DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea den

DIRECTION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2015

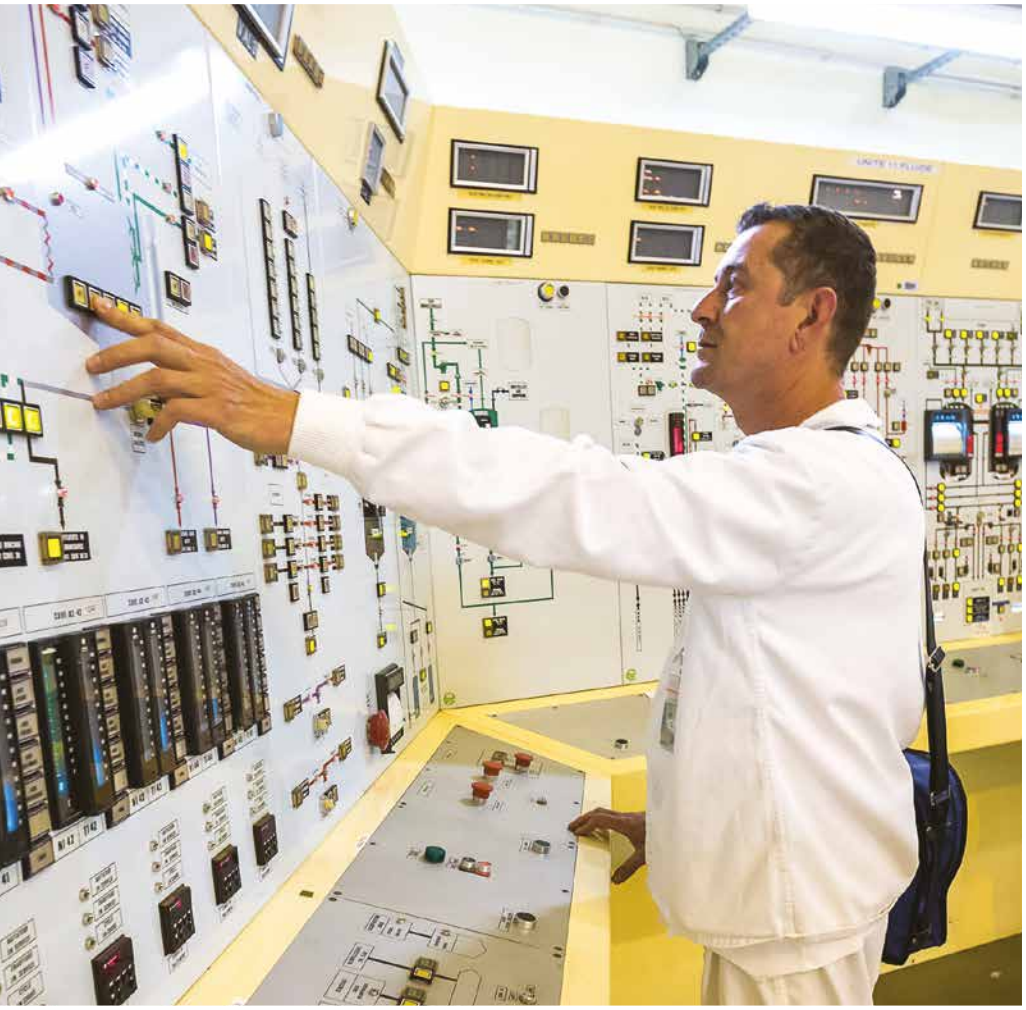
PROFIL

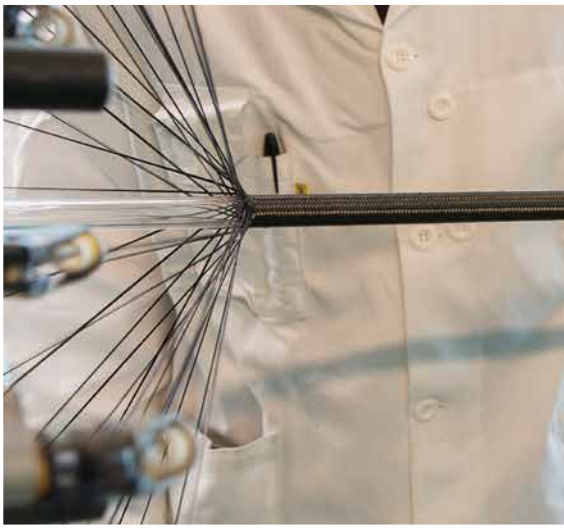
Au sein du CEA, la Direction de l'énergie nucléaire (DEN) apporte aux pouvoirs publics et aux industriels les éléments d'expertise et d'innovation sur les systèmes de production d'énergie nucléaire : il s'agit de développer un nucléaire durable, sûr et économiquement compétitif.

Pour répondre à cet enjeu, la DEN conduit ses travaux selon trois axes majeurs :

- les systèmes nucléaires du futur, dits de 4e génération, réacteurs et cycle du combustible associé ;
- l'optimisation du nucléaire industriel actuel ;
- le développement et l'exploitation de grands outils expérimentaux et de simulation indispensables pour mener ses recherches.

En parallèle, en tant qu'exploitant nucléaire, la DEN gère et fait évoluer son parc d'installations nucléaires. Elle mène des programmes de construction et de rénovation de ses installations, ainsi que des programmes d'assainissement et de démantèlement de celles arrivées en fin de vie.



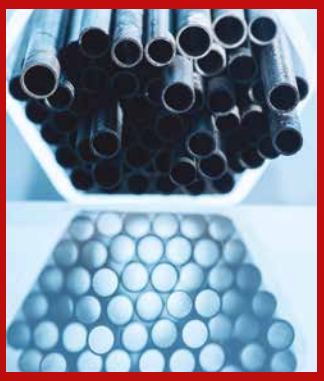


SOMMAIRE

02. Message du Directeur de l'énergie nucléaire au CEA
03. Chiffres clés

04. SYSTÈMES INDUSTRIELS NUCLÉAIRES DU FUTUR

05. Aval du cycle futur
06. Réacteurs de 4e génération
08. Recherche scientifique et technologique de base

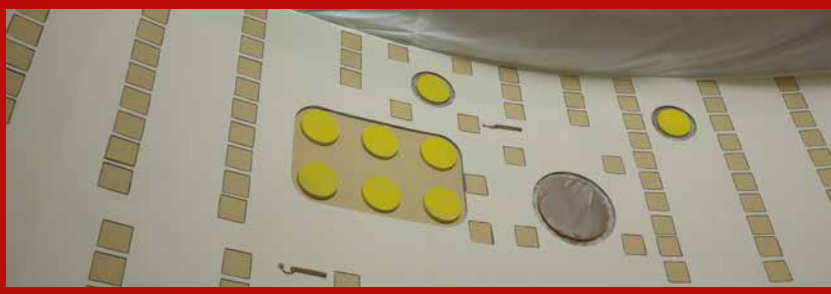


09. OPTIMISATION DU NUCLÉAIRE INDUSTRIEL ACTUEL

10. Amont du cycle
11. Aval du cycle actuel
12. Réacteurs de 2e et 3e générations

14. GRANDS OUTILS POUR LE DÉVELOPPEMENT DU NUCLÉAIRE

15. Simulation numérique
16. Réacteur Jules Horowitz (RJH)
17. Grandes installations en soutien aux programmes



18. ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT NUCLÉAIRE

19. Chantiers de démantèlement
23. Projets transverses pour l'assainissement-démantèlement

26. VALORISATION

29. CENTRES

30. Marcoule : R&D pour le cycle du combustible et chantiers de démantèlement
32. Cadarache : recherches sur les réacteurs et les combustibles
34. Saclay : les sciences du nucléaire et la simulation pour les réacteurs et le cycle du combustible

36. ACCOMPAGNEMENT DES PROGRAMMES ET RELATIONS EXTÉRIEURES

37. Programme transversal matériaux avancés
38. La vie scientifique à la DEN
40. La DEN à l'international
42. Le management « Qualité, sécurité, environnement » à la DEN
44. I-tésé

MESSAGE DE FRANÇOIS GAUCHÉ

DIRECTEUR DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE AU CEA

À l'occasion de la publication en mars dernier du nouveau décret relatif à l'organisation et au fonctionnement du CEA, les missions de la Direction de l'énergie nucléaire ont été confirmées : permettre à l'industrie électronucléaire française de produire une énergie sûre, compétitive et durable.

