité des équipes du CEA, initié dès 2008.

### DISSUASION

#### Succès de l'essai en vol lors du lancement d'un missile balistique stratégique M51

Le 28 avril 2021 à 9h58 précises, a eu lieu avec succès le lancement d'un missile balistique stratégique M51 depuis le bassin du site d'essais des Landes de la Direction générale de l'armement (DGA). Ce missile emportait une maquette fortement instrumentée, qui a nécessité plusieurs années de préparation par les équipes du CEA dans le cadre du programme de renouvellement de la composante océanique de la dissuasion. Cet essai, qui contribue à la crédibilité de la dissuasion nucléaire française, a permis l'obtention de nombreuses données expérimentales dont l'exploitation permettra l'acquisition d'informations primordiales pour valider les options de conception prises pour le renouvellement des têtes nucléaires océaniques.



NRBC-E



## Mieux évaluer une contamination au gaz moutarde

Comme l'ypérite, plus connue sous le nom de « gaz moutarde », continue de contaminer des populations notamment lors d'accidents de manipulation avec d'anciennes munitions, le fait de disposer d'un biomarqueur pour faciliter le diagnostic ou établir la preuve d'une exposition présente un grand intérêt.

Des chercheurs de l'Irig ont identifié, avec l'Institut de recherche biomédicale des armées, un métabolite issu de l'interaction d'un analogue de l'ypérite (moins dangereux qu'elle) avec le glutathion, une molécule très présente dans les cellules et dont le rôle est d'éliminer les substances nocives. Ils ont confirmé que ce métabolite est bien excrété par des cellules en culture et l'ont détecté dans le plasma sanguin de souris exposées. Il leur reste à finaliser l'étude dans le cas de l'ypérite.

**Irig** : Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble (CEA / Université Grenoble-Alpes)

**i** Mieux évaluer une contamination au gaz moutarde

PROPULSION NUCLÉAIRE

## Lancement de la phase de réalisation du SNLE-3G

Le 19 février 2021, la ministre des Armées a annoncé le lancement de la phase de réalisation du futur sous-marin nucléaire lanceur d'engins de troisième génération (SNLE-3G) lors de son déplacement sur le centre technique de la Direction générale de l'armement (DGA) à Val de Reuil. Le CEA participe à la maîtrise d'ouvrage d'ensemble du programme SNLE-3G et assure, selon les termes de l'Œuvre commune Armées-CEA, le pilotage des activités de propulsion nucléaire et la maîtrise d'ouvrage de la conception et de la réalisation des cœurs et des chaufferies nucléaires embarquées. La DGA et le CEA fonctionnent en équipe de projet intégrée pour garantir, dans la durée, l'efficacité et la cohérence d'ensemble de leurs missions de maîtrise d'ouvrage de l'opération d'armement SNLE-3G.

DISSUASION

## Lancement de l'APS du PA-NG

Lors de son déplacement sur le site de Naval Group à Lorient le 29 mars 2021, la ministre des Armées a lancé les études d'avant-projet sommaire (APS) du porte-avions de nouvelle génération (PA-NG). Sous une maîtrise d'ouvrage commune DGA/CEA, ces travaux vont mobiliser, pendant les deux prochaines années, plusieurs centaines d'ingénieurs de Naval Group, des Chantiers de l'Atlantique pour le navire, et de TechnicAtome pour les chaufferies. L'équipe de maîtrise d'ouvrage du CEA s'appuiera sur l'expertise des équipes du CEA (DAM et DES) et du STXN (Service technique mixte des chaufferies nucléaires embarquées), pour piloter la conception et le développement des deux chaufferies nucléaires K22 qui équiperont le futur navire de 300 mètres de long et déplaçant 75000 tonnes.



**PROGRAMME SIMULATION**

**Succès de l'essai en vol lors du lancement d'un missile balistique stratégique M51**

Le 12 juin 2020, a eu lieu avec succès le lancement d'un missile balistique stratégique M51 par le sous-marin nucléaire lanceur d'engin (SNLE) Le Téméraire, depuis la baie d'Audierne. Ce missile emportait une maquette fortement instrumentée, qui a nécessité plusieurs années de préparation par les équipes du CEA dans le cadre du programme de renouvellement de la composante océanique de la dissuasion. Cet essai a permis l'obtention de nombreuses données expérimentales dont l'exploitation permettra l'acquisition d'informations primordiales pour valider les options de conception prises pour le renouvellement des têtes nucléaires océaniques.

**DÉFENSE CONVENTIONNELLE**

**Mise en service initiale du lanceur pyrotechnique PERSÉE**

Dans le cadre du développement de futurs systèmes d'armements conventionnels, la Direction générale de l'armement (DGA) a financé, sur le centre du CEA à Gramat, l'acquisition d'un ensemble d'équipements permettant de reproduire tout un spectre de contraintes mécaniques que subit un armement à l'impact. La partie la plus emblématique est le lanceur PERSÉE, capable de propulser un projectile de calibre 140 mm, dans une plage d'accélération maîtrisée allant du subsonique au supersonique. Commandé à la société Thiot Ingénierie sur spécifications du CEA, le lanceur a permis de réaliser un premier tir avec succès le 31 mars 2021, suivi d'essais de calibration du système et de mise au point des diagnostics novateurs associés. Les premiers essais opérationnels sont programmés en 2022.

**PROPULSION NUCLÉAIRE**

**Atteinte de la pleine puissance du RES avec son premier cœur**

Le 9 mars 2021, à 17h19, sur le site du CEA à Cadarache, le réacteur d'essais de la propulsion nucléaire, le RES, a atteint sa puissance maximale avec son premier cœur nucléaire. L'installation poursuit désormais à pleine puissance la phase d'expérimentation scientifique Hippocampe, destinée qualifier et valider des codes de calcul de la propulsion nucléaire. Les mesures qui seront acquises au cœur de ce réacteur seront une première dans l'histoire de la propulsion nucléaire. Ces résultats seront notamment intégrés aux standards de calcul utilisés dans les programmes futurs, sous-marin nucléaire lanceur d'engins de troisième génération (SNLE-3G) et porte-avions de nouvelle génération (PA-NG), et contribueront ainsi à sécuriser les objectifs de performance visés.





## Énergies

**Le CEA apporte aux pouvoirs publics et aux industriels les éléments d'expertise et d'innovation pour la mise en œuvre d'un système énergétique bas carbone. Cette mission est portée par l'ensemble de ses directions opérationnelles, au premier rang desquelles la **Direction des énergies (DES)**.**

+ D'INFOS SUR LA DES

**Pour répondre aux enjeux actuels et futurs de la transition énergétique, nécessaire pour lutter contre le réchauffement climatique, le CEA privilégie une approche qui intègre non seulement les aspects scientifiques mais aussi les dimensions technico-économiques, sociétales et politiques.**

Objectif : Atteindre la neutralité carbone en 2050. Réussir cette transition majeure exige de bâtir, dès aujourd'hui, un **système énergétique** le plus sobre possible tout en permettant à chacun et chacune d'en tirer au quotidien, tous les bénéfices - en termes d'éclairage, de chauffage, de transports...- dans les meilleures conditions. Cela implique de prendre en compte l'ensemble des composantes du système : production d'énergies bas carbone pour s'affranchir des fossiles (pétrole, charbon), fonctionnement et optimisation des réseaux énergétiques (stockage, pilotage, conversion), distribution à différentes échelles (du national au territorial), limitation des pertes (efficacité énergétique, maîtrise de la consommation), économie circulaire des matières et optimisation des ressources.



13

**LE NOMBRE DE GRANDS PROGRAMMES QUI STRUCTURENT LES RECHERCHES DU CEA SUR LES ÉNERGIES BAS CARBONE**

Le CEA est l'un des seuls organismes de recherche français qui travaille à la fois sur les deux types d'énergies bas carbone disponibles aujourd'hui - nucléaire et renouvelables - mais également sur des thématiques transversales comme la gestion des réseaux, le stockage d'énergie, la simulation ou encore le pilotage des sources et de la consommation. Il est ainsi idéalement positionné pour développer l'indispensable approche intégrée de la problématique énergétique. En 2020, à la demande des pouvoirs publics, et sur la base d'un travail de réflexion interne mené pour répondre au plus près aux défis majeurs que soulève la transition énergétique, le CEA a restructuré ses recherches et créé la **Direction des énergies (DES)** pour couvrir l'ensemble du domaine.



Cette démarche répond à deux ambitions majeures. La première est d'accompagner la puissance publique et les industriels (les PME-PMI comme les grands groupes) pour produire des feuilles de route pour les différentes technologies qui contribueront à la neutralité carbone à l'horizon 2050 et, plus généralement, évaluer la pertinence de différents scénarios énergétiques. Seconde ambition : privilégier, du point de vue de la science et de ceux et celles qui la font, une approche partagée et transversale.



*Avec une approche intégrée du système énergétique, le CEA s'intéresse à tous les modes de production d'énergie bas carbone (énergie nucléaire, énergies renouvelables), à leurs interactions au sein du réseau (stockage, pilotage, conversion), à la problématique des ressources dans une logique d'économie circulaire, le tout prenant en compte les dimensions technico-économiques, sociétales et politiques.*

Structurées en treize grands programmes, les recherches menées au CEA sur les énergies bas carbone s'appuient sur un socle de recherches amont, sur le développement d'outils de simulation prédictifs et validés ainsi que sur un parc d'installations expérimentales pour certaines uniques au monde. Ces recherches s'articulent selon quatre grands axes :

#### AXE 1

la production d'énergies décarbonées, avec le soutien au nucléaire d'aujourd'hui et de demain (réacteurs de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> générations, cycle du combustible, réacteurs de 4<sup>e</sup> génération, SMR, défense), le développement de systèmes couplés (SMR non électrogènes associant le nucléaire à l'hydrogène ou à la fourniture de chaleur) et du solaire photovoltaïque. Le CEA travaille également sur la production d'hydrogène par électrolyse haute température et joue ainsi un rôle clé dans la constitution d'une filière industrielle française de l'hydrogène ; ces recherches font partie des axes stratégiques du programme France 2030, auquel le CEA s'associe activement ;

#### AXE 2

le fonctionnement technique du système énergétique pour en renforcer l'efficacité et la sobriété (outils de flexibilité et de stockage des énergies, pilotage intelligent de la demande sur les réseaux, conversions entre énergies) ;

#### AXE 3

la gestion optimisée des ressources disponibles (matières et matériaux) en pensant l'ensemble de leur cycle de vie (depuis les procédés utilisés pour leur fabrication jusqu'à leur recyclage) et en étudiant les moyens de convertir le CO<sub>2</sub> en énergie utile (économie circulaire du carbone mais aussi e-carburants) ;

#### AXE 4

la performance du système global, dont la progression est étudiée via l'évaluation de différents scénarios énergétiques intégrant une approche technico-économique.



# Faits marquants 2021

## STOCKAGE D'ÉNERGIE

### Les solutions pour des matériaux de batterie durables

Le CEA a pour objectif d'accompagner l'essor de la mobilité électrique, en développant des solutions innovantes pour augmenter les performances des batteries et également pour réduire l'impact environnemental de cette filière. Les travaux de recherche concernent ainsi la réduction ou la suppression des matériaux critiques de cathode (Co, Ni), et les aspects de seconde vie ou de recyclage des batteries dans une démarche d'économie circulaire. En 2021, le CEA a rejoint notamment ORANO au sein du consortium du projet RECYVABAT pour mettre au point un procédé de purification et de récupération sélective des métaux (lithium, cobalt, nickel, etc.) contenus dans les batteries des véhicules électriques, en vue de les recycler pour fabriquer de nouveaux composants de batteries. Deux pilotes industriels seront construits en France afin de conduire les essais techniques et les tests sur le procédé.



## STOCKAGE D'ÉNERGIE

### Améliorer les batteries grâce à la modélisation nucléaire

Les anodes de batteries Li-ion sont constituées de graphite incluant des particules de silicium dont il est important de connaître le comportement mécanique afin d'anticiper le vieillissement et le rendement des batteries.

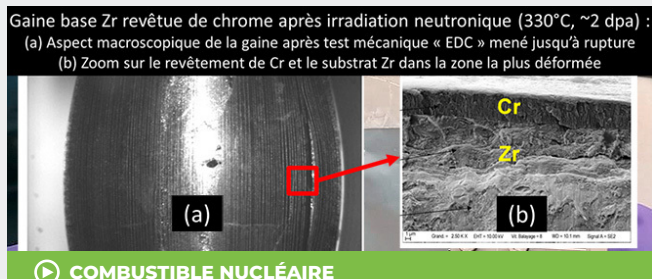
À cette fin, des équipes du **CEA-IRSN** et du **CEA-Liten** ont utilisé des outils numériques de modélisation du comportement du combustible nucléaire. En effet, à l'instar des inclusions d'oxyde de plutonium dans la matrice céramique d'uranium d'un crayon de combustible, les inclusions de silicium dans la matrice en graphite de l'électrode d'une batterie sont soumises à des sollicitations mécaniques sévères que ces outils permettent donc de modéliser.

Le comportement mécanique de la particule de silicium lors de la phase de décharge d'une batterie a été modélisé, en accord avec les observations expérimentales. Ce modèle a été complété en prenant en compte les fortes dilatations de l'électrode liées à la décharge, avec un formalisme utilisé pour décrire le ballonnement des crayons de combustibles nucléaires en situation accidentelle. Ces travaux montrent le bénéfice d'un revêtement carbone limitant les variations géométriques de la particule et réduisant significativement le risque de rupture.

**IRSN** : Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone, dépendant de la Direction des énergies

**Liten** : institut de la Direction de la recherche technologique dédié à la création de solutions en réponse aux enjeux climatiques, énergétiques et environnementaux





COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

### Premiers examens de crayons combustibles irradiés de type ATF

Concept innovant, les crayons combustibles de type **ATF** doivent permettre d'augmenter de façon importante la résistance de leur gainage en conditions accidentelles d'un **REP**, en regard des crayons utilisés actuellement sur le parc nucléaire.

Dans le cadre de la qualification industrielle de ces crayons ATF, Framatome a confié au CEA la caractérisation d'échantillons irradiés dans le réacteur commercial de Gösgen (Suisse). Réalisé dans le cadre d'un projet de France Relance, ce programme d'expérimentations suivi par le **CEA-ISAS** a démarré à l'été 2021 et les premiers examens de métrologie et d'observations par microscopie électronique à balayage (MEB) sur le revêtement chrome semblent en confirmer la bonne tenue. Les tests vont se poursuivre grâce aux nombreux moyens techniques de l'installation **LECI** du CEA (usinages, microscopies, essais mécaniques à biaxialité imposée...).

**ATF** : Accident-Tolerant Fuel

**REP** : réacteur à eau pressurisée

**ISAS** : Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone, dépendant de la Direction des énergies

**LECI** : Laboratoire d'essai des combustibles irradiés (il est essentiellement dédié à la caractérisation des combustibles et matériaux irradiés)

PHOTOVOLTAÏQUE

### Changement d'échelle dans le recyclage des panneaux photovoltaïques

La délamination de modules photovoltaïques (PV) par CO<sub>2</sub> supercritique est une alternative aux procédés actuels - thermiques, chimiques ou mécaniques - pour la séparation et la valorisation de leurs différents constituants (verre, polymères...) dans une logique d'économie circulaire des matières.

Dans le cadre du projet européen PHOTORAMA, le **CEA-ISEC** en collaboration avec l'**Ines** a mené des études en laboratoire permettant d'envisager le changement d'échelle de ce procédé pour des panneaux de taille réelle (2 m<sup>2</sup>) et sa mise en œuvre finale sur une ligne pilote. L'objectif ? Le recyclage de 1000 tonnes de panneaux photovoltaïques par an.