Plus que jamais positionnées au cœur des enjeux sociétaux de ce XXIe siècle, nos recherches font écho aux préoccupations de la COP 21, conférence internationale des Nations Unies sur les changements climatiques, qui s'est tenue fin 2015 à Paris. À l'unanimité, un accord contraignant, ayant pour but de limiter le réchauffement climatique à moins de 2°C, a été adopté par les 195 Etats qui y ont participé. Le respect de cet engagement implique nécessairement une diminution du recours aux énergies fossiles et une augmentation de la part d'électricité dans le mix énergétique. En d'autres termes, il requiert un recours massif à une électricité décarbonée, dont l'énergie nucléaire constitue, avec les énergies renouvelables, un mode de production incontournable. L'industrie nucléaire vaut déjà à la France d'être parmi les pays européens les moins émetteurs de CO_2 par kilowatt heure produit. De même, et l'on oublie parfois de le mentionner, cette industrie émet une pollution atmosphérique très faible, ce qui est un avantage en termes de santé publique. Par ailleurs, l'énergie nucléaire fournit depuis plusieurs décennies à notre pays un avantage compétitif significatif, associé à une certaine indépendance énergétique.

En France, la loi du 17 août 2015 sur la transition énergétique pour la croissance verte repose sur l'augmentation de l'efficacité énergétique et la mise en œuvre d'un mix énergétique bas carbone dans lequel l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables interviennent en complémentarité.

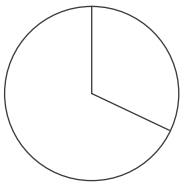
C'est dans ce contexte que la Direction de l'énergie nucléaire conduit ses programmes. En 2015, nous avons continué à soutenir nos partenaires industriels, aussi bien dans le domaine des réacteurs que du cycle du combustible, autour d'enjeux majeurs, comme la durée de fonctionnement, la compétitivité ou encore la sûreté des installations. Nous avons aussi travaillé pour le plus long terme, sur les futures générations de systèmes nucléaires. C'est ainsi que nous avons remis au Gouvernement un dossier présentant l'ensemble des résultats obtenus sur le multi-recyclage des combustibles usés et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue, en lien avec les recherches sur les nouvelles générations de réacteurs. Des avancées importantes ont aussi été réalisées sur nos chantiers d'assainissement et de démantèlement. En particulier, la mise en service du robot téléopéré Maestro, développé avec nos partenaires industriels, fait figure de prouesse technologique : après avoir été introduit mi-2015 sur un premier chantier, ce bras opère depuis fin 2015, en première mondiale, des découpes par laser dans un environnement de très haute activité.

Les actions les plus significatives réalisées par les équipes de la DEN, dont je tiens à saluer le professionnalisme et l'engagement, vous sont décrites plus en détail tout au long de ce rapport. Je vous en souhaite une bonne lecture.

CHIFFRES CLÉS

4 231 SALARIÉS

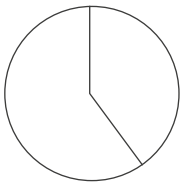
dont...



1 363
femmes

2 868
hommes

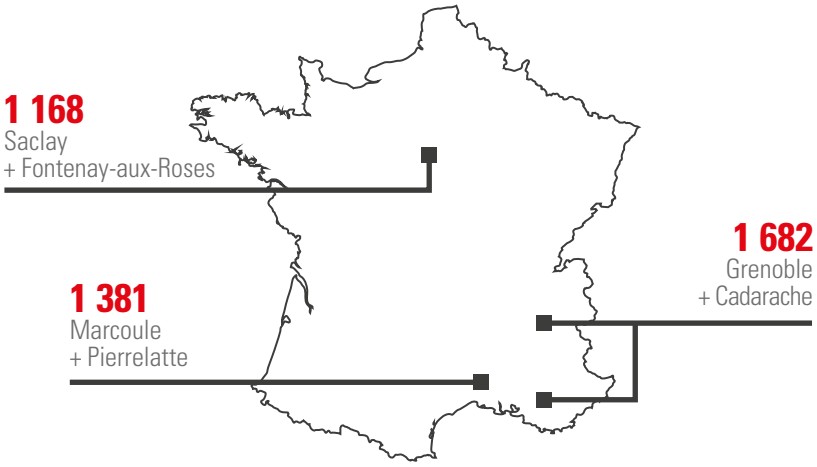
dont...



1 706
non-cadres

2 525
cadres

répartis sur 5 sites



157
RECRUTEMENTS

246
DOCTORANTS

36
POST-DOCTORANTS

517
PUBLICATIONS

52
BREVETS DÉPOSÉS

SYSTÈMES INDUSTRIELS NUCLÉAIRES DU FUTUR

La DEN travaille sur les systèmes nucléaires du futur à neutrons rapides, dits de 4e génération. Leur développement permettra de mieux répondre aux contraintes de sécurité d'approvisionnement et d'indépendance énergétique. En effet, ces systèmes permettent une gestion optimisée des matières, grâce aux perspectives qu'ils offrent de mieux utiliser la ressource en uranium, de permettre le multi-recyclage du plutonium et de minimiser la production de déchets. Les options du cycle du combustible futur sont aussi étudiées en cohérence avec les études menées par la DEN sur le projet Astrid, démonstrateur de réacteur de 4e génération à neutrons rapides refroidi au sodium, dont le CEA est maître d'ouvrage et qui est actuellement en phase d'études.

Combustible MOX.

ZOOM

RAPPORT SUR LA GESTION DURABLE DES MATIÈRES

Dans le cadre de la loi du 28 juin 2006, le CEA a remis au Gouvernement un rapport présentant les « avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides ». Ce document, préparé par le CEA, a été élaboré en collaboration avec EDF et AREVA, et avec la contribution du CNRS. Il aborde successivement dans ses différentes parties :

- les principes directeurs qui fondent les recherches sur les systèmes de 4e génération et en particulier leur capacité à assurer une gestion durable des matières et des déchets, les différents systèmes à l'étude et les scénarios de déploiement possibles de ces systèmes en France ;
- les résultats des recherches coordonnées par le CEA sur le multi-recyclage du plutonium et la séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue ;
- les choix proposés pour le démonstrateur technologique Astrid, réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, dont le CEA est maître d'ouvrage.

AVAL DU CYCLE FUTUR

En cohérence avec les études sur le réacteur Astrid, la DEN mène des recherches sur le cycle du combustible futur. Elles visent à évaluer l'ensemble des options de gestion des matières nucléaires pour les parcs de réacteurs à neutrons rapides (RNR), conformément aux attentes de la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

MULTI-RECYCLAGE DES COMBUSTIBLES DANS UN PARC INTÉGRANT DES RNR

La France dispose des capacités industrielles de traitement et de recyclage des combustibles usés issus de son parc électronucléaire actuel. La perspective d'un multi-recyclage des matières dans un parc intégrant des RNR de 4e génération nécessite d'adapter :

- les technologies de traitement aux spécificités des combustibles MOX[1] usés issus des réacteurs à eau sous pression (REP) et des RNR ;
- les technologies de fabrication des MOX aux spécificités des combustibles RNR.

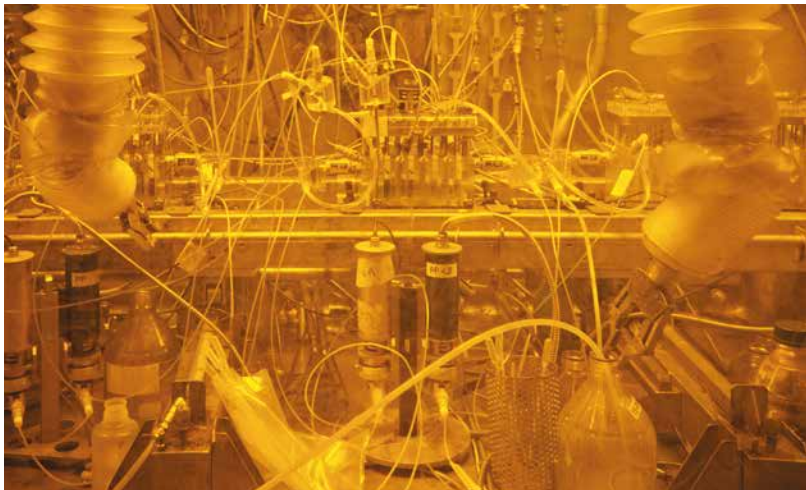
Pour répondre à ce second enjeu, et dans la continuité d'essais de R&D menés dans les laboratoires du CEA, une première campagne de fabrication de 300 pastilles RNR de géométrie annulaire Astrid a été réalisée avec succès en 2015 dans l'installation Melox, en collaboration avec AREVA. Ces premiers résultats très encourageants seront consolidés par de nouvelles campagnes afin d'optimiser les conditions de fabrication.

ÉTUDES POUR LA SÉPARATION ET LA TRANSMUTATION DES ACTINIDES MINEURS

L'américium a été identifié comme la première cible d'une stratégie de séparation-transmutation, dont l'enjeu est de réduire la radiotoxicité à long terme des déchets ultimes et d'optimiser leur stockage en réduisant la thermique. Les études visent la séparation de l'américium seul en une seule étape, en aval de la séparation de l'uranium et du plutonium. La démonstration du procédé EXAm[2], développé par le CEA et déjà testé à l'échelle du laboratoire, s'intègre dans une expérimentation plus globale, dénommée « expérience intégrale ». Il s'agit de réaliser les différentes phases du procédé, depuis la dissolution d'un combustible usé jusqu'à l'élaboration de pastilles de combustible chargées avec l'américium séparé par le procédé EXAm. L'objectif est la démonstration intégrale du recyclage de l'américium, à l'échelle du laboratoire, sur combustible irradié. Une étape clé a été réalisée en 2015 avec la récupération de plusieurs grammes d'américium d'un raffinat de produits de fission concentrés.

(1) Mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium.

(2) Extraction de l'américium.

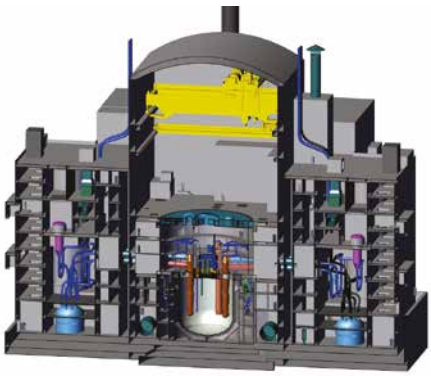


Installation Atalante à Marcoule où sont réalisés des essais de séparation des actinides mineurs.

Maquette du collecteur chaud d'Astrid.

RÉACTEURS DE 4e GÉNÉRATION

Le CEA est chargé de mener pour la France les recherches sur des systèmes nucléaires innovants, dits de 4e génération, en rupture technologique forte par rapport aux précédentes générations de réacteurs. Il pilote ainsi les études de conception d'un démonstrateur technologique de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), appelé Astrid, tout en poursuivant veille et R&D sur l'ensemble des autres technologies intéressant cette 4e génération.



Vue en coupe de l'îlot nucléaire d'Astrid.

Astrid est un démonstrateur d'intégration technologique, d'une puissance électrique de 600 MWe, permettant une démonstration à échelle préindustrielle de RNR-Na de 4e génération, notamment dans les domaines de la sûreté et de l'opérabilité.

LES PLATEFORMES EN SOUTIEN À LA CONCEPTION D'ASTRID

Le développement et la qualification des options technologiques d'Astrid nécessitent un ensemble de moyens d'essais dédiés, pour certains en sodium et pour d'autres en eau, utilisé comme fluide simulant. Selon les cas, il s'agit d'adapter des moyens existants aux besoins du projet Astrid ou d'en développer de nouveaux. Une analyse précise des besoins et des moyens existants a permis de mettre en œuvre une stratégie de programme d'essais, s'appuyant sur quatre ensembles de moyens expérimentaux.

- **La plateforme Papirus** regroupe un ensemble de dispositifs expérimentaux destinés à faciliter l'utilisation du sodium dans les futurs réacteurs, optimiser leur fonctionnement, maîtriser les coûts d'investissement et d'exploitation, et réaliser des démonstrations de sûreté. Les moyens d'essais vont de petites boîtes à gants contenant quelques grammes de sodium, jusqu'à des moyens d'essais permettant le développement d'échangeur sodium-gaz, la qualification de l'instrumentation sodium (débitmètres, capteurs de pression...) ou des pompes électromagnétiques prévues pour Astrid. En effet, dans le cadre de sa démarche générale de sûreté, le projet Astrid prévoit, pour assurer la mise en circulation du sodium dans les circuits secondaires, l'utilisation de pompes électromagnétiques qui présentent des avantages vis-à-vis du risque de fuite de sodium, mais aussi des gains en termes de fiabilité et de maintenabilité. En appui à leur conception, le CEA développe des modèles numériques représentatifs des phénomènes physiques entrant en jeu dans ce type de pompe et, pour les valider, une boucle d'essais en sodium unique au niveau européen appelée PEMDYN. Son composant principal est sa pompe électromagnétique : de 5 mètres de longueur et pesant 7,5 tonnes, elle délivre un débit de sodium maximum de 1 500 m³/h (échelle ¼ des pompes Astrid). Les premiers essais ont démarré en 2015 avec une montée en puissance progressive du débit (le débit nominal de 1 500 m³/h sera atteint courant 2016).
- **La plateforme Giseh** réunit l'ensemble des moyens d'essais en fluide simulant. Ils permettent de répondre à des besoins relatifs à la chaudière et au cœur dans les domaines de l'hydraulique, de la thermohydraulique et de l'analyse vibratoire sous écoulement. L'eau à une température proche de 50°C présente en effet des similitudes avec le sodium (densité, viscosité) qui permettent d'appréhender ces aspects. En 2015, une maquette échelle 1/6 du collecteur chaud d'Astrid a été montée puis mise en eau sur une boucle dédiée, permettant la réalisation des premières campagnes d'essais, en particulier d'évaluer l'occurrence de certains entraînements de gaz à la surface du sodium. Elles vont se poursuivre pour simuler différentes conditions de fonctionnement du circuit primaire d'Astrid et contribuer à la qualification du code de thermohydraulique Cathare.
- **La plateforme Cheops** rassemblera un ensemble de grandes boucles d'essais en sodium dédiées à la R&D grande échelle et à la qualification de composants. Les études de conception-construction démarrées mi-2014 se sont poursuivies en 2015, dans la perspective d'une mise en service vers 2020.

Vue d'artiste de la future plateforme Plinius-2.

- **La plateforme Plinius-2,** qui à terme remplacera Plinius, est dédiée à l'étude des accidents graves, plus particulièrement à l'étude du corium et de ses interactions. Elle répondra à des besoins de R&D dans le domaine de la simulation expérimentale des accidents graves pour différentes filières de réacteurs (utilisant notamment de l'eau ou du sodium comme caloporteur). En 2015, les études de conception du bâtiment et des procédés ont démarré, en particulier la conception du four de fusion du corium pour lequel une performance de fusion de 500 kg est attendue.

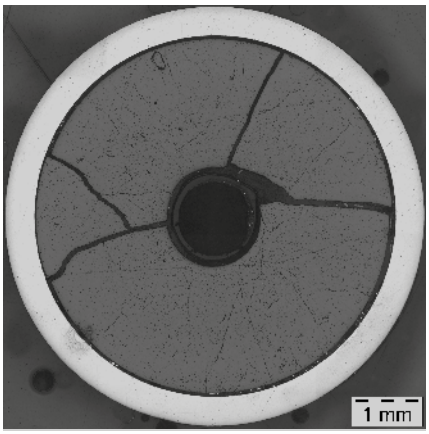
ZOOM

FIN DE L'AVANT-PROJET SOMMAIRE D'ASTRID

En décembre 2015, le CEA a remis au comité de suivi du projet Astrid, composé des tutelles, un dossier de synthèse des études d'avant-projet sommaire (APS) et des options de sûreté préconisées. La phase d'APS visait à consolider et finaliser les principaux choix d'options de conception du réacteur et à définir les options de sûreté. Le dossier remis aux tutelles s'appuie sur plus de 2 000 documents d'ingénierie et met en perspective les potentialités de la conception proposée pour Astrid. Après instruction, le comité a donné son accord pour le lancement de la phase d'avant-projet détaillé, qui se déroulera jusqu'en 2019. Elle vise à réaliser une définition préliminaire de l'ensemble des systèmes et composants et le programme de justification associé, qui sera à réaliser dans la phase suivante, ainsi qu'une première rédaction du rapport préliminaire de sûreté. Le projet se déroule conformément au planning défini en accord avec l'Etat au titre de la convention signée par l'État et le CEA dans le cadre du programme d'investissements d'avenir.