**ISEC** : Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone, dépendant de la Direction des énergies

**Ines** : Institut national de l'énergie solaire (CEA/Université Savoie Mont Blanc)

**Panneaux photovoltaïques : séparer pour mieux recycler**

PHOTOVOLTAÏQUE



### Des modules HET avec interconnexions shingle industrialisables

La nouvelle technologie d'interconnexion de cellules photovoltaïques appelée *shingle* offre des densités de puissance et un rendement énergétique plus élevés, des pertes *résistives* plus faibles que celle actuellement utilisée, et à un coût compétitif. Utilisée sur les toitures industrielles, elle présente également un meilleur aspect esthétique. Le CEA à l'**Ines** a réalisé une première campagne de fabrication semi-industrielle de 10 modules *shingle* hétérojonction (HET), dans une configuration verre en faces avant et arrière. Certains modules comportent un encapsulant non bloquant pour les UV, qui permet d'atteindre une puissance moyenne en face avant de 214,15 W/m<sup>2</sup>, avec un rendement moyen de 21,41 % et un poids surfacique de 11,8 kg/m<sup>2</sup>, inférieur d'un tiers au type standard. Ce résultat les positionne dans le top 5 mondial sur l'échelle des modules HET industriels.

**Ines** : Institut national de l'énergie solaire (CEA/Université Savoie Mont Blanc)



## SIMULATION NUCLÉAIRE

## Premier jalon atteint pour le futur réacteur nucléaire numérique

Soutenu par Bpifrance et fort de neuf acteurs majeurs de la filière nucléaire, dont le CEA, le projet « Réacteur numérique » de R&D, débuté en janvier 2020 pour quatre ans, vise à créer un jumeau numérique de réacteur nucléaire. Il permettra de s'immerger virtuellement dans le fonctionnement d'un réacteur, de réaliser des études de simulation basée sur des modèles multi-physiques détaillés mais aussi de former des opérateurs du nucléaire et de renforcer les codes de calcul existants.

Une première version de l'un des « bancs » d'intégration a été livrée par le **CEA-ISAS**, permettant d'en confirmer le bon fonctionnement et de valider les choix technologiques du projet. Ce banc utilise le logiciel coupleur C3PO développé au CEA, pour piloter les codes de calcul et les échanges de données.

La future plateforme d'intégration sera composée de deux « bancs ». Le premier permettra au CEA de valoriser les compétences acquises dans le développement de la plateforme logicielle multi-physiques CORPUS, afin de doter la filière nucléaire française d'un modèle standardisé pour le couplage des codes de calcul de physique des réacteurs. Le second banc représentera l'échelle simulateur et permettra d'intégrer le code de calcul système de dernière génération CATHARE3.

**ISAS** : Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone, dépendant de la Direction des énergies



## SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES COUPLÉS

## Les recherches sur les SMR calogènes se poursuivent

Lancé en 2020, le projet IDNES (*Innovative Decarbonized Nuclear Energy Systems*) vise à élargir l'offre énergétique et les applications des SMR, au-delà de l'unique fourniture d'électricité. Deux applications majeures sont visées : la production de chaleur pour les réseaux urbains et la production d'hydrogène (H<sub>2</sub>) décarboné.

Les équipes du **CEA-IRSN** et du **CEA-Liten** conjuguent leurs expertises en nucléaire et en énergies renouvelables pour démontrer comment coupler un SMR fonctionnant en cogénération électricité-chaleur et un électrolyseur à haute température (EHT) nécessitant chaleur à 150 °C et électricité.

En 2021, les équipes ont réalisé le pré-dimensionnement des cœurs de réacteurs, combustible, échangeurs, remontage réacteurs et stockage thermique pour trois esquisses de SMR calogène de petite puissance (20 MWth) fournissant une température de 70 à 150 °C. Ces premiers travaux ont montré comment un réacteur de type NuwardTM, développé par la filière française, pouvait être partiellement dédié à la production d'H<sub>2</sub>. Ils ont en outre permis d'identifier la façon d'optimiser le rendement thermodynamique de ces systèmes hybrides. À terme, ces SMR calogènes pourraient être implantés en France et en Europe.

**SMR** : acronyme de Small Modular Reactors ou petits réacteurs modulaires en français

**IRSN** : Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone, dépendant de la Direction des énergies

**Liten** : institut de la Direction de la recherche technologique dédié à la création de solutions en réponse aux enjeux climatiques, énergétiques et environnementaux



▶ HYDROGÈNE

## Naissance de la joint-venture Genvia consacrée à la production d'hydrogène

Approuvée par la Commission européenne en janvier 2021, la création de la joint-venture Genvia consacrée à la production d'hydrogène a été officialisée en février avec la signature des accords entre le CEA, Schlumberger New Energy, Vinci et Vicat ainsi que l'Agence régionale énergie climat (Arec) de la région Occitanie. Lors du premier conseil d'administration, Florence Lambert a été nommée présidente de la société et le business plan ainsi que la feuille de route de déploiement associée ont été approuvés.

Rapidement opérationnelle, Genvia vise le transfert industriel de la technologie de rupture d'électrolyse haute température (EHT) pour la production d'hydrogène, développée par le CEA à Grenoble, puis à déployer une ligne pilote de fabrication d'électrolyseurs dans l'usine Cameron-Schlumberger à Béziers. Cette technologie permet d'une part d'atteindre un haut niveau d'efficacité, d'autre part de réduire considérablement la consommation d'électricité par kilogramme d'hydrogène produit. Elle est aussi la première à être complètement réversible, en étant capable de basculer du mode électrolyse à un mode pile à combustible. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour des utilisations flexibles en soutien au réseau électrique.



▶ HYDROGÈNE

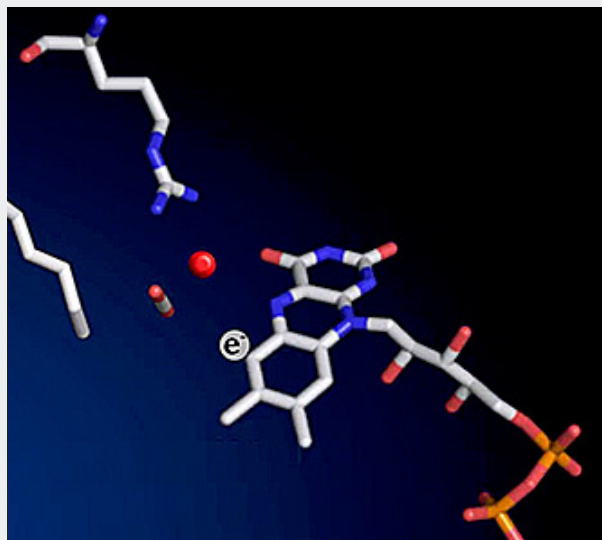
## Préparer les réseaux gaziers à l'arrivée de l'hydrogène

Produire massivement de l'hydrogène décarboné à partir de technologies d'électrolyse, comme celle transférée à notre partenaire Genvia créé en 2021, nécessitera d'adapter les moyens de transport et de stockage de l'hydrogène. Depuis plus de 15 ans, les chercheurs du **CEA-Liten** ont développé une expertise pour comprendre et modéliser les phénomènes physico-chimiques des matériaux sous environnement hydrogène. Dans le cadre du partenariat avec GRTgaz, leader européen du transport de gaz avec plus de 32000 km de réseau de canalisations, les résultats obtenus en laboratoire ont permis l'élaboration d'une base de données sur les matériaux des infrastructures de GRTgaz ainsi que la mise en place d'un protocole d'essais sous hydrogène représentatif des modes d'exploitation d'un réseau de transport gazier. Ceci confirme que le réseau de canalisations de GRTgaz est en mesure d'accepter l'injection de gaz contenant de l'hydrogène.

**Liten** : institut de la Direction de la recherche technologique dédié à la création de solutions en réponse aux enjeux climatiques, énergétiques et environnementaux







**CHIMIE VERTE ET BIOCARBURANT**

### Le fonctionnement d'une photo-enzyme clé décrypté

Naturellement présente dans des algues microscopiques, l'enzyme **FAP** est capable de catalyser la formation d'hydrocarbures à partir des acides gras produits par l'algue en présence de lumière.

Des chercheurs du CEA, des synchrotrons ESRF et SOLEIL et leurs partenaires ont décrypté les mécanismes de fonctionnement de cette enzyme en combinant des approches expérimentales et théoriques.

Outre des biocarburants, la FAP permettrait de produire des composés à haute valeur ajoutée pour la chimie fine, les cosmétiques ou la pharmacie. Plus fondamentalement, cette photo-enzyme commandable par la lumière ouvre la voie à l'étude de phénomènes ultra-rapides se déroulant au cours des réactions enzymatiques du vivant.

**FAP** : Acronyme de Fatty Acid Photodecarboxylase

**Chimie verte et biocarburant : le fonctionnement d'une photoenzyme clé décrypté**

**FUSION**

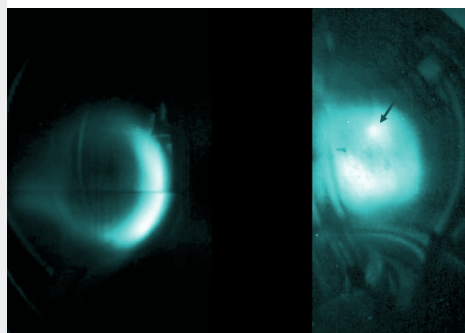
### Un « airbag » de deutérium

Une collaboration associant le **CEA-IRFM**, le consortium européen EUROfusion, ITER et des partenaires américains montre qu'il est possible de protéger efficacement les structures internes d'un réacteur de fusion contre des dommages causés par des électrons très énergétiques qui s'échapperaient du plasma de fusion à la suite d'une instabilité majeure.

Des expériences menées dans le tokamak européen JET (Grande-Bretagne) en 2019 et 2020 ont ainsi démontré qu'une injection massive de deutérium, sous forme d'éclats de glaçons, juste après l'instabilité de plasma, permet de dissiper l'énergie des électrons découplés sans aucun dépôt de chaleur mesurable sur les composants internes. Ces travaux se poursuivent pour détailler les processus physiques à l'œuvre dans cet effet protecteur.

**IRFM** : Institut de recherche sur la fusion magnétique (CEA/Euratom) dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**Un « airbag » de deutérium contre des effets potentiellement néfastes des instabilités de plasma**





## Transition numérique

Disposant de compétences de pointe en électronique, en robotique et en cybersécurité ainsi que d'une capacité unique à concevoir, construire et gérer des plateformes technologiques innovantes, le CEA est un acteur de premier plan de la transition numérique. Ses travaux sont menés au sein des **directions de la recherche fondamentale (DRF)** et de la **recherche technologique (DRT)**.

+ D'INFOS SUR LA DRF

+ D'INFOS SUR LA DRT

Dans un contexte marqué par la place grandissante des systèmes et objets intelligents (pour la mobilité, l'énergie, le manufacturing, les communications...) ainsi que celles des données (qu'elles soient issues de l'industrie ou du monde académique), le CEA entend contribuer à une transition numérique préservant les intérêts stratégiques, économiques et de souveraineté de la France et répondant aux préoccupations sociétales et environnementales comme aux besoins scientifiques et industriels.



*Le CEA dispose d'un éventail unique de compétences répondant aux différents enjeux de la transformation numérique.*

Depuis les années 2000, la transformation numérique, et l'évolution des usages qu'elle engendre, bouleverse profondément notre société. Cette transformation s'est accélérée avec la crise sanitaire et les périodes de confinement que nous avons connues. Et des sujets, comme l'accessibilité des réseaux et des équipements, la consommation d'énergie et l'impact environnemental lié aux pratiques numériques, et de façon plus globale la vulnérabilité des systèmes, sont devenus majeurs. Le numérique de puissance (calcul haute performance, traitement de données massives) est depuis de nombreuses années un « outil » indispensable à la réalisation d'un nombre grandissant de programmes du CEA.

Dans sa mission de soutien technologique à l'innovation industrielle, le CEA dispose d'un éventail unique de compétences répondant aux différents enjeux de cette transformation. Irrigués par des recherches fondamentales d'excellence, bénéficiant de plateformes technologiques innovantes, le tout couplé à une culture entrepreneuriale et industrielle forte, ses travaux, portés par plus de 3000 collaborateurs, couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur du numérique : depuis la conception de composants les plus avancés, y compris à l'échelle nanométrique, jusqu'à la mise au point de solutions numériques globales (matérielles et logicielles)



intégrant une approche cybersécurité. Afin de renforcer sa capacité à répondre aux enjeux associés à la transition numérique, le CEA a mené, durant l'année 2020, un exercice de prospective qui a mobilisé plus de 200 experts issus de l'ensemble de ses directions opérationnelles et dont les conclusions, présentées fin 2021, ont permis d'affiner sa vision et sa stratégie en matière de numérique.

L'activité des équipes du CEA, principalement à la Direction de la recherche technologique et la Direction de la recherche fondamentale, concerne à la fois la R&D sur les différentes technologies numériques, qu'elles soient matérielles ou logicielles, ainsi qu'en amont des recherches plus fondamentales. Trois grands sujets sont ainsi couverts : la microélectronique (matériels), les systèmes numériques (logiciels) et la cybersécurité pour assurer leur protection et leur intégrité (composants comme systèmes).

En **microélectronique**, où le CEA s'est investi dès l'origine par ses recherches sur l'atome, des travaux sont menés à la fois sur la conception de circuits intégrés et de dispositifs (objets communicants, imageurs...). Ils concernent également les nanosciences et l'ingénierie quantique explorés autour de deux axes : d'une part, la nano-physique avec l'objectif de maîtriser et manipuler des phénomènes de nature quantique pour en obtenir de nouvelles propriétés fonctionnelles, d'autre part la synthèse, la modélisation et la caractérisation de nanomatériaux, de nano-objets et de nano-dispositifs et de capteurs. Le savoir-faire des équipes du CEA dans les **technologies quantiques** a fait de l'organisme un des co-pilotes du plan gouvernemental appuyé sur le PIA4, et en particulier le Programme et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) « Quantique », consacré à ces technologies, avec le CNRS, Inria, en association avec les Universités.

Pour les **systèmes numériques**, le CEA explore plusieurs voies : les technologies de l'intelligence artificielle ; les systèmes cyber-physiques, conçus comme des réseaux informatiques avec des entrées et des sorties physiques (au lieu de dispositifs autonomes) ; les outils et l'ingénierie pour la conception et la validation des systèmes numériques, avec par exemple les plateformes Papyrus (permettant de modéliser « pas à pas » le système informatique à mettre au point) et Frama-C (analyse et preuve de programmes) ; enfin, l'instrumentation numérique où, pour

le contrôle non destructif, le CEA occupe une position de « leader mondial » avec son logiciel de simulation CIVA.

Avec le développement grandissant du numérique, la **cybersécurité** est devenue un enjeu majeur pour les Etats et les acteurs économiques, et un secteur d'activité en forte croissance avec des acteurs industriels nationaux compétitifs. Parce qu'il est confronté à des problématiques propres de cybersécurité en tant qu'exploitant de ses systèmes d'information (SI) et opérateur de systèmes industriels (ICS), le CEA mène à la fois des actions opérationnelles et de R&D. C'est notamment le cas dans les domaines de la production et de la gestion de l'énergie ainsi que de la sécurité globale. Sur ce champ, il s'agit d'une part de répondre à ses besoins propres et à ceux de la DGA et de l'industrie française de la Défense (Thalès, MBDA, Naval Group...), d'autre part de mettre au point les technologies (logicielles et matérielles) des futures solutions de confiance qu'attendent les industriels cherchant à sécuriser leurs produits, systèmes et services. C'est cette expertise qui a conduit les pouvoirs publics, en février 2021, à confier au CEA, avec le CNRS et Inria, le pilotage du PEPR « Cybersécurité » dans le cadre du plan national de relance.



# 3 000

**NOMBRE DE COLLABORATEURS TRAVAILLANT DANS LE DOMAINE DE LA TRANSITION NUMÉRIQUE AU CEA**



Tous ces travaux de recherches considèrent que la limitation de l'impact environnemental des applications du numérique est un enjeu majeur. Ainsi, des travaux sont menés pour réduire l'empreinte énergétique et environnementale de la fabrication des composants du numérique (analyse de cycle de vie, économie de matériaux critiques, matériaux de substitution, réparabilité...) et de leur usage (architectures et composants basse consommation, architecture des réseaux de données et utilisation de réseaux distribués...).

L'implication du CEA dans la transition numérique se retrouve également dans l'expertise qu'il a développée de longue date dans le domaine du **calcul haute performance** (HPC), notamment sous l'impulsion du « Programme simulation » porté par sa Direction des applications militaires, et par les besoins exponentiels des projets et outils de recherche en génération et traitement de données. Le CEA dispose ainsi, sur son site de Bruyères-le-Châtel, d'un complexe de calcul scientifique parmi les plus importants en Europe au service de la Défense, de l'industrie et de la recherche académique. Le CEA pilote ou participe également aux grandes infrastructures et plateformes numériques de recherche, notamment en santé avec France Génomique, le CATI ou encore N4HCloud.

Nombreux sont les domaines où la puissance de calcul joue désormais un rôle central. La simulation numérique et le HPC sont utilisés massivement depuis de nombreuses années, par exemple en climatologie pour mieux comprendre les phénomènes météorologiques ou évaluer les risques naturels ; en chimie et en biologie pour explorer les mécanismes du vivant ; en physique des matériaux pour qualifier de nouveaux concepts et éprouver leur robustesse ; dans le domaine de l'énergie pour concevoir les installations de demain ou faciliter la maintenance et la sûreté de fonctionnement des installations actuelles... En corollaire, l'exploitation des données est déterminante dans la compréhension et l'analyse des phénomènes physiques, chimiques et biologiques. Mais obtenir des résultats fiables et robustes nécessite de disposer de **données massives** et de qualité. Là encore, le CEA occupe une position particulière car il dispose d'une expertise reconnue dans la production et la maîtrise de telles données : données observationnelles, spatiales, environnementales, de santé, de physique fondamentale, résultats de simulations numériques...

Cette expertise concerne également la reconstitution d'informations sur des données parcellaires ou, plus important encore, par le croisement et l'intégration de données hétérogènes. Ce dernier point est fondamental pour la médecine : c'est grâce à l'analyse croisée de multiples sources de données de santé (génomiques, cliniques, imagerie...), rendues cohérentes et donc interprétables, qu'il sera possible de personnaliser diagnostics et traitements. Cette démarche s'appuie sur des équipes pluridisciplinaires, croisant ingénieurs-chercheurs et datascientists, et des plateformes aussi bien portées vers l'innovation industrielle que la recherche exploratoire (solutions quantiques, électronique ultime).

Fort de l'ensemble de ces compétences au sein de toutes les directions opérationnelles, le CEA a lancé en 2020 avec son partenaire allemand Forschungszentrum Jülich (FZJ), la création d'un laboratoire virtuel Franco-Allemand, AIDAS (AI – Data Analytics – Scalable Simulation) dans le domaine du numérique de puissance afin de renforcer les partenariats sur ces sujets et constituer un acteur de poids à l'échelle européenne.

Enfin, dans le prolongement des travaux de la mission numérique, le CEA s'est doté en 2021 d'un comité opérationnel pilote d'éthique du numérique dont la vocation est d'examiner les projets de recherche et de développement industriel envisagés par ses chercheurs afin d'évaluer la manière dont les questions éthiques qui peuvent se poser sont prises en compte. Il accompagne ainsi la recherche et le développement industriel au CEA afin que la démarche éthique fasse partie intégrante de ces projets scientifiques.



# Faits marquants 2021



**GESTION DE CRISE**

## Deux démonstrateurs fonctionnels à Toulouse

COSY, la plateforme numérique de CEA Tech Occitanie a permis de mettre au point deux démonstrateurs fonctionnels de gestion de crise. Le premier, développé avec des partenaires régionaux dans le cadre du projet CRIZ'INNOV financé par la Préfecture de Région, est un démonstrateur de gestion de crise civile. Il propose un environnement numérique collaboratif permettant à plusieurs acteurs d'avoir à la fois une vision commune partagée d'une situation, et une vision spécifique à l'expertise de chacun pour une meilleure aide à la décision. Il a été testé sur un scénario librement inspiré des inondations dans l'Aude en 2018. Un second démonstrateur de crise, basé sur les mêmes technologies, est consacré à la gestion de crise en cybersécurité. Ces environnements numériques de supervision et de gestion de crise posent des défis d'interopérabilité des outils, de cohérence et de fluidité des interfaces.

**MICROÉLECTRONIQUE**

## Le CEA primé aux EARTO Innovation Awards 2021

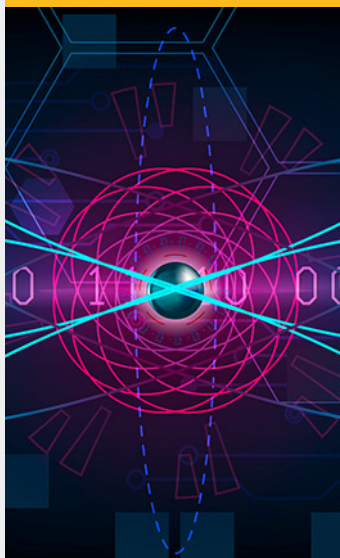
Lors de la dernière cérémonie de remise des EARTO Innovation Awards, le CEA a reçu le prix dans la catégorie « Impact », pour le développement, en collaboration avec SOITEC, d'un procédé breveté de fabrication de substrats baptisé Smart Cut™.

Tous les composants électroniques sont construits sur des substrats de silicium. L'originalité du procédé Smart Cut™ est qu'il apporte à ces substrats des propriétés spécifiques qui améliorent les performances des transistors et permet la co-intégration de fonctions logique et analogique.

La technologie Smart Cut™ réalise le collage par adhésion moléculaire, de couches monocristallines ultrafines d'un substrat à un autre. Elle fonctionne comme un scalpel à l'échelle atomique et permet de positionner une couche cristalline donnée sur tous types de matériaux.



## TECHNOLOGIES QUANTIQUES



## Une implémentation de l'algorithme de Shor certifiée pour la première fois

Comment pallier le manque d'outils d'analyse fiables pour certifier les programmes quantiques ? Pour y répondre, les chercheurs du **CEA-List** ont mis à profit leur forte expertise en méthodes mathématiques formelles et des techniques à l'état de l'art pour vérifier que des programmes informatiques classiques ne comportent pas de bugs, afin de les rendre compatibles avec la vérification de code quantique. C'est ainsi qu'a été développé QBrick, un environnement de spécification, programmation et vérification formelle de programmes quantiques.

Grâce à cette avancée significative, les chercheurs ont, pour la première fois, réussi à vérifier et certifier une implémentation de l'emblématique algorithme quantique de Shor. Ce dernier permettrait de casser les clés utilisées pour les transactions bancaires.

**List** : Institut de la Direction de la recherche technologique dédié aux systèmes numériques intelligents

## TECHNOLOGIES QUANTIQUES

## Avec une mémoire quantique, l'ordinateur quantique « maigrit » d'un facteur mille !

Alors que les scientifiques imaginent l'ordinateur quantique sous la forme d'un processeur sans mémoire, des chercheurs de l'**IPhT** ont évalué une nouvelle architecture associant processeur et mémoire quantiques avec l'algorithme de Shor, qui, s'il était mis en œuvre, permettrait de casser des systèmes de cryptage courants. Ils montrent que ce problème ne requiert plus que 200 000 **qubits**, soit un gain de deux ordres de grandeur ! En ajoutant des procédures de correction d'erreurs optimisées, le nombre de qubits diminue encore d'un ordre de grandeur pour atteindre 13 000.

Une barrière est tombée : avec les techniques actuelles, la réalisation de 20 millions de qubits à basse température conduisait à des volumes à refroidir tellement grands que c'était insurmontable.

**IPhT** : Institut de physique théorique (CEA/CNRS), dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**Qubit** : Analogie quantique du bit, unité la plus simple de stockage d'information

**i** Avec une mémoire quantique, l'ordinateur quantique « maigrit » d'un facteur mille !



## TECHNOLOGIES QUANTIQUES

## Une électronique cryo-CMOS pour le quantique

Les bits quantiques en silicium fonctionnent à basse température pour préserver au maximum leur état quantique. Or leur électronique de contrôle, devant être implantée au plus près nécessite donc d'être également refroidie.

En intégrant tous les composants électroniques et quantiques sur le même substrat, des chercheurs de l'**Irig** et du **CEA-Leti** ont démontré qu'il était possible de mesurer le courant traversant des « boîtes quantiques » avec des circuits CMOS classiques sur une puce refroidie à 10 millikelvins, en technologie silicium FD-SOI (*Fully Depleted Silicon On Insulator*).

Dans une version plus complète, la puce intégrera d'autres fonctions analogiques et numériques (multiplexeur, tampon, amplificateur de signal, oscillateur, convertisseur de niveau) pour des mesures de courant dans le domaine du gigahertz.

**Irig** : Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble (CEA / Université Grenoble-Alpes)

**Leti** : Institut de la Direction de la recherche technologique dédié aux micro et nanotechnologies

**i** Une électronique cryo-CMOS pour le quantique



## TECHNOLOGIES QUANTIQUES



## Des avancées en spintronique pour l'écosystème quantique

Des chercheurs de l'**Iramis** ont sondé, par comptage de photons micro-onde, un petit ensemble de spins électroniques d'ions d'erbium implantés dans le silicium. Ils sont ainsi parvenus à s'affranchir du bruit quantique inhérent à toute mesure classique ! En outre, ce système autorise la conversion cohérente d'états quantiques entre photons micro-onde et optiques. Un atout prometteur pour les communications quantiques et pour les échanges processeur-mémoire !

La même équipe a également prouvé que l'information quantique portée par des spins électroniques d'ions d'erbium isolés, au sein d'une matrice cristalline de tungstate de calcium (CaWO<sub>4</sub>), peut être conservée pendant 23 ms. CaWO<sub>4</sub> pourrait ainsi servir de support à un stockage temporaire d'informations quantiques.

**Iramis** : Institut rayonnement-matière de Saclay (CEA/CNRS/Ecole Polytechnique/Ensaen)

**i** Des recherches fondamentales qui enrichissent l'écosystème quantique

## INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

## Les étoiles anciennes tournent plus vite que prévu

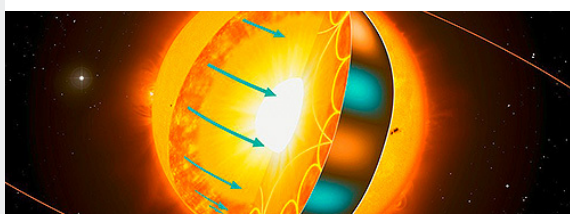
Les étoiles naissent comme lancées avec un mouvement de rotation qui est ensuite progressivement ralenti par des vents magnétiques. Ce freinage permet d'attribuer un âge aux étoiles « jeunes » quand elles présentent des taches sombres facilitant la mesure de la rotation.

Des chercheurs du **CEA-Irfu** ont développé des méthodes utilisant l'intelligence artificielle pour accéder à la rotation des étoiles jeunes observées par le satellite Kepler quel que soit leur aspect. Pour les étoiles les plus âgées, ils ont dû analyser les oscillations causées par des ondes sonores piégées dans l'astre pour déterminer leur rotation.

Le modèle astéro-sismologique se révèle plus cohérent et précis. Il confirme que les étoiles de l'âge du Soleil et plus ne voient pas leur rotation ralentir autant que le prévoit la théorie du freinage magnétique.

**Irfu** : Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**i** **Astérosismologie : les étoiles anciennes tournent plus vite que prévu**



## JUMEAU NUMÉRIQUE

## Une approche holistique du système de production

L'industrie évolue d'une logique de production de masse à une logique de personnalisation, posant des enjeux de flexibilité. Pour y répondre, les lignes de production doivent devenir modulaires et reconfigurables. Le **CEA-List** a développé la suite algorithmique OctoPCL, qui analyse et structure les nuages de points issus de la numérisation des scènes industrielles. En reconstituant les environnements de travail des opérateurs avec une qualité de rendu inédite, le jumeau numérique simule de façon réaliste les interactions homme-machine.

Parallèlement, en s'appuyant sur sa plateforme d'ingénierie logicielle Papyrus, les chercheurs ont mis au point des outils de simulation fonctionnelle permettant de tester et d'optimiser les différentes configurations des systèmes de production avant leur mise en place effective. Fonctionnel, interactif et immersif, ce jumeau numérique permet une approche holistique du système de production.

**List** : Institut de la Direction de la recherche technologique dédié aux systèmes numériques intelligents



## INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



## Diagnostiquer la résistance aux antibiotiques

Dans les pays industrialisés, la résistance aux antibiotiques peut être identifiée aisément grâce à des automates, des équipements coûteux que les pays en développement ne sont pas en capacité d'acquérir.

C'est pourquoi des chercheurs du **CEA-Jacob** ont participé avec le soutien de la Fondation MSF au développement de nouveaux algorithmes d'apprentissage automatique, capables de traiter efficacement des antibiogrammes sur smartphone. Ils les ont intégrés à une application facile à utiliser et fonctionnant sans connexion internet, à partir de photos d'antibiogrammes. 98 % des résultats fournis par l'application sont en accord avec les meilleures mesures.

MSF a évalué ses performances cliniques dans trois pays avant de la déployer dans tous les pays ciblés.

**Jacob** : Institut de biologie François-Jacob, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**i** [Diagnostiquer la résistance aux antibiotiques grâce à l'intelligence artificielle](#)

## CALCUL HAUTE PERFORMANCE

## Topaze, nouveau calculateur du CCRT

Depuis le 23 juin 2021, Le Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) accueille un nouveau supercalculateur baptisé Topaze, pour relever les défis du calcul haute performance et du traitement de données. Topaze fait partie de la gamme de supercalculateurs HPC d'Atos, issus de la R&D menée conjointement par Atos et le CEA. Il dispose d'une puissance de calcul crête de l'ordre de 8,8 **petaflops**. Ce supercalculateur permettra aux 21 partenaires du CCRT de relever les défis de leurs ambitieux projets dans le domaine de la simulation numérique et du traitement de données haute performance. Topaze est ouvert aux utilisateurs dans le cadre des « grands challenges » qui permettent d'exploiter pleinement ses performances de calcul.

**petaflops** : un million de milliards d'opérations par seconde



Soil and sediment microorganisms are remarkably diverse and are critical for ecosystem health

## BIG DATA

## La science des données révolutionne l'étude microbienne des sols

Des biologistes du **CEA-Joliot** et des chimistes de l'environnement du **LSCE** se sont associés pour sonder la structure des communautés microbiennes des sols, analyser leur fonctionnement et corréler les informations biologiques recueillies avec la présence de polluants (métaux, pesticides, antibiotiques, etc.).