ÉTUDES SUR LES COMBUSTIBLES PHÉNIX EN SOUTIEN AU DÉVELOPPEMENT DES COMBUSTIBLES ASTRID

Astrid intègre dans sa conception le retour d'expérience de l'ensemble des réacteurs à neutrons rapides ayant déjà fonctionné dans le monde. C'est le cas notamment pour le matériau combustible, un oxyde mixte $(U, Pu)O_2$ dans un empilement de pastilles présentant des compositions hétérogènes, ainsi que pour les matériaux de gainage et de structure des assemblages. Des objets irradiés dans le réacteur Phénix à Marcoule ont été identifiés comme d'intérêt pour compléter les dossiers de qualification du cœur d'Astrid. Des examens complémentaires ont été lancés en 2013 et en particulier, en 2015, un programme d'études sur des aiguilles d'un assemblage expérimental, présentant des caractéristiques similaires aux aiguilles du cœur d'Astrid. L'objectif est de compléter le dossier du matériau de gainage de référence des premiers cœurs d'Astrid ainsi que la base de qualification du code de comportement du combustible. En 2015, les aiguilles ainsi que des tronçons de gainage en acier ont été envoyés dans les laboratoires d'études du CEA, à Cadarache et à Saclay, pour démarrer les premiers examens de caractérisation de leur comportement post-irradiation. Les études d'objets irradiés dans Phénix se poursuivront pendant toute la phase d'études d'Astrid pour contribuer aux dossiers de justification de la durée de vie de ses composants et à la qualification des codes de conception.



Coupe macrographique d'une aiguille d'un assemblage du réacteur Phénix en soutien à la conception et à la qualification des composants d'Astrid.

PARTENARIATS

Pour la mise en œuvre du projet Astrid, le CEA s'est entouré de partenaires industriels qui participent à la conception des différents lots du réacteur. Les accords impliquent qu'une part de l'effort est financée sur leurs fonds propres. À fin 2014, le projet Astrid s'appuyait sur 13 collaborations. En 2015, la CNIM a rejoint ce cercle avec une première étude d'optimisation du rendement du système de conversion d'énergie au gaz.

D'autres partenariats concernent la R&D en soutien au projet. Trois accords ont été signés en 2015 avec l'Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement durable (ENEA), et deux organismes allemands : l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT) et le laboratoire de recherche HZDR (Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf).

Le nouvel accélérateur d'ions
de la plateforme JANNuS à Saclay.

RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE BASE

La recherche scientifique et technologique de base positionne ses activités en amont de la recherche appliquée, en répondant à des défis transverses aux autres domaines de la DEN. En s'appuyant sur des collaborations dynamiques, en particulier aux niveaux national et européen, elle élargit la base et la qualité scientifique des connaissances pour asseoir la pertinence des réponses aux grands défis du nucléaire et ce dans trois domaines principaux : les matériaux, les combustibles et la chimie séparative.

INAUGURATION D'UN NOUVEL ACCÉLÉRATEUR D'IONS DANS L'INSTALLATION JANNUS

L'installation JANNuS met à la disposition de la communauté scientifique internationale et de l'industrie une plateforme sans équivalent en Europe pour irradier des matériaux par des flux de particules chargées, afin d'observer et de quantifier les évolutions de leur microstructure. Durant ces cinq dernières années, des investissements progressifs ont permis d'améliorer ses équipements et son instrumentation de pointe. En 2015, un des trois accélérateurs d'ions a ainsi été remplacé par un accélérateur de toute dernière génération. Grâce à une fiabilité améliorée et un contrôle-commande plus performant, il permet de mener des irradiations de haute qualité sur de longues périodes, avec une supervision minimale. En cinq ans, la plateforme a vu doubler le nombre de candidatures aux appels à projets, et tripler celui des irradiations.

SUCCÈS DU SECOND WORKSHOP MINOS

Le second workshop international du centre d'excellence MINOS pour les matériaux du nucléaire, organisé par la DEN, en association avec l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) de Saclay, s'est déroulé sur trois jours en novembre à l'INSTN de Cadarache. Il était axé sur le comportement, sous irradiation,des matériaux utilisés dans le parc de réacteurs actuel ou envisagés pour les systèmes nucléaires du futur ou pour la fusion (principalement les alliages métalliques et les matériaux combustibles), avec un focus sur les effets de flux et de dose. La recherche dans le domaine des matériaux joue en effet un rôle majeur pour apporter des réponses aux enjeux du nucléaire actuel et futur (extension de la durée de fonctionnement et de la disponibilité des centrales, accroissement de la sûreté, optimisation des matériaux de gainage et des combustibles, développement d'un nucléaire de 4e génération, gestion des déchets radioactifs…). Ce workshop a rassemblé un peu plus de 140 experts en sciences des matériaux et en ingénierie nucléaire dont une trentaine de participants étrangers internationaux et européens, marquant ainsi l'intérêt de la communauté scientifique pour cette thématique.

PREMIÈRE EXPÉRIENCE DE FLUAGE D'IRRADIATION À L'AIDE DE MICROMACHINES

Le comportement mécanique des matériaux sous irradiation représente un enjeu fort pour l'industrie nucléaire. À l'échelle macroscopique, ce comportement est bien caractérisé. Mais à l'échelle microscopique, les mécanismes de déformation sous irradiation, en particulier le fluage d'irradiation des matériaux de structure des réacteurs nucléaires (aciers austénitiques ou alliages de zirconium), restent encore mal connus. Dans ce contexte, les équipes de la DEN et de l'Université catholique de Louvain ont mis en œuvre une expérience inédite. Elle est fondée sur le couplage d'une irradiation aux particules chargées sur la plateforme d'irradiation JANNuS et de la technologie MEMS (Microelectro-mechanical Systems[1]). Cette expérience a permis pour la première fois de mesurer l'effet des irradiations aux ions sur un matériau sous contrainte mécanique et ouvre ainsi des perspectives dans la compréhension du fluage d'irradiation de matériaux métalliques modèles.

(1) Il s'agit d'un système mécanique de dimension très réduite (quelques mm²), réalisé le plus souvent sur silicium, avec au moins un élément micrométrique. Il joue un rôle de capteur ou d'actionneur.

Les participants
au second workshop MINOS.

OPTIMISATION DU NUCLÉAIRE INDUSTRIEL ACTUEL

La DEN mène des recherches pour répondre aux enjeux de ses partenaires industriels. Il s'agit, d'une part, d'améliorer la compétitivité du parc nucléaire français actuellement en exploitation en soutien à EDF, avec des enjeux industriels en termes de durée d'exploitation, de performances, de disponibilité et de sûreté des réacteurs. Il s'agit, d'autre part, d'optimiser ou d'adapter les installations de l'amont et de l'aval du cycle électronucléaire aux enjeux industriels existants et futurs en collaboration avec AREVA et l'Andra.

Montage expérimental pour l'extraction de l'uranium par CO_2 supercritique.

AMONT DU CYCLE

L'amont du cycle englobe les opérations industrielles liées à l'uranium depuis son extraction des mines jusqu'à son enrichissement, pour être utilisable en réacteur de 2e et 3e générations. Ces dernières années sont marquées par une réduction des teneurs des minerais et un besoin de renouvellement des installations. C'est pourquoi la DEN œuvre à l'amélioration à la fois des performances d'extraction sélective de l'uranium, de purification, puis de conversion sous forme d'hexafluorure afin d'atteindre le niveau de pureté requis pour l'enrichissement de l'uranium.

PROSPECTION ET EXPLOITATION MINIÈRE

Dans ce domaine, AREVA s'appuie sur un laboratoire de la DEN à Cadarache pour estimer la sensibilité et la précision des mesures de l'uranium dans les puits de forage. Les équipes ont développé une modélisation spécifique des capteurs mis en œuvre industriellement par AREVA.