Pour chaque échantillon de sol, ils ont effectué des millions de mesures de spectrométrie de masse à haute résolution et identifié des dizaines de milliers de protéines, qu'ils ont reliées aux organismes qui les produisent. Ils ont ensuite comparé les signaux enregistrés à des bases de données géantes. Leur méthodologie innovante leur a permis d'interpréter cinq fois plus de spectres de masse qu'auparavant : une révolution pour la métaprotéomique environnementale !

**Joliot** : Institut des sciences du vivant Frédéric-Joliot, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**LSCE** : Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA/CNRS/UVSQ)

**i** [La science des données révolutionne l'étude microbienne des sols](#)







## Technologies pour la santé

Le CEA est aujourd’hui un acteur reconnu en France pour la conception et l’intégration de technologies innovantes dans le domaine de la santé. Cette mission est portée par ses **directions de la recherche fondamentale (DRF)** et de la **recherche technologique (DRT)**.

+ D’INFOS SUR LA DRF

+ D’INFOS SUR LA DRT

Impliqué depuis sa création dans la recherche en biologie et en santé, le CEA entend aujourd’hui capitaliser sur l’ensemble des compétences qu’il a développées au fil des ans pour contribuer à l’émergence de la médecine du futur, en lien étroit avec des structures partenaires de recherche clinique. En s’appuyant sur une recherche fondamentale de pointe, il imagine et développe des technologies médicales intelligentes pour porter de nouvelles générations de thérapies et faire évoluer la médecine actuelle vers une médecine plus prédictive, personnalisée et préventive où le patient devient un acteur central du parcours de soins.



*Les recherches menées au CEA contribuent à faire émerger une ‘nouvelle’ médecine au bénéfice des citoyens et de la santé publique en général.*

Les recherches du CEA dans le domaine de la santé trouvent leur origine dans l’étude de l’impact des rayonnements ionisants sur le vivant et l’utilisation d’éléments radioactifs comme traceurs pour comprendre les phénomènes biologiques. Ces traceurs fournissent aujourd’hui un outil précieux pour les recherches fondamentales et appliquées du CEA. Ils constituent également la base de nombreux travaux menés dans le domaine des technologies pour la santé et nourris par les connaissances acquises dans les domaines variés sur lesquels se penche le CEA : biologie, chimie, physique, microélectronique, robotique, calcul, logiciels, cybersécurité...

L’ensemble des recherches menées au CEA contribue à faire émerger une « nouvelle » médecine, qui intégrera l’ensemble de la chaîne de valeur et des acteurs associés (recherche, innovation, soin) au bénéfice des citoyens et de la santé publique.

En lien avec les grands acteurs académiques, hospitaliers, industriels et dans le cadre de recherches précliniques et cliniques, le CEA développe des technologies, dont la plupart se combinent, pour explorer le vivant et élaborer des stratégies



innovantes de médecine de précision (diagnostic, suivi, prévention et thérapie). La multiplicité des compétences de ses équipes et sa capacité à concevoir et opérer des plateformes technologiques ouvertes et souvent uniques se matérialisent sous la forme de plusieurs infrastructures nationales que le CEA porte en biologie et santé/INBS (France Life Imaging, France Génomique, IDMIT, NeuraTRIS, NeuroSpin) et sur le numérique (N4HCloud). Le CEA est également partenaire d'INBS en biologie structurale (FRISBI), en protéomique (PROFI), en métabolomique (MétaboHub), en bioinformatique (IFB), en biotechnologies (Ibisba), sur les plantes (Emphasis). Cet investissement ainsi que sa politique ambitieuse de transfert des savoir-faire vers l'industrie positionnent le CEA comme un acteur fort du domaine de la santé.

L'ensemble des technologies qui fondent la médecine du futur nécessitent une interdisciplinarité forte entre biologistes, médecins, physiciens, chimistes, mathématiciens et informaticiens. Elles se déclinent au CEA dans quatre grands domaines : l'imagerie médicale et le développement des outils associés ; les outils pour la prévention primaire et le diagnostic ; les innovations thérapeutiques et les technologies associées et, enfin, l'analyse à grande échelle.

Le projet PASREL, à l'interface des différents domaines notamment couverts par le CEA, illustre l'objectif de connexion renforcée entre la recherche, l'hôpital et l'Industrie pour accélérer le développement technologique et le déploiement d'innovations au service du patient. Ce centre d'innovation et de recherche sera adossé au futur hôpital de Paris-Saclay à l'horizon 2026, l'ensemble constituant un exemple d'hôpital du futur fonctionnant au plus près de son environnement (population, patients, personnels de santé, communautés de recherche, industriels).

## IMAGERIE MÉDICALE ET OUTILS ASSOCIÉS

La stratégie actuelle du CEA en imagerie biomédicale porte sur des innovations de rupture et sa capacité à être un intégrateur de technologies. Il s'investit notamment dans les domaines de l'IRM à très haut champ, des nouveaux radio-pharmaceutiques, de l'imagerie multimodale et multi-échelles, du traitement du signal et de l'analyse d'images, de l'exploitation des données grâce aux méthodes de l'intelligence artificielle. Ces recherches associent différentes équipes au CEA dans le domaine des sciences du vivant mais également dans celui de l'instrumentation (aimants supraconducteurs, systèmes de détection gamma et X, échographie transcranienne...).



# 2026

INAUGURATION DU  
CENTRE D'INNOVATION  
ET DE RECHERCHE  
PASREL ADOSSÉ À  
L'HÔPITAL PARIS-SACLAY

## OUTILS POUR LA PRÉVENTION PRIMAIRE ET LE DIAGNOSTIC

Le CEA est activement impliqué dans la conception de dispositifs médicaux.

Pour les **dispositifs médicaux de diagnostic *in vitro***, les recherches menées ont pour priorités d'améliorer l'interface des capteurs avec le patient pour garantir la qualité des mesures (biocompatibilité, conformabilité, résorbabilité...) ; de définir des biomarqueurs ayant une pertinence translationnelle ; de mettre au point des capteurs et les algorithmes de traitement associés, ainsi que des tests de diagnostic rapide, dits « *Point of Care* », fondés sur l'ingénierie des anticorps, par exemple pour la détection d'agents infectieux ou la mesure de l'antibiorésistance.



Ces technologies facilitent l'accès aux soins et offrent des solutions intéressantes pour une médecine faiblement invasive ou ambulatoire, le suivi du patient et la prévention. Elles trouvent, par ailleurs, des applications dans le domaine du sport et du bien-être.

Autre voie explorée, celle des **dispositifs à composante biologique, organes sur puce et organoïdes**, qui pourraient jouer le rôle de « compagnons biologiques » avec trois applications principales : l'étude de mécanismes fondamentaux et de processus physiopathologiques, le support de cribles pharmacologiques (visant à trouver de nouveaux médicaments) et l'aide au choix de thérapies personnalisées. Les organoïdes offrent également la possibilité, à long terme, de restaurer partiellement et temporairement une fonction physiologique déficiente dans l'attente d'une transplantation d'organe (médecine régénérative). Un prototype de « *Pancréas sur puce* » est ainsi actuellement en développement à Grenoble, en lien avec le CHU Grenoble-Alpes, avec des progrès atteints sur la vascularisation et les fonctionnalités.

## INNOVATIONS THÉRAPEUTIQUES ET TECHNOLOGIES ASSOCIÉES

Le CEA cherche à développer des thérapies innovantes, physiques, chimiques et biologiques (thérapie génique, transfert de gènes, cellules souches, vaccins...) et travaille également sur la problématique associée de leur délivrance. Ainsi, en délivrant des doses contrôlées localement et ajustées selon la sensibilité individuelle, la radiothérapie est considérée comme une technique de précision dans le traitement des cancers. Les **thérapies géniques et cellulaires** occupent une place importante dans l'arsenal thérapeutique de la médecine du futur. Elles représentent un grand espoir de traitement personnalisé pour les malades qui se trouvent dans une impasse thérapeutique.

Associé à cette thématique, les capteurs et systèmes issus des micro et nanotechnologies sont des éléments clés pour proposer des méthodes innovantes dans le domaine de la bioproduction de médicaments et de vaccins.

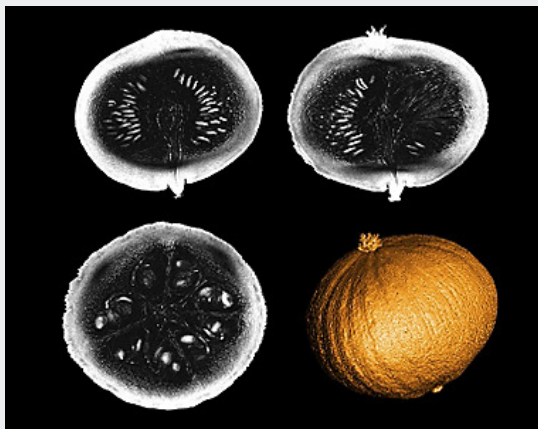
## ANALYSE À GRANDE ÉCHELLE

Dans le domaine des solutions de santé numérique, le CEA est activement impliqué dans trois actions :

- Le Plan France Médecine Génomique 2025, qui prévoit la mise en place de douze plateformes de séquençage diagnostique, adossées à un centre de référence (CReFIX) et la création d'une infrastructure nationale dédiée à la collecte des données génomiques à l'échelle nationale, à la fois pour le parcours de soin et le développement accéléré de la recherche clinique numérique (CAD, Collecteur Analyseur de Données) ;
- Le déploiement d'une plateforme de R&D pour le numérique en santé, N4HCloud, accessible aux communautés de recherche académique et privée, autour des données issues du centre d'acquisition et de traitements des images (CATI) dans un premier temps, et d'autres données « omiques » (**protéomique** et **métabolomique**) dans un second temps. N4HCloud a été installée au Très Grand Centre de Calcul du CEA (TGCC) et mis en production à l'automne 2020. Cette plateforme se veut préfiguratrice du CAD qui sera, pour son volet recherche, également hébergé au TGCC ;
- L'intégration de ces données avec d'autres données issues, par exemple, de l'imagerie ou, de manière plus générale, avec des données de **phénotype**, qui reflètent les particularités des maladies de chacun permettra de réduire drastiquement l'errance diagnostique et améliorer l'efficacité de traitements.



# Faits marquants 2021



IMAGERIE MÉDICALE ET OUTILS ASSOCIÉS

## L'IRM le plus puissant au monde livre ses premières images

Iseult, l'IRM à 11,7 teslas de NeuroSpin (CEA-Joliot), a produit ses premières images grâce à l'aimant supraconducteur hors norme conçu par le CEA-Irfu. Il permettra des avancées importantes en recherche fondamentale, en sciences cognitives et dans la connaissance des pathologies cérébrales.

Avec une résolution de 400 microns, les images d'un potimarron couronnent deux décennies de recherches utilisant des développements innovants pour le Cern. Elles sont le fruit d'une coopération franco-allemande initiée en 2006 et qui a notamment impliqué Bruker Biospin, Alstom (General Electric), Guerbet et Siemens Healthineers.

Les équipes visent désormais une résolution de 100 à 200 microns et procéderont bientôt aux premiers tests de l'antenne développée spécifiquement pour cet IRM, avant l'acquisition des premières images chez un être humain.

**Institut Joliot :** Institut des sciences du vivant Frédéric-Joliot, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**Irfu :** Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**Cern :** Laboratoire européen pour la physique des particules

**i** IRM à 11,7 teslas : l'aimant d'Iseult est pleinement opérationnel

IMAGERIE MÉDICALE ET OUTILS ASSOCIÉS

## Des micelles qui révèlent les tumeurs à l'IRM

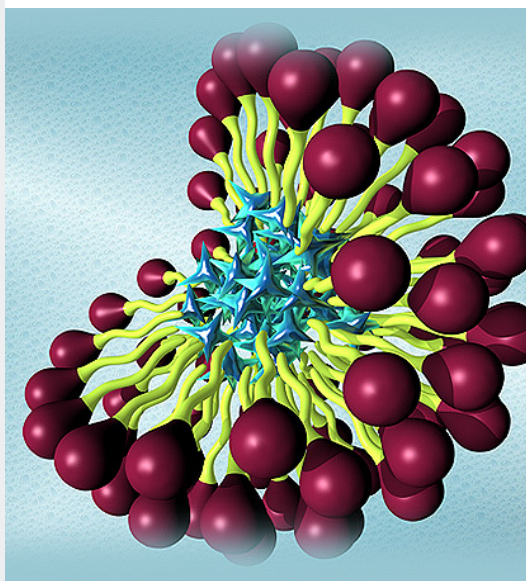
Afin d'améliorer la qualité du diagnostic par IRM en oncologie, des équipes du CEA-Joliot ont développé un vecteur nanométrique capable de transporter un agent de contraste fluoré (PERFECTA) plus performant que les autres, mais très peu soluble dans l'eau.

Ce nanovecteur est une micelle, c'est-à-dire un agrégat sphéroïdal de molécules hydrophobes à l'intérieur et hydrophiles à l'extérieur, dans lequel il est possible d'encapsuler des molécules de PERFECTA. À l'extérieur, les propriétés chimiques de la surface favorisent l'accumulation passive de micelles dans la tumeur.

En optimisant le fonctionnement de l'IRM, les chercheurs ont suivi avec succès, et en temps réel, la concentration de micelles contenant la molécule PERFECTA, dans des tissus tumoraux *in vivo*.

**Institut Joliot :** Institut des sciences du vivant Frédéric-Joliot, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**i** Des micelles qui révèlent les tumeurs à l'IRM

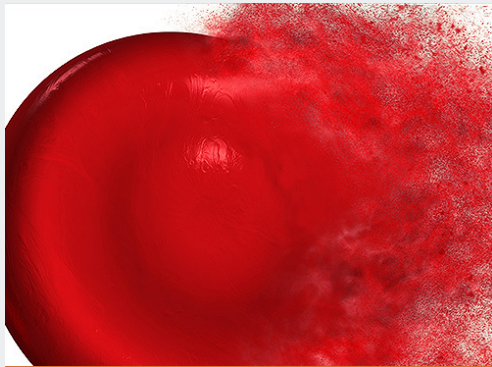


INNOVATIONS THÉRAPEUTIQUES

### CALIPSO révolutionne la production de biomédicaments

Regroupant six partenaires et doté d'un budget total de 17,5 millions d'euros, le projet CALIPSO affiche l'ambition de contribuer à rattraper le retard de la France en production de biomédicaments, lesquels représentent 40 % des médicaments en développement. Dans cette perspective, le projet vise à mettre au point une nouvelle génération d'outils révolutionnant les méthodes de développement et le pilotage des procédés industriels de production de médicaments par des organismes vivants (bioproduction).

Ces outils devraient contribuer à augmenter la productivité de certaines étapes de façon extrêmement significative, tout en assurant un très haut niveau de qualité des lots de biomédicaments. CALIPSO permettra notamment de poser l'un des premiers jalons vers des solutions de production plus flexibles et plus automatisées, nécessaires pour accompagner la mutation vers une médecine personnalisée.



INNOVATIONS THÉRAPEUTIQUES

### Bêta-thalassémie : une nouvelle stratégie thérapeutique

Des chercheurs du **CEA-Jacob** et leurs partenaires ont développé une thérapie génique par vecteur lentiviral pour la  $\beta$ -thalassémie (ou « maladie des globules rouges ») qui astreint les patients à des transfusions régulières. Celle-ci a été évaluée entre 2010 et 2019 avant de recevoir une autorisation de mise sur le marché du médicament sous certaines conditions.

Elle est aujourd'hui perfectionnée par la même équipe. Elle peut être administrée à tous les patients et le nombre de copies de gène introduites par le vecteur viral par cellule a été réduit pour tous. Ces résultats très encourageants laissent entrevoir de nouvelles perspectives thérapeutiques pour les patients les plus sévèrement touchés ainsi qu'une augmentation du rapport bénéfice/risque pour l'ensemble des patients traités par ce vecteur.

**Institut Jacob :** Institut de biologie François-Jacob, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**Bêta-thalassémie : une nouvelle stratégie thérapeutique**

INNOVATIONS THÉRAPEUTIQUES

### Covid-19 : développement d'un nouveau candidat vaccin ciblant les cellules dendritiques

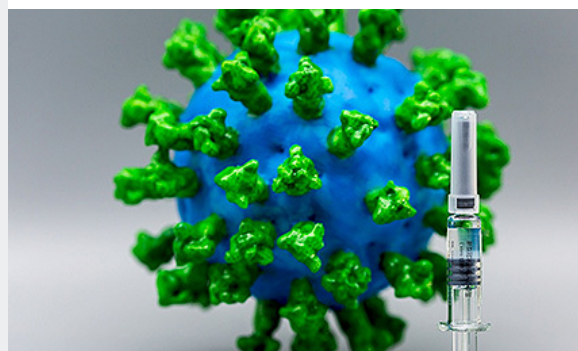
Les cellules dendritiques jouent un rôle clé dans le système immunitaire et le ciblage de vaccins sur ces cellules permet d'augmenter la réponse anticorps et cellulaire, comme cela a été démontré par l'équipe du **CEA-Jacob** dans un modèle du VIH.

Dans des modèles utilisant des animaux convalescents (ayant contracté le SARS-CoV-2 six mois plus tôt), ces chercheurs, en collaboration avec l'Inserm et l'Université Paris-Est Créteil, ont étudié un vaccin composé d'un anticorps monoclonal ciblant une molécule exprimée à la surface des **cellules dendritiques** (CD40) et fusionné à un peptide du SARS-CoV-2. Ils ont montré que l'administration d'une dose unique du vaccin, sans adjuvant, stimule une deuxième fois la production d'anticorps neutralisants, capables de contrôler le virus lors d'une réinfection. Des essais cliniques sont prévus en 2022.

**Institut Jacob :** Institut de biologie François-Jacob, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**Cellules dendritiques :** cellules du système immunitaire présentes au niveau des muqueuses, et qui sont donc parmi les premières cellules exposées à l'environnement extérieur. On les trouve dans l'épiderme, les poumons et l'intestin

**Covid-19 : développement d'un nouveau candidat vaccin ciblant les cellules dendritiques**

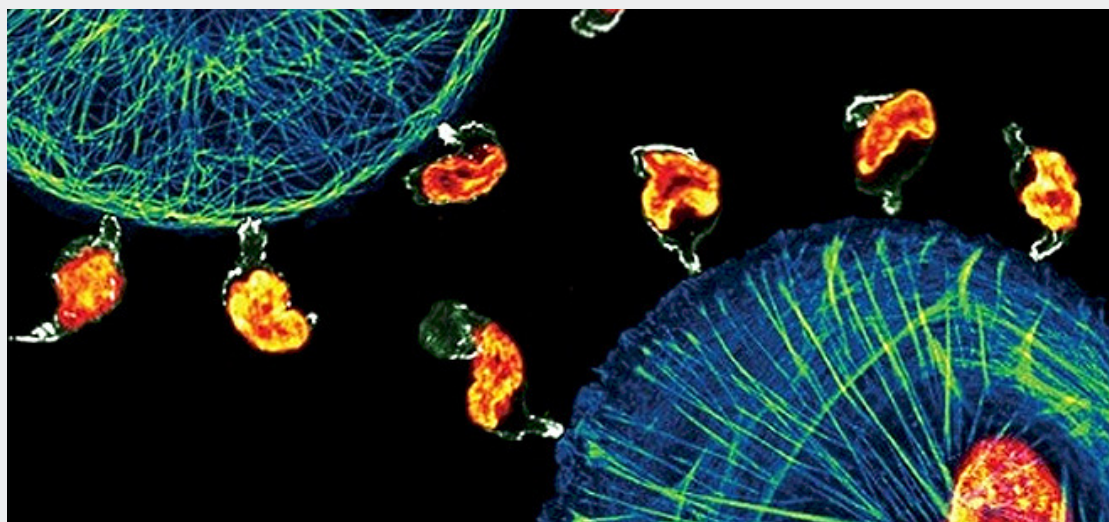


## INNOVATIONS THÉRAPEUTIQUES

### Un système d'imagerie infrarouge au service du diagnostic médical

Des équipes du **CEA-Leti** ont développé un système d'imagerie sans lentille opérant dans le spectre infrarouge pour accélérer et améliorer le diagnostic médical. Ce dispositif offre plusieurs débouchés dont la détection plus fine et plus rapide de cellules cancéreuses directement dans une coupe tissulaire, et l'identification de microorganismes tels que les bactéries. Présenté lors du Photonics West 2021 Digital Forum qui s'est tenu en distanciel du 6 au 11 mars 2021, cette technologie permet de s'affranchir de la phase de préparation d'échantillons - un gain de temps considérable pour les professionnels de santé. Les mesures infrarouges deviennent maintenant compatibles avec les exigences et contraintes des procédures de diagnostic des laboratoires hospitaliers et médicaux. La startup ADMIR a été essaimée en 2022 pour développer et commercialiser cette avancée.

**Leti** : Institut de la Direction de la recherche technologique dédié aux micro et nanotechnologies



## INNOVATIONS THÉRAPEUTIQUES

### Les cellules souches hématopoïétiques se mettent en quatre pour se différencier

Grâce à une « moelle osseuse sur puce » utilisant la microfluidique, des chercheurs de l'**Irig** et leurs partenaires (Inserm, Hôpital St-Louis, Université Paris Diderot) ont observé le début de la différenciation de cellules souches hématopoïétiques.

Le noyau des cellules souches non différenciées ou destinées à devenir des **lymphocytes** est entouré de façon homogène par les constituants du **cytosquelette** (microtubules) tandis que celui des cellules destinées à devenir des **macrophages** ou des **cellules dendritiques** est comme étranglé et fortement déformé. Lorsque les cellules souches arrivent au contact d'une cellule osseuse, certaines se réorganisent totalement. Cette découverte inattendue ouvre des pistes entièrement nouvelles pour étudier de nombreuses maladies comme les leucémies.

**Irig** : Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble (CEA / Université Grenoble-Alpes)

**Cellules souches hématopoïétiques** : type de cellules primitives (cellules souches) qui jouent un rôle fondamental dans le processus physiologique de production des cellules sanguines (hématopoïèse)

**Lymphocytes** : cellules du système immunitaire

**Cytosquelette** : ensemble organisé des constituants biologiques qui confèrent à une cellule l'essentiel de ses propriétés architecturales et mécaniques

**Macrophages** : cellules des leucocytes dont le rôle est de neutraliser les débris cellulaires et les agents pathogènes

**Cellules dendritiques** : cellules du système immunitaire présentes au niveau des muqueuses, et qui sont donc parmi les premières cellules exposées à l'environnement extérieur. On les trouve dans l'épiderme, les poumons et l'intestin

**i** [Les cellules souches hématopoïétiques se mettent en quatre pour se différencier](#)



## ANALYSE À GRANDE ÉCHELLE

## Le CEA partie prenante du Collecteur et Analyseur de Données, élément clé du PFMG 2025

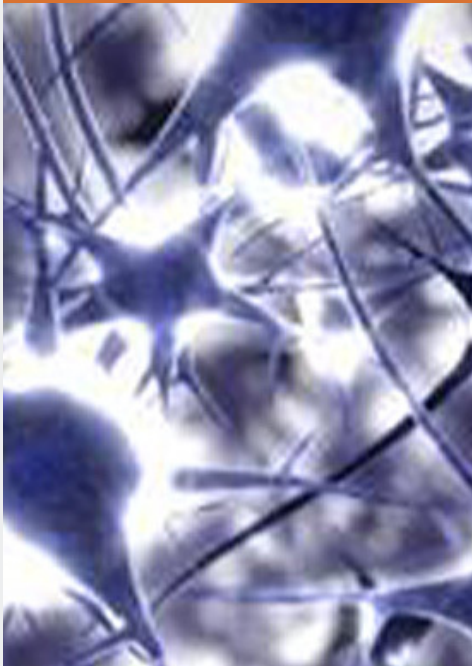
Dans le cadre du Plan France Médecine Génomique (PFMG) 2025, qui a pour vocation de démocratiser le séquençage du génome dans la pratique clinique, le projet du Collecteur Analyseur de Données (CAD) a été lancé en mars 2021.

Le CAD constituera une infrastructure de collecte des données génomiques et de mise à disposition de services sur le volet du soin, pour que les praticiens puissent interpréter les données génomiques collectées et rendre un diagnostic personnalisé à chaque patient, et sur le volet de la recherche, afin que la communauté de chercheurs ait la possibilité de mener des études sur ces données, dans le respect du consentement des patients. Ce dernier volet permettra au CEA de développer et de valoriser ses compétences dans les technologies du numérique en santé.



### **i** Collecteur analyseur de données (CAD)

## INNOVATIONS THÉRAPEUTIQUES

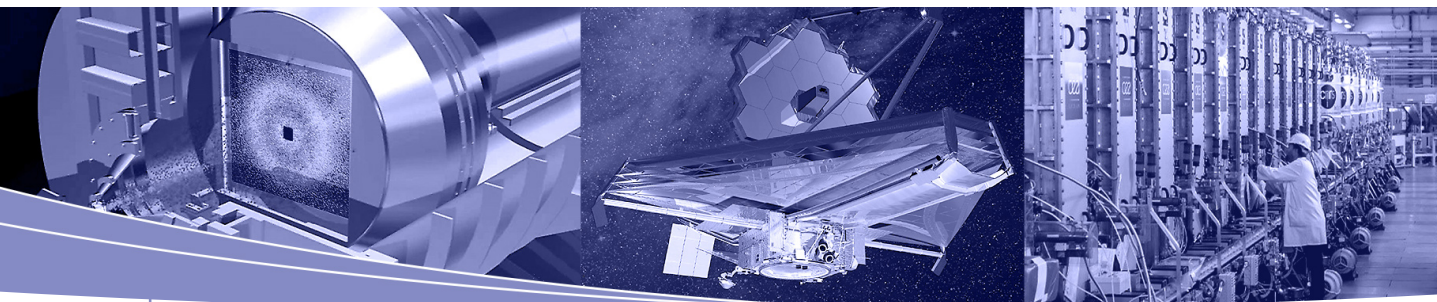


## Ralentir l'évolution de la maladie de Parkinson

Le CEA, le CHU Grenoble Alpes, l'Université Grenoble Alpes et Boston Scientific Corporation, société leader dans le domaine des dispositifs médicaux, ont démarré l'essai clinique du projet Near Infra Red (NIR), en mars 2021, pour une durée de quatre ans. Le projet repose sur une technologie proche infrarouge développée par le CEA, en collaboration avec Boston Scientific. Ce dispositif technologique pourrait réduire significativement la progression de la maladie de Parkinson, qui touche plus de 6,5 millions de personnes dans le monde. À la suite des excellents résultats précliniques obtenus en 2016, cet essai clinique vise à évaluer l'approche et la faisabilité de cette technologie chez les patients atteints de la maladie de Parkinson. Un premier patient a rejoint cet essai et a été opéré avec succès le 24 mars 2021.

### **i** Ralentir l'évolution de la maladie de Parkinson par la neuroillumination





## Recherche fondamentale

**En soutien de ses autres missions, le CEA s'investit dans le domaine des sciences du vivant, des sciences de la matière et de l'Univers, de la physique et des nanosciences. Ces activités sont menées par sa direction de la recherche fondamentale (DRF).**

[+ D'INFOS SUR LA DRF](#)

**En lien étroit avec l'écosystème scientifique académique, national et international, le CEA investit dans une recherche fondamentale d'excellence. Elle est à l'origine d'un spectre très étendu de savoirs et savoir-faire, au service du progrès des connaissances comme de l'ensemble de ses missions et au bénéfice de la société.**

« Dans une double dynamique de questionnements fondamentaux et de réponse aux grands enjeux sociétaux, les équipes pluridisciplinaires de la DRF, qui intègrent une forte composante d'ingénierie, assurent le continuum de la découverte vers l'application. »

Le CEA développe une recherche fondamentale de pointe dans les disciplines qui fondent son action : la physique, la chimie et la biologie. La Direction de la recherche fondamentale (DRF) regroupe la majeure partie de cette activité. Les équipes de la DRF développent un spectre large de connaissances et d'outils d'exception au meilleur niveau mondial. Elles contribuent à l'exploitation de grandes infrastructures de recherche au bénéfice de la communauté scientifique. Elles participent ainsi au rayonnement scientifique et technologique du pays. Les résultats de ces recherches alimentent les missions technologiques du CEA tout en assurant, plus largement, la pérennité des compétences nécessaires à leur réalisation.

### RÉPONDRE À DE GRANDES QUESTIONS FONDAMENTALES DANS CINQ DOMAINES

Les questions qui marquent la frontière des connaissances sont en constante évolution au fil des découvertes et de l'émergence de nouvelles interrogations. Le CEA se concentre aujourd'hui sur cinq grandes questions en science de la matière et du vivant qui intègrent sciences et technologies et ont souvent une dimension interdisciplinaire et un impact sociétal :





### • Les lois fondamentales de l'Univers et le monde quantique

Les équipes du CEA étudient les propriétés des lois fondamentales de l'Univers, au Cern et auprès des grandes expériences internationales sur les neutrinos. Elles tentent ainsi de dépasser le «Modèle standard», avancée théorique majeure du XX<sup>e</sup> siècle permettant de décrire l'Univers aux plus petites échelles mais que l'on sait incomplet. Elles œuvrent également pour le développement d'une «nouvelle physique» grâce à l'observation de l'Univers à grande échelle comme en particulier la question non résolue de la matière noire et l'énergie noire. La physique quantique est au cœur de ces questions et, plus globalement, les équipes CEA s'investissent sur le «quantique», toujours en fort développement tant au niveau fondamental qu'applicatif.

### • Les nouveaux matériaux et états de la matière

Le CEA s'appuie sur un ensemble d'expertises en physique de la matière condensée, en particulier dans le domaine de la synthèse et de la caractérisation de nouveaux matériaux, présentant des propriétés remarquables pour les technologies de l'énergie et de l'information de demain. Il développe également des outils de pointe pour la R&D de source compacte de neutrons, l'étude de processus physico-chimiques ultra rapides et de phénomènes complexes et hors d'équilibre (turbulence).

### • Les évolutions du climat et de l'environnement

Les équipes étudient l'évolution des mécanismes climatiques passés et présents pour en comprendre la dynamique et améliorer les prévisions des changements en cours en particulier grâce à des simulations à grandes échelle. Elles étudient également, depuis le sol et l'espace, la composition de l'atmosphère notamment en gaz à effet de serre pour surveiller les changements planétaires et l'impacts des activités humaines sur l'environnement.

### • Les mécanismes fondamentaux du vivant

Le CEA caractérise les organismes à toutes les échelles spatiales et temporelles par une approche multidisciplinaire et intégrative de la biologie. Cette approche permet également de mieux comprendre les modifications pathologiques associées aux cancers et aux maladies infectieuses, immunologiques et neurodégénératives, mais également de mesurer l'impact des changements environnementaux sur la biodiversité.