Ces modèles ont été validés à partir de mesures effectuées sur des blocs étalons, propriété d'AREVA à Bessines. Des études paramétriques ont permis d'étudier la sensibilité du taux de comptage gamma à la teneur effective du sol en uranium, et ce en fonction des différentes configurations rencontrées (caractéristiques de la formation géologique, géométrie du puits de forage, présence d'un tubage, fluides de remplissage…).

Ces modélisations permettront ensuite d'étendre le domaine de validité et de diminuer l'incertitude associée aux facteurs correctifs des mesures de comptage gamma utilisées pour l'établissement des ressources et réserves en uranium. Des approches innovantes basées sur la spectrométrie gamma seront aussi étudiées pour caractériser rapidement un éventuel déséquilibre radioactif entre l'uranium et ses descendants.

EXTRACTION DE L'URANIUM DES MINERAIS CONVENTIONNELS

La DEN étudie un procédé alternatif d'extraction de l'uranium mettant en œuvre du CO_2 supercritique comme solvant. Les améliorations attendues sont notamment une forte économie d'eau, de solvants organiques et de réactifs chimiques, ainsi qu'une réduction du nombre d'étapes de broyage grâce à une diffusivité importante du CO_2 supercritique. Des rendements d'extraction avoisinant 97 % ont été obtenus à l'échelle laboratoire, ce qui a permis de pré-dimensionner un atelier d'extraction et de fournir les bases d'une étude technico-économique de ce procédé. Les perspectives envisagées sont l'amélioration de la sélectivité du procédé et sa démonstration à l'échelle pilote.

CONVERSION : PURIFICATION DES SOLUTIONS URANIFÈRES

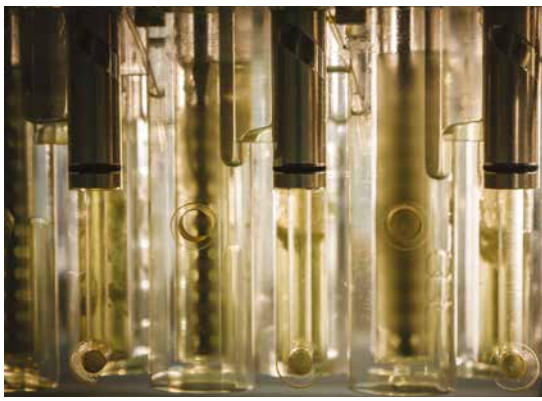
AREVA dispose de solutions et effluents riches en uranium naturel, qui peuvent être réutilisés à condition d'être décontaminés au préalable des traces de radioéléments pour les rendre compatibles avec un traitement à l'usine Comurhex. Pour ce faire, la DEN a proposé de tester les propriétés extractantes et sélectives d'une molécule monoamide ; l'objectif étant de disposer d'un procédé permettant d'extraire sélectivement l'uranium afin de le purifier vis-à-vis des impuretés radiologiques, en présence de fortes quantités d'impuretés chimiques, et avec des facteurs de décontamination très élevés.

En 2015, les schémas définitifs des procédés ont été calculés et une campagne d'essais a été menée dans les installations de la DEN, tout d'abord sur solution synthétique, puis sur solution réelle fournie par AREVA. Les analyses ont confirmé la faisabilité du procédé et ses performances en régime continu à une échelle laboratoire. L'objectif est désormais le dimensionnement et le chiffrage du procédé à une échelle industrielle.

SÉPARATION ISOTOPIQUE

Dans le domaine de la séparation isotopique, la DEN réalise une veille technologique active sur les procédés d'enrichissement de l'uranium, afin de maintenir les compétences du CEA dans ce domaine stratégique. Elle travaille en particulier sur le procédé Silex (Separation of Isotopes by Laser EXcitation) pour lequel elle mène des études devant contribuer à l'évaluation des performances de ce procédé.

Campagne d'essais en batterie de mélangeurs-décanteurs pour valider un procédé d'extraction sélective de l'uranium.



Four plasma utilisé pour des démonstrations anticipées de combustion en soutien au développement du procédé Pivic.

AVAL DU CYCLE ACTUEL

Les programmes sont menés en soutien à AREVA pour optimiser ou adapter les procédés de traitement des combustibles usés de l'usine de La Hague et de fabrication de combustibles MOX de l'usine Melox ; à l'Andra pour fournir les éléments scientifiques et techniques nécessaires aux dossiers des stockages (Cigéo, FA-VL) ; et à EDF pour la gestion de certains déchets dont ceux issus du démantèlement des réacteurs uranium naturel graphite gaz (UNGG).

AVANCÉES SUR LE PROCÉDÉ PIVIC

Le procédé Pivic d'incinération vitrification in-can, développé par la DEN au sein du Laboratoire commun de vitrification, en partenariat avec AREVA et l'Andra dans le cadre du programme d'investissements d'avenir, est destiné à traiter et conditionner les déchets technologiques mixtes (à la fois organiques et métalliques) contaminés alpha, générés par les activités des usines de Melox et de La Hague. En 2015, une première validation d'une solution visant à limiter l'encrassement du réacteur de combustion a été réalisée. En effet, la combustion de ces déchets induit un encrassement potentiel des parois du réacteur, qui pourrait impacter très fortement la cadence industrielle de leur traitement. Une solution étudiée consiste à confiner le déchet à traiter dans un sac en fibre de verre, ce sac jouant également le rôle d'un filtre retenant les résidus solides (cendres et radionucléides) issus de la combustion de la fraction organique du déchet. Afin de quantifier le pouvoir de rétention du sac vis-à-vis du contaminant, une campagne d'essais de combustion a été réalisée avec un simulant de l'oxyde de plutonium. Un taux de rétention moyen de 95 % a été enregistré, la masse des dépôts étant inférieure à 1 % de la masse de contaminant introduite, et les 4 % restants étant retenus au niveau des équipements du traitement des gaz. Ces valeurs montrent l'efficacité du sac en fibre de verre pour retenir les radionucléides et ainsi réduire l'encrassement des parois du réacteur et confirment ainsi les potentialités du procédé vis-à-vis de la cadence de traitement industriel envisagée. Les résultats seront ensuite consolidés en poursuivant l'étude avec d'autres simulants de l'oxyde de plutonium et d'autres types de sacs.

ACTIONS EN SOUTIEN À L'ANDRA

Dans le cadre de la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, la DEN intervient en soutien au projet de Centre industriel de stockage géologique (Cigéo), dont l'Andra est maître d'ouvrage. Un code décrivant l'évolution d'une couche passive[1] sur les aciers peu alliés envisagés pour le stockage, et permettant ainsi de simuler leur corrosion sur le très long terme, a été déposé et accepté par l'Agence pour la Protection des Programmes. Ce code, appelé Calipso et codéveloppé par le CEA et l'Andra, implémente des méthodes numériques permettant la résolution des équations d'un modèle décrivant l'évolution de la couche passive. Il permet par exemple de simuler l'évolution temporelle de la position de la couche passive dans l'espace physique lié à l'environnement. Afin d'améliorer sa prédiction, le code Calipso doit être couplé à un code de géochimie transport. En effet, Calispo calcule les flux échangés avec l'environnement en fonction de la chimie imposée par celui-ci, tandis que le code de géochimie calcule l'évolution de la spéciation chimique induite par la corrosion de l'acier et transmet ainsi une nouvelle chimie à Calipso. Ce processus de couplage de codes doit permettre de simuler la corrosion de l'acier sur le très long terme, de l'ordre du millier d'années.

Dispositif expérimental permettant de confirmer la cinétique de dissolution d'une couche d'oxyde de fer, phénomène prévu par le code Calipso.

(1) Barrière chimique capable de ralentir le phénomène de corrosion de la matière sous-jacente.

Installation expérimentale de la plateforme Plinius à Cadarache permettant l'observation par imageries X de la formation d'un lit de débris lors d'un essai d'interaction corium-eau.

RÉACTEURS DE 2e ET 3e GÉNÉRATIONS

Le CEA mène des recherches en soutien aux réacteurs à eau sous pression (REP) du parc nucléaire actuel (2e génération) et au déploiement des réacteurs de 3e génération. Elles sont menées principalement avec EDF, AREVA et l'IRSN, et répondent à des enjeux industriels d'amélioration des performances, d'extension de la durée de fonctionnement, et de renforcement du niveau de sûreté des centrales.