### • L'organisation du cerveau et le code neural

Le CEA est un acteur majeur en neurosciences avec un ensemble unique d'instruments de pointe, depuis l'IRM humain le plus puissant du monde jusqu'au microscope trois-photons, des cryomicroscopes de haute résolution, en passant par des capteurs électriques et magnétiques ultimes, et des méthodes de stockage, de traitement et d'analyse des données par intelligence artificielle. Ces outils donnent des moyens d'investigations pour observer, cartographier et quantifier l'activité cérébrale et comprendre le fonctionnement cérébral depuis le neurone unique jusqu'à la dynamiques des réseaux connectés. Ils permettent également des études pour mieux comprendre les dysfonctionnements qui provoquent les maladies neurodégénératives et psychiatriques.

Pour mener à bien cette mission de recherche fondamentale, le CEA développe un ensemble d'outils innovants pour les besoins de ses recherches et de la communauté scientifique. Il conçoit et réalise de grands instruments qui contribuent à la compétitivité des grandes infrastructures de recherche nationales et internationales. Ces développements favorisent l'innovation et le transfert industriel dans les domaines des cryotechnologies (accélérateurs, grands aimants, spatial), des systèmes de détection, d'imagerie, de la simulation, du traitement de données et du calcul intensif.



**3700**  
LE NOMBRE ANNUEL  
DE PUBLICATIONS  
DANS DES REVUES  
SCIENTIFIQUES



## SE POSITIONNER SUR DE GRANDS ENJEUX SOCIÉTAUX

À travers cette approche interdisciplinaire intégrant science et technologie, la recherche fondamentale du CEA contribue à apporter des solutions aux grandes questions de sociétés.

Dans le domaine du **numérique**, la recherche fondamentale du CEA a été pionnière sur les technologies quantiques. Aujourd'hui en alliant recherche fondamentale et recherche technologique le CEA est l'un des leaders européens du domaine. Le CEA est un élément clef de la stratégie nationale sur les technologies quantiques présentée en janvier 2021 par le Président de la République. À ce titre, le CEA co-pilote, avec le CNRS et l'Inria, le programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) avec des actions ciblées sur les qubits Silicium en technologie CMOS pour l'intégration à grande échelle, les qubits robustes supraconducteurs pour réduire les erreurs, les algorithmes et l'environnement logiciel ainsi que la communication quantique.

La recherche fondamentale explore de nouveaux matériaux et procédés visant à améliorer l'efficacité, les performances et la recyclabilité des technologies de l'énergie et à réduire l'utilisation de matières stratégiques, rares ou toxiques pour l'homme ou l'environnement. Le CEA déploie un ensemble de recherches en physique, chimie et biologie afin de convertir le gaz carbonique en produits de synthèse d'intérêt et ainsi développer une économie circulaire du carbone. Dans le domaine du nucléaire, les recherches fondamentales se concentrent sur les données nucléaires au service des réacteurs et du cycle ; les chercheurs mènent également des recherches sur la fusion par confinement magnétique afin de produire une électricité décarbonnée. La prédiction des impacts des changements du climat et de l'environnement participent également à la construction d'une **vision intégrée de l'énergie**.

Dans le domaine de la **santé**, l'expertise du CEA dans les sciences du vivant et les infrastructures de recherche associées dont il dispose, articulées avec les briques technologiques qu'il développe et ses compétences dans le numérique, le positionnent comme un acteur des technologies de la médecine de demain, répondant à plusieurs objectifs :

- contribuer à l'imagerie biomédicale du futur ;
- développer des dispositifs médicaux pour la détection et le diagnostic ;
- développer des solutions vaccinales et immunologiques contre les maladies infectieuses émergentes ;
- contribuer au développement de nouvelles approches thérapeutiques ;
- développer le numérique au service de la santé.

Dans le domaine de la **Défense** enfin, les travaux des équipes de la recherche fondamentale participent à la recherche duale dont le programme interministériel de R&D NRBC-E à travers, notamment, de la photonique avancée, des études sur l'antibiorésistance, des moyens de détection et des diagnostics des menaces biologiques et chimiques.

## CONTRIBUER À LA STRUCTURATION DE LA RECHERCHE ET À L'INNOVATION

Les équipes de la recherche fondamentale intègrent une forte composante pluridisciplinaire et d'ingénierie, qui participe au continuum de la découverte scientifique jusqu'aux applications. Elles travaillent le plus souvent au sein d'unités mixtes, participent aux stratégies de site des grandes universités de recherche (notamment des universités Paris-Saclay, Grenoble Alpes et Aix-Marseille) et aux écosystèmes régionaux de l'innovation en lien avec l'industrie.

La recherche fondamentale du CEA est également très engagée dans l'information scientifique et la formation. Par des avancées spectaculaires sur des sujets qui concernent les enjeux de société, elle participe à l'excellence du CEA et contribue aux progrès de la science et à son attractivité.



# Faits marquants 2021

## LOIS FONDAMENTALES DE L'UNIVERS

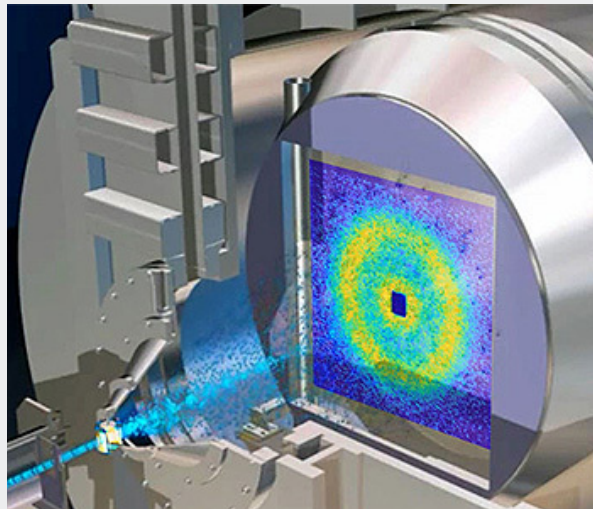
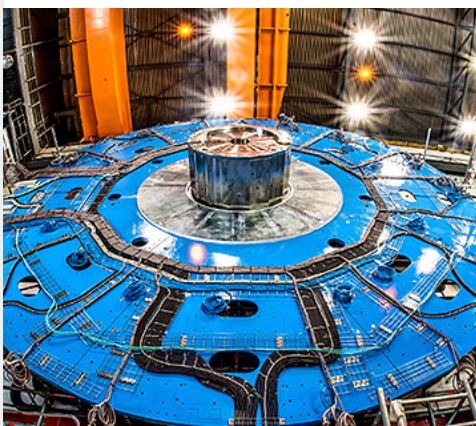
### Des détecteurs titanesques pour les nouvelles petites roues d'Atlas

Le collisionneur de particules du Cern (LHC) a été modifié pour accélérer un flux de particules plus important qu'auparavant. En particulier, le spectromètre à muons (des cousins massifs des électrons) de l'expérience Atlas s'est doté de deux petites roues de plus de cent tonnes chacune, équipées de nouveaux détecteurs. Le cahier des charges était exigeant : reconstruire la trace des muons à 50 µm près et mesurer leur vitesse avec une précision de 15 %, et ce, toutes les 25 nanosecondes !

La solution retenue ? Un pavage de 128 détecteurs Micromegas multicouches de 8 à 12 m<sup>2</sup> chacun, « à anode résistive », une technologie développée par le CEA et prometteuse pour les très hauts flux de particules. L'Irfu s'est chargé des 32 plus grands de ces détecteurs, soit le tiers de la surface utile des deux roues.

**Irfu** : Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**i** Les détecteurs «titanesques» des nouvelles petites roues d'Atlas en route pour le Cern



## NOUVEAUX MATÉRIAUX

### Un voyage fantastique au cœur des piles à combustible et des batteries

Quoi de commun entre une pile à combustible, un électrolyseur et une batterie tout-solide ? Une membrane polymère transportant des ions d'une électrode à l'autre !

Cet élément clé peut désormais être étudié *in situ* grâce à la diffusion de neutrons. Le contraste isotopique permet d'observer différents processus complexes à l'œuvre dans la membrane. Ces techniques développées par l'Irig et l'Iramis donnent accès à la structure de la membrane et à la dynamique des ions en fonction de l'hydratation et des conditions opérationnelles réelles de la cellule électrochimique. Les chercheurs ont ainsi observé que si la teneur en eau est trop faible, le transport des ions est freiné tandis qu'un excès d'eau fait gonfler la membrane, noie les électrodes et dégrade les performances de la pile.

**Irig** : Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble (CEA / Université Grenoble-Alpes)

**Iramis** : Institut rayonnement-matière de Saclay (CEA/CNRS/École Polytechnique/Ensicaen)

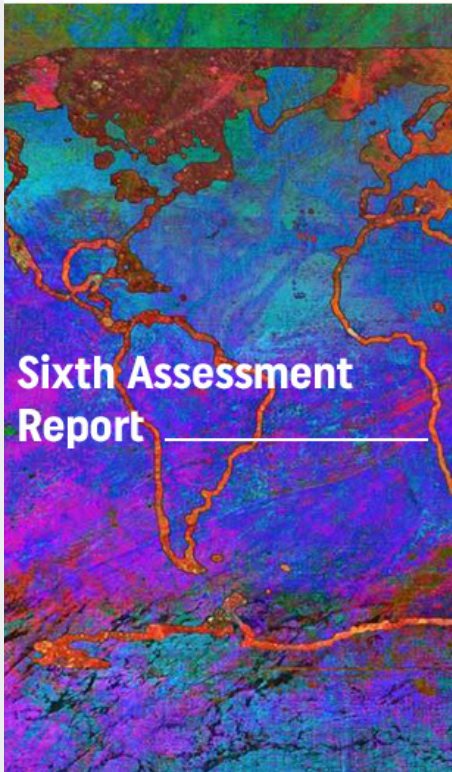
**i** Un voyage fantastique au cœur des piles à combustible et des batteries

Voir la vidéo : [Neutrons an inevitable tool for your research on fuel cell.](#)



ÉVOLUTIONS DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

ipcc REPORTS SYNTHESIS REPORT WORKING GROUPS ACTIVITIES NEWS CALENDAR



### Le volet scientifique du 6e rapport du Giec a été dévoilé le 9 août 2021

Plus d'une dizaine de scientifiques du **LSCE** ont contribué au volet scientifique du rapport du Giec à diverses fonctions : co-présidence du Groupe de travail, coordination et rédaction de chapitres, édition-révision et sensibilisation du public. Ce volet, le premier du 6<sup>e</sup> rapport du Giec qui sera achevé en 2022, a été approuvé par les 195 gouvernements membres du Giec et publié le 9 août 2021.

Les climatologues observent des changements dans l'ensemble du système climatique, sans précédent depuis des milliers, voire des centaines de milliers d'années. Certains de ces changements, comme l'élévation du niveau de la mer, sont déjà irréversibles pour des centaines ou des milliers d'années. Une des nouveautés du rapport est une présentation régionalisée (à hauteur de 30 % du contenu), assortie d'un atlas interactif.

**LSCE** : Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA/CNRS/UVSQ)

**i** [Le volet scientifique du 6<sup>e</sup> rapport du Giec a été dévoilé le 9 août 2021](#)

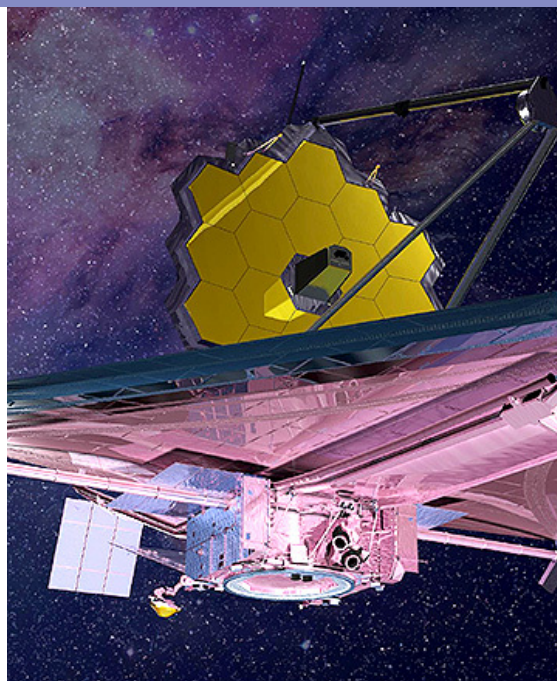
Lire le rapport : **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**  
 Consulter l'atlas interactif : **IPCC WGI Interactive Atlas**  
 Lire le CP du Giec : **«Climate change widespread, rapid, and intensifying»**  
 Lire l'interview de : **Sophie Szopa sur le site du CEA**

GRANDS INSTRUMENTS

### Un nouvel œil dans l'Univers

Lriane 5 a lancé avec succès, le 25 décembre 2021, le télescope spatial James Webb de la NASA, développé en coopération avec l'ESA et l'Agence spatiale canadienne. Webb observera dans l'infrarouge l'évolution de galaxies, d'étoiles et de planètes, et analysera l'atmosphère d'exoplanètes.

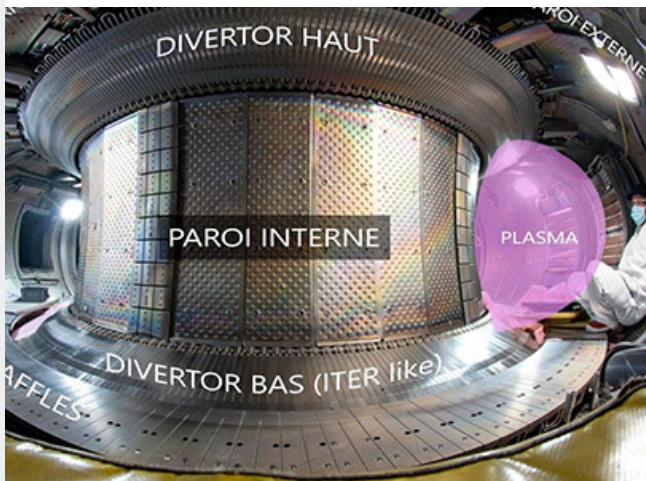
MIRIM, l'imageur de MIRI, l'un des 4 instruments embarqués, a été développé par le CEA, avec le CNRS et ses partenaires, sous la responsabilité du Cnes. Il offre différents modes d'imagerie, spectrographie et coronographie. Le grand diamètre du miroir primaire, le refroidissement actif à -258°C et les détecteurs avancés de MIRIM concourent à conférer à Webb une résolution angulaire sept fois plus grande et une sensibilité environ 50 fois supérieure à celle de son prédécesseur, le télescope spatial Spitzer lancé en 2003 et mis hors service en 2020 par la NASA.



## GRANDS INSTRUMENTS

**WEST s'habille en monobloc**

Le tokamak WEST (W Environment in Steady-State Tokamak) de l'**IRFM** à Cadarache s'est doté d'un « plancher » (divertor en anglais) en tungstène, analogue à celui d'ITER et qui présente la caractéristique d'absorber beaucoup moins le tritium que le carbone. Le divertor est constitué de 56 composants activement refroidis, comptant chacun 35 monoblocs de tungstène. Également équipé de nouveaux diagnostics, WEST devient ainsi un banc de test pour ITER.



Grâce à ses bobines de champ supraconductrices, WEST permettra de tester des composants les plus exposés au plasma – comme le divertor monobloc de type ITER – sur des temps longs, jusqu'à 1000 secondes, avec des niveaux de flux de chaleur importants ( $>10 \text{ MW/m}^2$ ), proches de ceux d'ITER.

**IRFM** : Institut de recherche sur la fusion magnétique (CEA/Euratom) dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**WEST s'habille en monobloc**

## ORGANISATION DU CERVEAU ET CODE NEURAL

**Lire les « lignes » du cerveau grâce à la reconnaissance automatique**

Si les plissements du cortex sont uniques pour chaque individu, certains motifs inhabituels observés ont pu être associés à un risque accru d'épilepsie ou de schizophrénie. Mais très peu de neuroanatomistes possèdent l'expertise requise pour analyser les surfaces corticales.

Pour étendre à plus grande échelle cette exploration, des chercheurs du **CEA-Joliot** ont développé trois algorithmes de classification qu'ils ont testés sur trois motifs corticaux, dont deux très répandus et le troisième, très rare et relié à l'épilepsie. Résultat : les motifs sont globalement bien reconnus (à 80 % pour les deux premiers et à 60 % pour le dernier), avec quelques variations d'efficacité suivant la rareté du motif.

**Institut Joliot** : Institut des sciences du vivant Frédéric-Joliot, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**Lire les « lignes » du cerveau grâce à la reconnaissance automatique**



▶ MÉCANISMES DU VIVANT

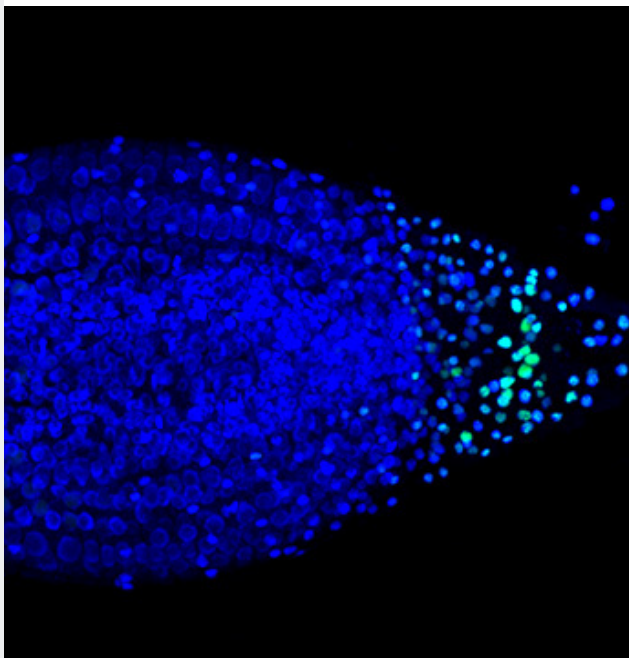
### Voir la transcription de l'ADN « en direct », dans toutes les cellules d'une plante

Pour la première fois, une équipe du **BIAM** donne à voir, en temps réel et avec une définition inédite, la transcription de l'ADN en ARN messager, dans les cellules de jeunes plantes. Ce direct exceptionnel révèle de précieuses informations sur des biomécanismes liés à la réponse de la plante à son environnement.

La transcription de l'ADN, au cours de laquelle l'information génétique portée par l'ADN est copiée et amplifiée sous forme d'ARN messager, est un mécanisme cellulaire essentiel dont la seule régulation implique pas moins de 5 à 6 % des gènes. Jusqu'à présent, elle avait été observée principalement sur des cellules animales isolées et fixées grâce à des techniques de pointe. Les chercheurs du BIAM sont parvenus à imager la transcription dans l'ensemble des cellules d'une plante.

**BIAM** : Institut de biosciences et biotechnologies (CEA/CNRS/Aix-Marseille Université)

**i** Voir la transcription de l'ADN « en direct », dans toutes les cellules d'une plante



▶ MÉCANISMES DU VIVANT

### Mystérieux télomères : un mécanisme de protection de l'ADN décrypté

Les extrémités des chromosomes, appelées télomères, ont une longueur finement contrôlée afin d'équilibrer vieillissement et prolifération cellulaires.

Or, chez la levure *Saccharomyces cerevisiae*, le complexe MRX, une protéine jouant un rôle clé dans la réparation des cassures doubles brins de l'ADN, contribue également au contrôle de la longueur des télomères. Pourtant, les télomères ne doivent être pas être réparés afin de prévenir toute fusion avec un autre télomère.

Grâce à des approches génétiques *in vivo*, guidées par des prédictions structurales *in silico*, des chercheurs des **instituts Jacob** et **Joliot** du CEA montrent qu'une protéine connue pour bloquer l'élongation des télomères (Rif2) se fixe à MRX seulement à leur niveau, empêchant MRX de s'accrocher à l'ADN.

**Institut Jacob** : Institut de biologie François-Jacob, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**Institut Joliot** : Institut des sciences du vivant Frédéric-Joliot, dépendant de la Direction de la recherche fondamentale

**i** **Mystérieux télomères : un mécanisme de protection de l'ADN décrypté**





## Assainissement démantèlement

**Le CEA est un acteur majeur de l'assainissement-démantèlement en France, en tant qu'exploitant nucléaire et opérateur de R&D. Cette mission est conduite par les équipes dédiées de la Direction des énergies (DES) et, pour certaines installations, de la Direction des applications militaires (DAM).**

+ D'INFOS SUR LA DES

+ D'INFOS SUR LA DAM

**À la fois exploitant nucléaire et opérateur de R&D, le CEA doit démanteler une grande variété d'installations, dont certaines sont très anciennes. Chaque démantèlement étant un cas particulier, le CEA dispose d'une expertise unique, aussi bien dans la maîtrise d'ouvrage des opérations que dans les méthodologies et les savoir-faire nécessaires à leur réalisation.**



*Le CEA est un acteur majeur de l'assainissement-démantèlement et de la gestion des déchets.*

Le démantèlement et la gestion des déchets qui en sont issus font partie intégrante de la vie d'une installation nucléaire, au même titre que sa conception, sa construction puis son exploitation. Ils constituent, pour la filière nucléaire, un enjeu majeur pour démontrer sa capacité à maîtriser l'ensemble du cycle de vie d'une installation. Les chantiers d'assainissement-démantèlement (A&D) ont un impact économique important : en termes d'emploi, du fait de l'ampleur et du nombre d'opérations à mener ; par les savoir-faire et les technologies requises (parfois valorisables dans d'autres secteurs) ; enfin, parce qu'ils sont appelés à se développer, en France et à l'international. Avec un large éventail de métiers et d'acteurs, la grande diversité des chantiers et des domaines d'activité, le marché de l'A&D concentre un écosystème extrêmement varié de start-up technologiques, de PME-PMI et de grands groupes.

Avec 36 installations nucléaires en démantèlement, plus de 1200 salariés mobilisés et près de 2500 emplois induits, le CEA est un acteur majeur de l'A&D et de la gestion des déchets. Plusieurs de ses sites sont concernés, dont celui de Marcoule qui est un des plus grands chantiers d'A&D en Europe. Sur la base d'une stratégie générale validée par les autorités de sûreté en 2019 et mise à jour en 2020, le CEA mène de front chantiers et R&D pour des opérations toujours plus sûres, techniquement et économiquement optimisées.





# 1200

LE NOMBRE DE  
SALARIÉS CEA  
TRAVAILLANT  
DIRECTEMENT OU  
INDIRECTEMENT  
DANS LE DOMAINE  
DU DÉMANTÈLEMENT

En tant qu'exploitant nucléaire et opérateur de R&D, le CEA doit démanteler des installations très diverses, dont certaines datent des années 1950 : réacteurs de différentes technologies, laboratoires de haute activité, usines du cycle du combustible, installations de traitement ou d'entreposage de déchets. Chaque démantèlement est spécifique et permet au CEA d'acquérir une expertise unique sur l'ensemble des opérations à réaliser (maîtrise d'ouvrage, méthodologies et savoir-faire nécessaires à leur réalisation).

Si une partie des chantiers d'A&D utilise des techniques courantes, adaptées au milieu nucléaire, certains projets nécessitent le développement d'outils ou de technologies spécifiques, en rupture avec les approches classiques. Le CEA mène dans ce but des programmes de R&D à finalité court comme moyen-long terme, pour optimiser les coûts, la durée et les conditions d'intervention sur les chantiers.

Qu'il s'agisse d'améliorer le travail en milieu hostile ou encore de mieux caractériser les déchets, de nombreuses innovations sont développées au CEA, souvent en partenariat avec des industriels mais également avec le soutien des équipes de ses différentes **directions opérationnelles**, et testées sur ses chantiers : robotique télé-opérée, réalité virtuelle, procédés de décontamination, dispositifs de mesures ultra-sensibles... Certaines sont ensuite valorisées au profit du tissu industriel français.

Durant l'année 2021, plusieurs actions structurantes pour l'organisation et le pilotage des opérations d'A&D ont été réalisées ou lancées. Concernant le pilotage des projets complexes, une démarche exploratoire avec l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a été enclenchée et s'est achevée en juillet 2022.

En termes d'organisation, le CEA a repris, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021, la responsabilité de Chef d'Installation de quatre installations individuelles à Marcoule, jusqu'alors intégralement opérées par Orano.

## L'ASSAINISSEMENT-DÉMANTÈLEMENT (A&D)

couvre l'ensemble des opérations menées après l'arrêt définitif d'une installation nucléaire jusqu'à son déclassement et qui sont toutes effectuées en lien avec les autorités de sûreté nucléaire, civile (ASN) et de défense (ASND) : démontage d'équipement, assainissement des locaux et des sols, démolition de structures de génie civil, traitement, conditionnement et évacuation des déchets produits. Chaque année, le CEA expédie ainsi environ 10 000 m<sup>3</sup> de déchets vers les centres de stockage de l'Andra, dont 80 % de déchets de très faible activité (TFA) et 20 % de déchets de faible et moyenne activité (FMA). Les déchets plus radioactifs sont conditionnés puis entreposés sur site, au CEA, dans des installations adaptées, dans l'attente de la mise en service d'exutoires dédiés. Parallèlement, des recherches sont conduites afin de réduire le volume de déchets, cibler au mieux les exutoires et définir les futurs sites de stockage. Enfin, le CEA travaille également à la conception, la fabrication et la duplication d'emballages de transport, le maintien en conditions opérationnelles et le démantèlement de ces emballages.

Pour aller plus loin : [Reportage - Au cœur d'un chantier de démantèlement](#)





# Faits marquants 2021

## A&D

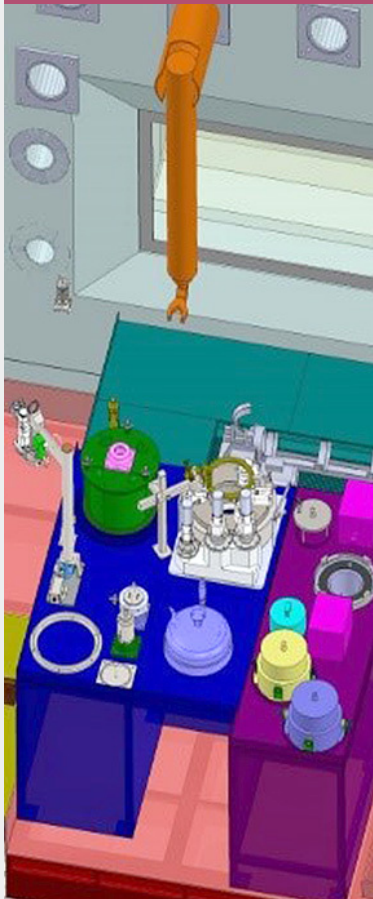
### Début de la découpe du broyeur du procédé de cryotraitement du CFCa

Implantée dans le Complexe de fabrication de Cadarache (CFCa), l'unité de cryotraitement avait pour objectif de traiter les déchets contaminés par du plutonium. Les opérations de découpe du broyeur, au cœur du procédé de cryotraitement, ont débuté le 7 septembre 2021, marquant ainsi la tenue de l'échéance d'un grand engagement de sûreté fixée à au second semestre 2021. La complexité de ces opérations réside dans l'environnement dans lequel elles sont menées (exiguïté des locaux, contamination) et dans la manutention des déchets massifs générés (environ 30 tonnes de déchets **FA-MA** prévues). La découpe du broyeur se poursuivra jusqu'en 2023.

**FA-MA** : faible activité - moyenne activité



## GESTION DES DÉCHETS



### Envoi des dossiers de sûreté du projet Decap à l'ASN

Des étuis contenant des **combustibles araldités** sont actuellement entreposés dans les piscines de l'installation Pégase et du réacteur d'essais à terre (RES) situés à Cadarache. L'objectif du projet Decap (Désentreposage des combustibles araldités de Pégase) est de les évacuer vers Cascad, installation dédiée à l'entreposage à sec de combustibles nucléaires, et ce sans élimination préalable de l'araldite.

La stratégie retenue dans le cadre de ce projet est double. D'une part créer au sein de Pégase, dans la cellule blindée existante, une chaîne de reconditionnement des combustibles araldités en conteneurs plus résistants que les actuels à la pression des gaz produits par la radiolyse de l'araldite, avant de les entreposer dans les puits de Cascad ; d'autre part implanter dans Cascad les équipements et dispositifs qui permettront le contrôle régulier de la pression interne de ces nouveaux conteneurs et d'effectuer, quand nécessaire, un dégazage pour évacuer les gaz produits par radiolyse de l'araldite.

La mise en service de ces nouveaux équipements dans Pégase et Cascad est soumise à l'autorisation de l'ASN. L'envoi des dossiers de sûreté à l'ASN marque l'achèvement d'un travail de près d'une année : 3000 pages pour le dossier de Pégase et 1300 pour celui de Cascad ! Il permet d'atteindre le jalon associé, avec trois mois d'avance. La revue de conception détaillée ayant eu lieu en octobre 2020 et la phase des études d'exécution s'étant achevée en juin 2021, la fabrication de tous les équipements du procédé a été lancée en parallèle.

**Combustibles araldités** : combustibles contenant des composés organiques. Résine polymère, l'araldite est utilisée pour l'enrobage des échantillons métallographiques de combustible.





▶ ASSAINISSEMENT

## Fin des assainissements des circulators HA de la STEL

Les circulators **HA**, composés de deux cuves cylindriques d'environ 10 m<sup>3</sup> autrefois utilisées par la station de traitement des effluents liquides (STEL) de Marcoule (30) pour traiter des effluents HA, contenaient des boues sèches depuis leur arrêt. Après une phase d'études jusqu'en 2016 suivie d'une phase d'aménagement jusqu'en 2018, des opérations de «chasses matières» (mises en eau, brassages et transferts vers les cuves de procédés de bitume) se sont déroulées entre 2018 et 2019. Les opérations d'assainissement, qui consistaient en des rinçages successifs par bain de soude, d'acide et d'eau, se sont achevés en mars 2021. L'ensemble des effluents générés ont été traités par la STEL via le procédé bitume.

**HA** : haute activité

▶ GESTION DES DÉCHETS

## Évacuation des derniers éléments combustibles irradiés d'Orphée, Osiris et Isis

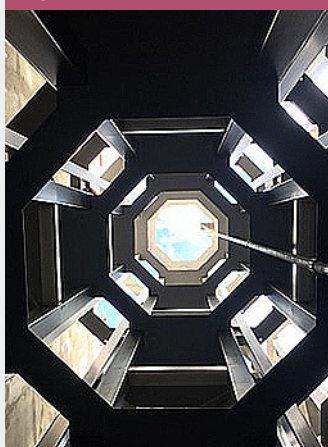
Le 7 octobre 2021, les 50 derniers éléments combustibles irradiés des réacteurs Osiris et Isis à Saclay (91) ont été évacués vers l'usine de retraitement d'Orano à la Hague. Avec l'évacuation des quatre derniers cœurs usés d'Orphée le 12 avril, ces opérations constituent l'atteinte d'un grand engagement de sûreté du CEA.