ÉTUDES DES ACCIDENTS GRAVES

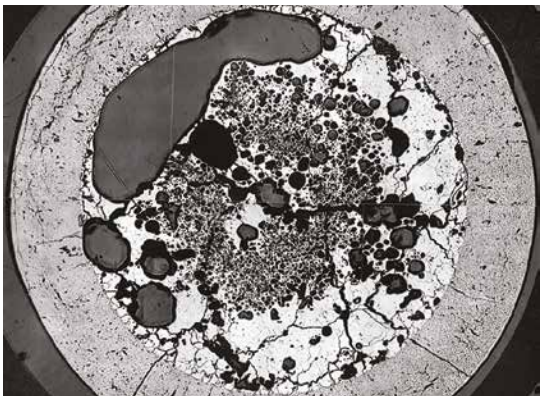
Si l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi n'a pas révélé de lacune majeure dans le champ des connaissances et dans les objectifs de R&D, il a souligné la nécessité de poursuivre des programmes de R&D consacrés à renforcer la robustesse des solutions de mitigation proposées, tant pour les réacteurs de 2e génération que pour de nouveaux concepts de 3e génération. La crédibilité de cette R&D repose en grande partie sur notre capacité à maintenir des installations expérimentales performantes.

IMAGERIES X DE LA FORMATION D'UN LIT DE DÉBRIS LORS D'UN ESSAI D'INTERACTION CORIUM-EAU

Lors d'un accident grave dans un réacteur nucléaire, les matériaux du cœur en fusion (corium) peuvent entrer en contact avec de l'eau et interagir de manière explosive. C'est l'objet d'étude du projet « interaction corium-eau », retenu par l'Agence nationale de la recherche dans le cadre de l'appel à projets « recherche en sûreté nucléaire et radioprotection » du programme d'investissements d'avenir. Le premier essai de ce projet, mené conjointement par l'IRSN, le CEA et l'Université de Lorraine, avec le support d'EDF et d'AREVA, a été réalisé avec succès dans une installation de la plateforme Plinius de la DEN à Cadarache. Il a permis de suivre par imageries X la fragmentation et la dispersion d'un jet de corium sur ⅔ de la hauteur d'eau, ainsi que la constitution du lit de débris, sa température et son ébullition associée. L'objectif de l'expérience est d'extraire les grandeurs comparables à celles produites par les codes de calcul dédiés à la simulation de ces interactions ; la comparaison simulation/expérience permettant d'étayer le dossier de validation des codes.

SUCCÈS DU 5e ESSAI VERDON

La DEN conduit sur l'installation Verdon à Cadarache un programme destiné à améliorer la connaissance du comportement des produits de fission lors d'un accident en REP. L'essai Verdon-5 a ainsi été réalisé le 19 novembre 2015 dans un nouveau cadre international avec EDF, ENGIE, US-NRC[1], JAEA[2] et l'IRSN. Il fait suite aux quatre premiers essais Verdon menés dans le cadre du programme international terme source (ISTP). Réalisé avec un combustible d'oxyde d'uranium à fort taux de combustion, l'essai Verdon-5 visait à étudier l'impact du bore sur les formes chimiques de l'iode, puis l'effet d'une entrée d'air (cas d'un percement de la cuve ou d'un accident « cuve ouverte ») sur le relâchement des produits de fission, notamment le ruthénium. L'échantillon combustible, d'abord irradié en réacteur EDF, a été ré-irradié dans le réacteur expérimental Osiris à Saclay afin de reconstituer son inventaire en produits de fission à vie courte (iode 131, tout particulièrement), puis transporté à Cadarache. Les nombreuses mesures acquises en ligne sont complétées par une mesure quantitative des produits de fission déposés sur les différents éléments du circuit expérimental, après démontage.



Installation Verdon à Cadarache, dédiée à l'étude du comportement des produits de fission lors d'un accident grave (en haut). Échantillon de combustible fondu après un essai type dans Verdon (en bas).

(1) Commission de réglementation nucléaire des États-Unis.

(2) Agence japonaise de l'énergie atomique.

(3) Physical Vapor Deposition – High Power Impulse Magnetron Sputtering.

Centrale nucléaire EDF de Cruas-Meysse (palier 900 MWe).

AUGMENTATION DE LA DURÉE DE FONCTIONNEMENT DES RÉACTEURS DU PARC

Démarré en 2014, le programme expérimental Fluole 2, mené par la DEN et cofinancé par EDF, vise à contribuer à la validation du schéma d'interprétation de la dosimétrie du Programme de surveillance en irradiation (PSI) du parc des réacteurs électronucléaires français. Sa réalisation s'inscrit dans la continuité du programme Fluole, mis en œuvre de 2006 à 2007, représentatif du palier 1 300 MWe. Fluole 2 est une expérience intégrale représentative des paliers REP 900 MWe et 1 450 MWe, destinée à compléter la qualification des schémas de calcul de propagation des neutrons depuis le cœur jusqu'aux capsules du PSI, à la cuve et au-delà de la cuve. Les expériences se déroulent sur trois ans, de 2014 à 2016, dans le réacteur Eole à Cadarache. Elles permettent de qualifier les schémas de calcul pour différentes configurations de cœur. Les résultats expérimentaux ont montré une bonne capacité prédictive de ces schémas. Le programme se termine donc en 2016 avec une autre configuration de cœur.

COMBUSTIBLES

DÉVELOPPEMENT DE GAINES COMBUSTIBLES INNOVANTES ET PLUS RÉSISTANTES À L'OXYDATION

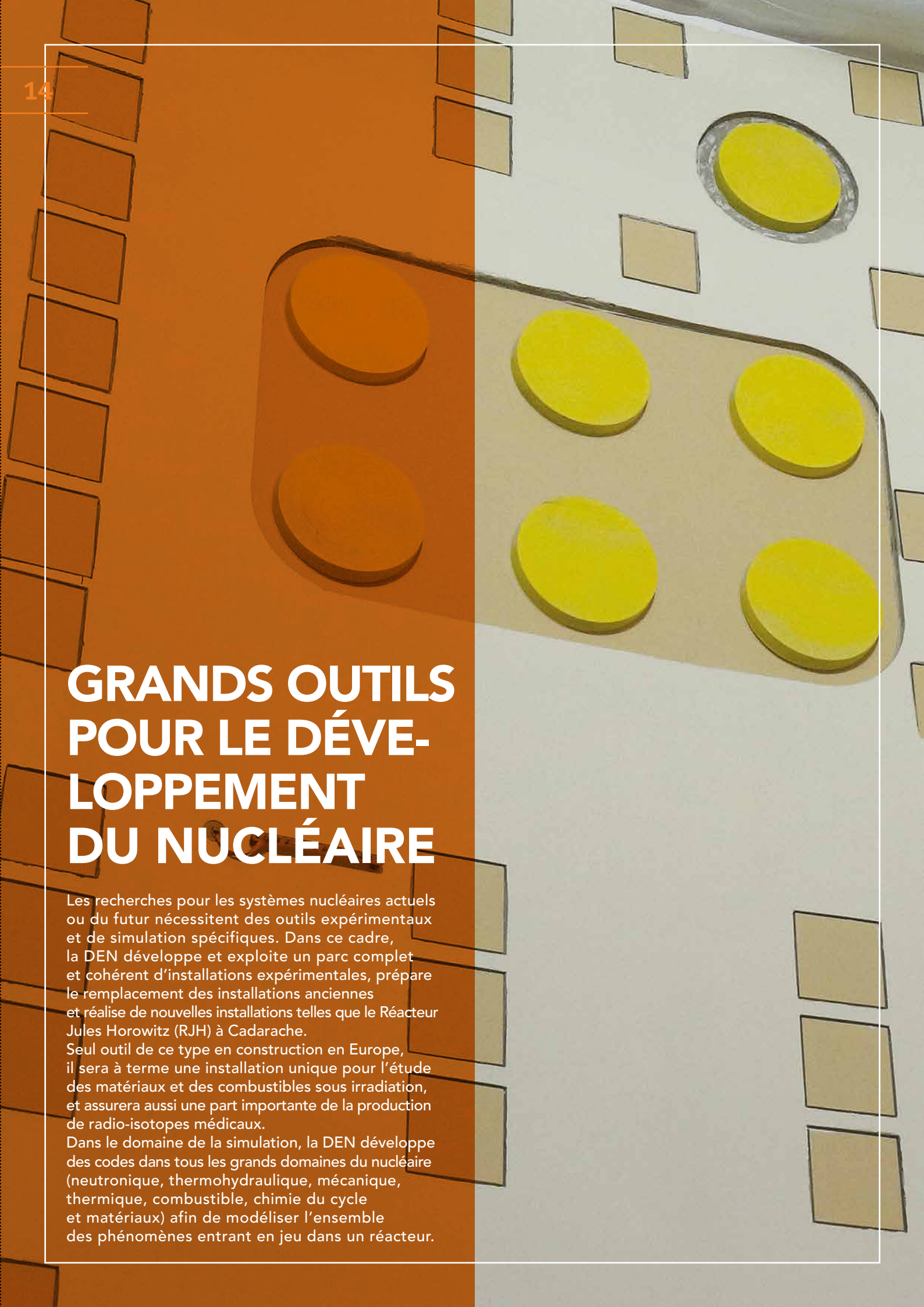
La DEN travaille avec ses partenaires de l'institut tripartite (CEA/EDF/AREVA) sur le développement de solutions innovantes pour les gainages combustibles avec un objectif d'améliorer leur capacité à résister aux situations accidentelles, tout en préservant un bénéfice potentiel sur le comportement en conditions nominales. C'est le concept EATF, pour « Enhanced Accident Tolerant Fuel ».