Pour réussir ces évacuations, les équipes ont mené les opérations suivantes : manutention, gestion des matières nucléaires, transports, contrôles radiologiques, etc. Certains des derniers éléments combustibles d'Osiris et Isis présentaient des caractéristiques atypiques : taux de combustion supérieur à celui autorisé dans l'agrément de l'emballage de transport, données géométriques non standards, etc. Ces particularités ont nécessité des actions préparatoires durant les semestres précédents afin de rédiger les dossiers de demandes d'autorisation et d'organiser les opérations techniques spécifiques.

Cette dernière évacuation était l'une des actions prioritaires pour préparer le démantèlement des réacteurs et contribuer à la réduction du terme source mobilisable sur le site de Saclay. Les opérations préparatoires au démantèlement se poursuivent pour les deux installations. Les dossiers de démantèlement ont été envoyés, en 2018 pour Osiris et en 2020 pour Orphée, et sont actuellement en cours d'instruction.



▶ GESTION DES DÉCHETS



## Envoi à l'ASN du dossier de mise en service de DIADEM

Fin juin 2020, le Dossier de demande d'Autorisation de Mise en Service (DAMS) de l'installation DIADEM située à Marcoule a été envoyé à l'ASN. Dans l'attente de la mise en service du centre de stockage profond pour les déchets **MAVL** et **HAVL** (Cigeo) par l'Andra, le CEA doit disposer d'installations d'entreposage pour ses déchets solides actuellement sans filière d'évacuation opérationnelle. L'installation DIADEM vise à entreposer les déchets ne pouvant être déposés dans l'installation CEDRA du centre de Cadarache, en attente de leur évacuation vers un futur site de stockage.

**MAVL** : déchets nucléaires de moyenne activité et à vie longue

**HAVL** : déchets nucléaires de haute activité et à vie longue

**GESTION DES DÉCHETS**



**Fin des essais de la phase 3.0 de l'installation NOAH**

Lancée le 24 août 2020, la campagne des essais de fonctionnement d'ensemble dite phase 3 de l'installation NOAH située à Marcoule s'est achevée le 8 septembre 2021, avec près de trois mois d'avance sur la date prévisionnelle. Ces essais se déroulent en trois étapes sur environ 4 ans, chaque étape étant constituée d'un temps d'essais suivie d'une période de traitement des réserves d'essais. La première étape (dite phase 3.0) avait pour objectif de tester une grande partie des configurations de fonctionnement, normal et incidentel, hors sodium, afin d'en valider les performances attendues.

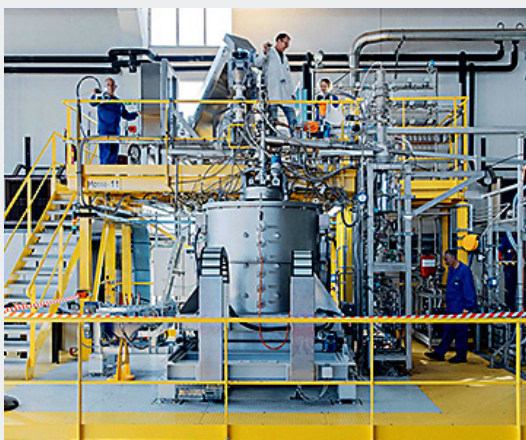
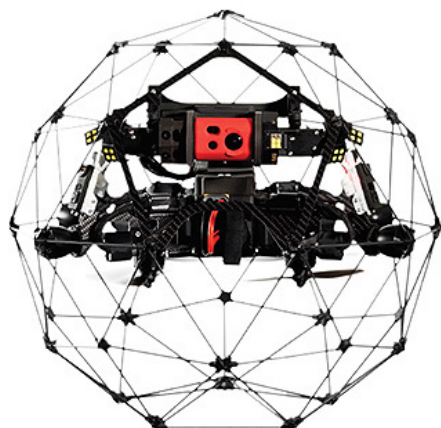
Lorsqu'elle sera opérationnelle, l'installation NOAH permettra le traitement, par un procédé d'hydrolyse, des 1500 tonnes de sodium présents dans les circuits de la centrale Phénix. Développé par le CEA puis mis en œuvre pour traiter avec succès le sodium des circuits de Rapsodie, Super-Phénix et PFR (Écosse), ce procédé a été implanté dans un nouveau bâtiment à l'ouest de l'installation de production d'électricité de la centrale Phénix.

**R&D**

**Test d'une investigation télévisuelle du réacteur G2**

Un chantier pilote d'Investigation télévisuelle (ITV) par drone a été mis en place en 2021 dans l'objectif d'inspecter le bardage de la **nef pile** du réacteur G2 situé à Marcoule. Autre objectif : établir un retour d'expérience d'utilisation du drone (baptisé ELIOS V2), en particulier en termes d'autonomie, de qualité d'acquisition et de manœuvrabilité.

**Nef pile :** hall abritant le réacteur



**R&D**

**Premiers essais de vitrification avec la plateforme DEM&MELT**

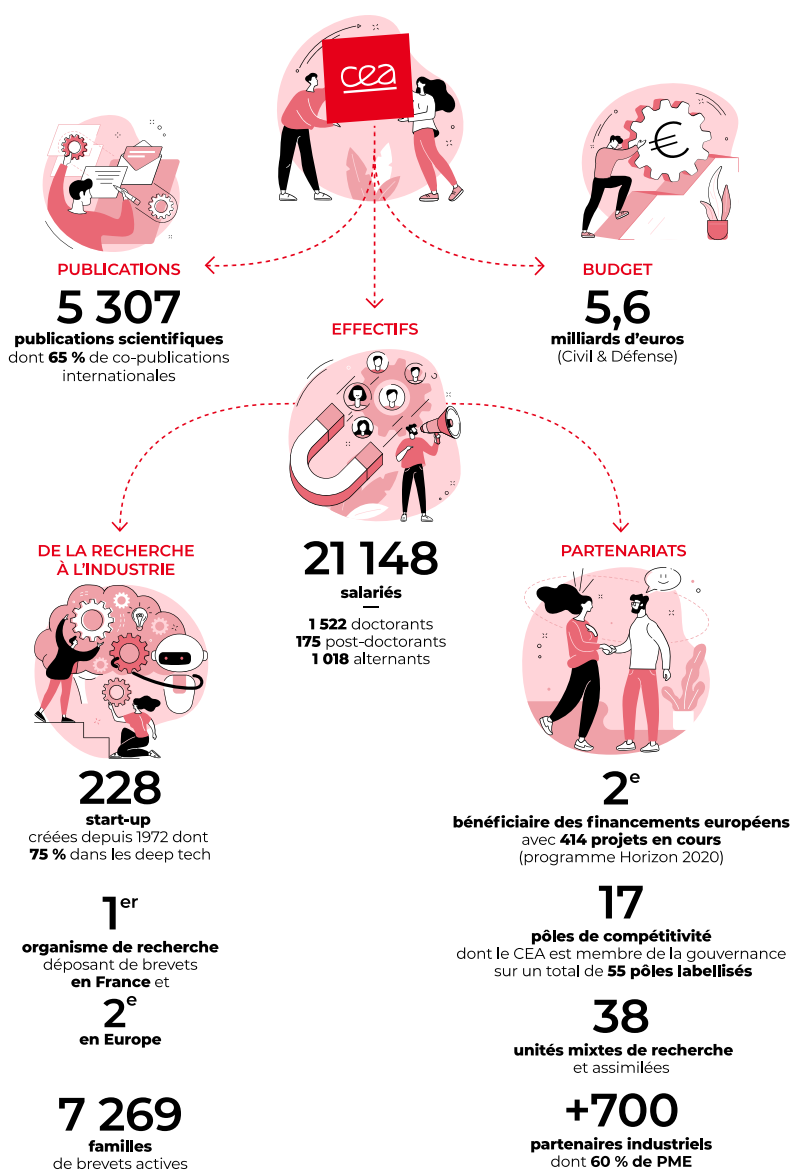
Après la réception en 2020 de la plateforme de vitrification DEM&MELT située à Marcoule (30), trois premiers essais ont été réalisés en 2021 : le premier dédié à la vitrification d'adsorbants minéraux pulvérulents et les deux suivants consacrés au conditionnement de boues de co-précipitation stockées sur le site de Fukushima. Des matrices vitreuses à haut taux d'incorporation en déchets (50-70 %) ont ainsi été obtenues.





# Chiffres clés

Retrouvez ci-dessous l'ensemble des chiffres clés du CEA au 31 décembre 2021.





## Organisation du CEA

**Pour mener à bien ses missions, le CEA s'appuie sur quatre directions dites opérationnelles, dont les activités sont implantées sur 10 sites en France, et accompagnées par des directions dites fonctionnelles.**

Ces dernières couvrent l'ensemble des fonctions support de l'organisme : finances et programmes, ressources humaines et relations sociales, communication, juridique et contentieux, achats et partenariats, relations internationales, audit, risques et contrôle interne. Le CEA administre, par ailleurs, l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN), organisme d'enseignement supérieur et de formation continue dans les domaines des énergies bas carbone et des technologies de la santé.

### 4 DIRECTIONS OPÉRATIONNELLES

#### La Direction des applications militaires (DAM)

La Direction des applications militaires du CEA est chargée de missions au service de la défense et de la sécurité de la France. Elle conçoit, fabrique et garantit la sûreté et la fiabilité des têtes nucléaires de la dissuasion. Elle conçoit et réalise les chaufferies nucléaires qui propulsent les bâtiments de la Marine nationale. Elle apporte aussi un appui technique aux Autorités dans la lutte contre la prolifération nucléaire et le terrorisme. Elle met également son expertise au service de la Défense pour évaluer et maîtriser les effets et la vulnérabilité des armements conventionnels.

#### La Direction des énergies (DES)

La Direction des énergies du CEA apporte aux pouvoirs publics et aux industriels les éléments d'expertise et d'innovation pour la mise en œuvre d'un système énergétique bas carbone. Avec une approche intégrée du système énergétique, la DES s'intéresse à tous les modes de production d'énergie bas carbone (énergie nucléaire, nouvelles technologies de l'énergie), à leurs interactions au sein du réseau (stockage, pilotage, conversion), à la problématique des ressources dans une logique de cycle fermé des matières, le tout prenant en compte les dimensions technico-économiques, sociétales et politiques.



### La Direction de la recherche technologique (DRT)

La Direction de la recherche technologique du CEA aborde les grands enjeux sociétaux et industriels du XXI<sup>e</sup> siècle en développant et en diffusant des technologies, pour tous les secteurs industriels et tous les types d'entreprises, qui contribuent à l'accompagnement de la transition numérique dans la société, à l'amélioration de la santé publique et au respect de la planète.

### La Direction de la recherche fondamentale (DRF)

La Direction de la recherche fondamentale du CEA exerce ses activités dans les domaines des biotechnologies et de la santé, des sciences de la matière et de l'Univers, de la physique et des nanosciences. Elle place au cœur de ses objectifs la production et la publication de connaissances et de savoir-faire au meilleur niveau mondial. Ses travaux constituent également des sources indispensables pour les autres missions du CEA.

## 6 MISSIONS



Défense et sécurité



Énergies



Transition numérique



Technologies pour la santé



Recherche fondamentale



Assainissement-démantèlement

## 10 SITES CEA EN FRANCE

**1- Siège social**

**Centres d'étude civils**

- 2 - Paris-Saclay (établissements de Fontenay-aux-Roses et Saclay)
- 3 - Grenoble
- 4 - Marcoule
- 5 - Cadarache

**Centres d'étude pour les applications militaires**

- 6 - DAM Île de France
- 7 - Le Ripault
- 8 - Valduc
- 9 - Cesta
- 10 - Gramat



# CRÉDITS

---

## Une édition du CEA

Direction de la communication  
Bâtiment Siège  
91 190 Gif-sur-Yvette Cedex - FR

## Directeur de la publication

Marie-Ange Folacci

## Coordination

Laetitia Baudin

## Création et développement

Efil - 90 boulevard Heurteloup - 37000 Tours  
Tél. : 02 47 47 03 20  
[www.efil.fr](http://www.efil.fr)

## Iconographie

### Couverture

© CEA, © P. Dumas/CEA, © V. Bousserrez/CEA

### Avant-propos

Ouverture de la page : © CEA

### Le CEA et son écosystème

Ouverture des pages : © CEA © Gettyimages

### 6 grandes missions

- « Défense et sécurité » : © RyanJLane.
- « Énergies » : © D. Guillaudin/CEA, © D. Guillaudin/CEA, © CEA, © CEA, © CEA, © Genvia, © D. Guillaudin/CEA, © Damien Sorigue/CEA, © JET.
- « Transition numérique » : © V. Maugard/CEA, © Soitec, © Iulia Ghimisli - Fotolia.com, © Kerly Chonglor - GettyImages, © vchal - GettyImages, © Gettyimages, © Mark Garlick/Université de Birmingham, © AdobeStock\_scharfsinn86, © CHU Henri-Mondor, © CEA/CADAM, © CEA.
- « Technologies pour la santé » : © CEA, © E Gravel/CEA, © FlashMovie\_GettyImages, © cc, © M. Thery/CEA/The journal of cell biology, © FG 2025, © CEA-Leti.
- « Recherche fondamentale » : © Cern, © ILL, © IPCC, © NASA GSFC, © CEA, © magicmine, © CEA-BIAM, © ttsz.
- « Assainissement-démantèlement » : © P. Dumas/CEA, © CEA, © CEA, © CEA, © CEA, © CEA, © CEA, © CEA.

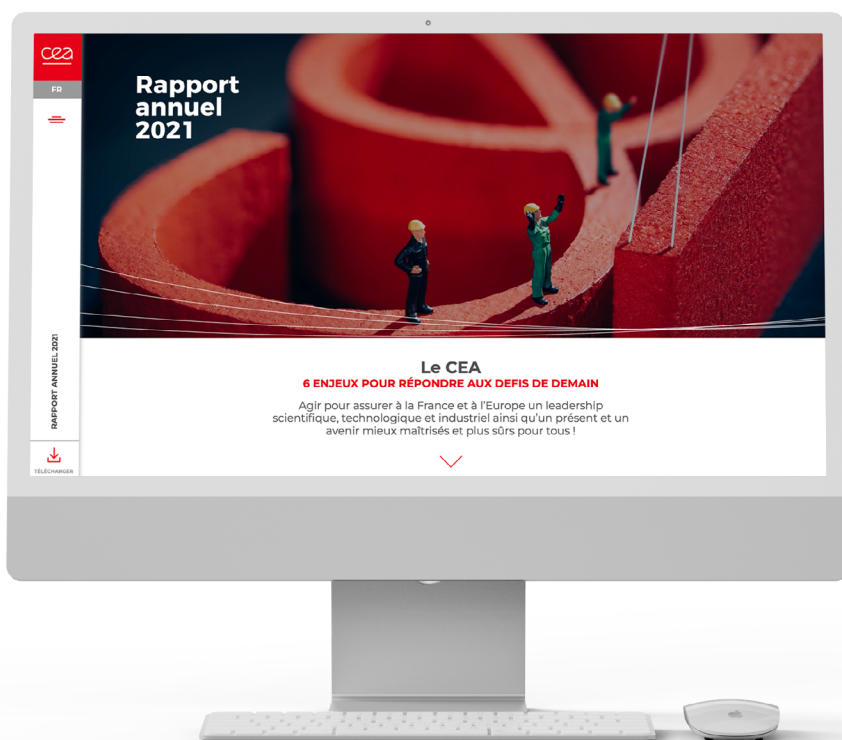
### Organisation

Image d'ouverture : © CEA / AM. Gendre-Peter

---

Nous suivre sur...





Retrouvez également  
le rapport annuel du CEA sur  
[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

Rapport  
annuel  
2021