- Le premier volet porte sur le développement d'une gaine combustible revêtue au chrome par un procédé hybride PVD-HIPIMS[3], qui a donné lieu à un brevet CEA. Développées par le CEA dans le cadre du Laboratoire commun de recherche CEA - Université technologique de Belfort-Montbéliard, ces gaines revêtues présentent une amélioration importante de la résistance à l'oxydation, tant en conditions nominales qu'en conditions accidentelles à haute température en vapeur. Leur résistance à l'hydruration, dont les effets fragilisants potentiels sont connus, est par ailleurs renforcée. Les essais ont aussi confirmé la robustesse du revêtement obtenu, dont le procédé de fabrication est aujourd'hui arrivé à un stade pré-industriel. Les études se poursuivent en 2016 en vue d'un développement industriel dans la perspective notamment de produire des crayons longs de plus de quatre mètres (la fabrication de tronçon de 50 cm étant aujourd'hui acquise), autorisant la fabrication de crayons expérimentaux retenus pour une irradiation dans le cadre du programme international Halden Reactor Project sous l'égide de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE.
- Le second volet, retenu dans une perspective à plus long terme, porte sur la valorisation comme solution « EATF » des gaines en composite de carbure de silicium (SiC/SiC) développées initialement pour la filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz (brevets CEA). Ce concept de gaine multicouches comportant un liner métallique interne permet d'envisager une gaine étanche en service, et présentant une résistance améliorée en situations accidentelles. Les premières évaluations réalisées en situations représentatives des réacteurs à eau ont conforté l'intérêt de poursuivre les efforts pour une évaluation plus systématique des performances et pour la recherche de pistes d'optimisation, permettant en particulier de lever les réserves concernant la robustesse du maintien de l'étanchéité et la résistance à la récession (perte de matière) en milieu aqueux.

Four utilisé pour l'analyse du comportement du combustible irradié lors d'un transitoire accidentel.

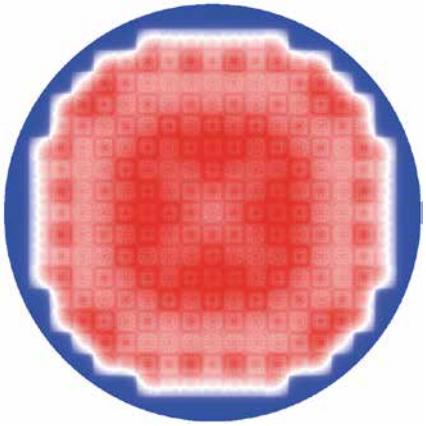
ÉTUDE D'IMPACT DES TRANSITOIRES ACCIDENTELS SUR LE COMPORTEMENT DES COMBUSTIBLES IRRADIÉS

Analyser l'impact, sur le combustible nucléaire irradié, des conditions rencontrées lors de transitoires accidentels (perte de réfrigérant primaire, accident de réactivité…) est une question centrale pour la justification de la sûreté des réacteurs, qui fait l'objet de plusieurs programmes internationaux. Le CEA s'est doté d'une installation originale, Mexiico, pour étudier analytiquement le comportement thermique et mécanique de pastilles de combustible irradié dans des conditions maîtrisées de température et de pression de confinement, représentatives de celles pouvant être rencontrées au cœur du matériau combustible en situation accidentelle réelle. Un premier essai sur une pastille de dioxyde d'uranium irradié à fort taux de combustion a été réalisé avec succès dans le cadre du programme international Nuclear Fuel Industry Research (NFIR), selon le protocole retenu : pressurisation de l'échantillon à 600 bar, montée en température (60°C/min) jusqu'à 1 200°C, puis dépressurisation progressive avec maintien à 1 200°C, avec une mesure en ligne des gaz relâchés durant toute la séquence. Les essais vont se poursuivre pour notamment déterminer le seuil de pression pour lequel le relâchement des gaz de fission (consécutifs à la transformation mécanique et thermique du combustible impacté) devient significatif.



GRANDS OUTILS POUR LE DÉVE-LOPPEMENT DU NUCLÉAIRE

Les recherches pour les systèmes nucléaires actuels ou du futur nécessitent des outils expérimentaux et de simulation spécifiques. Dans ce cadre, la DEN développe et exploite un parc complet et cohérent d'installations expérimentales, prépare le remplacement des installations anciennes et réalise de nouvelles installations telles que le Réacteur Jules Horowitz (RJH) à Cadarache.
Seul outil de ce type en construction en Europe, il sera à terme une installation unique pour l'étude des matériaux et des combustibles sous irradiation, et assurera aussi une part importante de la production de radio-isotopes médicaux.
Dans le domaine de la simulation, la DEN développe des codes dans tous les grands domaines du nucléaire (neutronique, thermohydraulique, mécanique, thermique, combustible, chimie du cycle et matériaux) afin de modéliser l'ensemble des phénomènes entrant en jeu dans un réacteur.



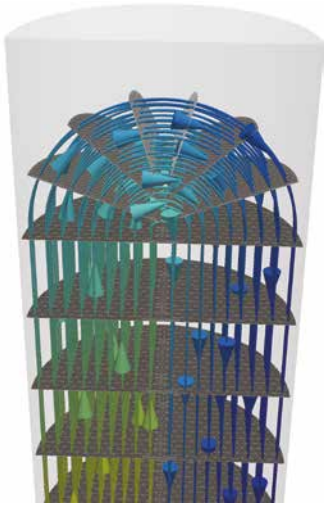
Neutronique :
nappe 2D de flux rapide
d'un grand cœur de REP.

SIMULATION NUMÉRIQUE

La DEN développe des plateformes et des codes de simulation dans les principaux domaines du nucléaire (neutronique, thermohydraulique, mécanique et thermique, combustible, chimie du cycle et matériaux) afin de modéliser l'ensemble des phénomènes complexes entrant en jeu dans le fonctionnement normal ou accidentel d'un réacteur ou d'une installation nucléaire. Les codes développés par la DEN sont pour la plupart utilisés par les industriels du nucléaire français. Leur distribution à des organismes de R&D internationaux, la plupart du temps en accompagnement de collaborations, a conduit à la signature d'un grand nombre d'accords de licence.

NEUTRONIQUE : LIVRAISON DE LA VERSION 1.2 DU CODE APOLLO3®

Les codes de neutronique de la famille Apollo sont développés au CEA depuis plusieurs décennies et constituent une référence pour les réacteurs à eau sous pression (REP). Un des objectifs d'Apollo3® est d'être utilisable pour tous types de filières : REP mais aussi réacteurs à neutrons rapides (RNR). Il vise également l'établissement de schémas de calcul novateurs, avec la levée d'hypothèses simplificatrices inhérentes aux codes de deuxième génération, donnant accès à des résultats à la précision accrue et avec en objectif, à terme, la capacité à traiter un cœur de réacteur en une seule étape de calcul, contre deux aujourd'hui. La version 1.2 livrée à EDF et AREVA fin décembre 2015 permet la simulation de premières applications industrielles, moyennant son intégration dans un environnement ou bien une chaîne de calcul des partenaires. Elle a été livrée avec un ensemble de cas-tests et de cas de recette couvrant des calculs de cœur et d'assemblage pour des REP et des RNR. En particulier, la modélisation et la simulation neutronique du cœur à sûreté améliorée (dit CFV) d'Astrid ont été réalisées, démontrant ainsi la capacité d'Apollo3® à traiter de façon plus réaliste les géométries très hétérogènes de ce cœur. En 2016, les partenaires industriels auront l'opportunité de tester les potentialités du code et le degré d'industrialisation de ses nouvelles fonctionnalités.



Thermohydraulique : visualisation de la circulation du fluide primaire et de sa température dans les tubes à travers les éléments technologiques du générateur de vapeur.

SÛRETÉ-CRITICITÉ : LIVRAISON DU FORMULAIRE CRISTAL V2.0

Cristal est le formulaire de référence en France pour la prévention du risque de criticité dans le domaine des installations du cycle du combustible et du transport des matières fissiles. La nouvelle version V2.0, livrée aux organismes ayant participé à son développement et à sa qualification (DEN, IRSN, AREVA NC), bénéficie des dernières versions des codes de neutronique de la DEN, de bibliothèques de données nucléaires récentes et cohérentes, d'une interface utilisateur et de schémas et d'outils de calcul améliorés, spécifiquement développés pour les différents champs d'application de la sûreté-criticité. Ces évolutions ont permis une réduction significative des écarts calcul/expérience et une meilleure prise en compte du « crédit burn-up[1] » dans les études de sûreté-criticité, et ce pour une très large gamme de configurations représentatives des milieux, géométries et spectres rencontrés dans les opérations du cycle du combustible.

THERMOHYDRAULIQUE : LIVRAISON DE LA VERSION V1.1 DE GENEPI+

Genepi+ est une application logicielle de nouvelle génération de simulation tridimensionnelle des écoulements et des échanges thermiques dans les générateurs de vapeur. Sa version industrielle V1.2, prévue pour courant 2016, doit remplacer le code Genepi2 actuellement en exploitation industrielle chez AREVA NP pour les études de dimensionnement et de sûreté de ses générateurs. Son développement nécessitait la mise au point d'une préversion industrielle V1.1. Livrée fin 2015 à AREVA NP, celle-ci a pour objectif de lui permettre de préparer le changement d'outil dans sa chaîne de calcul d'évaluation des risques vibratoires des tubes de générateurs de vapeur. Cette livraison constitue un jalon important du projet validant la pertinence et le caractère opérationnel de ces nouvelles technologies pour répondre aux besoins industriels d'AREVA NP.

(1) Anti-réactivité du combustible irradié par rapport au combustible neuf.

RÉACTEUR JULES HOROWITZ (RJH)

La construction du RJH à Cadarache est un projet majeur pour le CEA. Seul outil de ce type en construction en Europe, le RJH sera à terme une installation unique pour l'étude des matériaux et des combustibles sous irradiation, en soutien aux réacteurs nucléaires actuels et futurs. Il assurera aussi une part importante de la production de radio-isotopes médicaux. Le projet RJH bénéficie d'un financement du programme d'investissements d'avenir et est construit dans le cadre d'un consortium international, le CEA étant propriétaire, exploitant nucléaire et maître d'ouvrage de l'installation.

ZOOM

LE BÉTONNAGE DU DÔME DU BÂTIMENT RÉACTEUR

Le bétonnage du dôme du bâtiment réacteur a été réalisé avec succès début 2015. Il a mobilisé les équipes de Razel-Bec (génie civil), d'AREVA (maître d'œuvre) et du CEA. Pour la première fois en France, le coulage de cette structure a été effectué en une seule phase et à l'aide d'un béton auto-plaçant, béton hyper fluide se plaçant tout seul dans le coffrage grâce à l'effet de son propre poids.

RETOUR EN IMAGES 2015, UNE ANNÉE DE CHANTIER ET DE FABRICATIONS EN USINE

La construction du RJH s'est poursuivie en 2015 avec une montée en puissance des travaux électromécaniques et la poursuite des travaux de génie civil, qui ont été achevés pour le bâtiment réacteur. On peut citer en particulier sur le chantier :

- le bétonnage du dôme du bâtiment réacteur ;
- la mise en pré-contrainte de l'enceinte du bâtiment réacteur ; *Photo 1*
- la poursuite du montage des cellules chaudes dans le bâtiment des auxiliaires nucléaires ; *Photo 2*
- le début des travaux d'assemblage des piscines ;

Et hors chantier :

- le lancement de la fabrication des premiers gros composants du bloc-pile ; *Photo 3*
- la réalisation des essais de qualification sismique du diesel de sauvegarde. *Photo 4*

LA CAPACITÉ EXPÉRIMENTALE DU RJH AU SERVICE DU LABEL ICERR

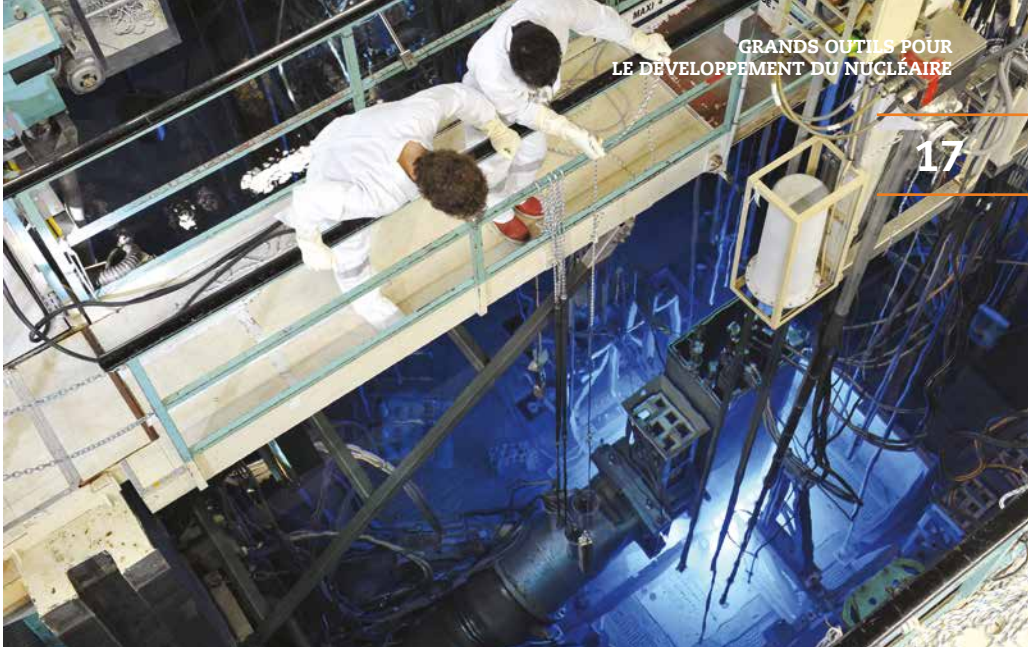
L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a attribué, pour la première fois, son nouveau label ICERR (International Centre based on Research Reactor) aux centres CEA de Saclay et Cadarache pour le dossier de candidature déposé autour du RJH et des installations de recherche associées (maquettes critiques, labos chauds). Des outils expérimentaux, dont le RJH, seront mis à disposition d'institutions des États membres de l'AIEA pour la formation et le développement conjoint de projets de R&D.

1

2

3

4



Le réacteur expérimental Osiris à Saclay.

GRANDES INSTALLATIONS EN SOUTIEN AUX PROGRAMMES

Pour la réalisation de ses programmes, la DEN s'appuie sur de grands outils. Garantir cette capacité implique notamment l'exploitation, la maintenance et la pérennisation des grandes installations (réacteurs, laboratoires chauds...), l'optimisation de la capacité expérimentale ou encore la création ou la rénovation d'installations pour les adapter aux évolutions de programmes ou aux exigences réglementaires.

MISE À L'ARRÊT DÉFINITIF DU RÉACTEUR OSIRIS

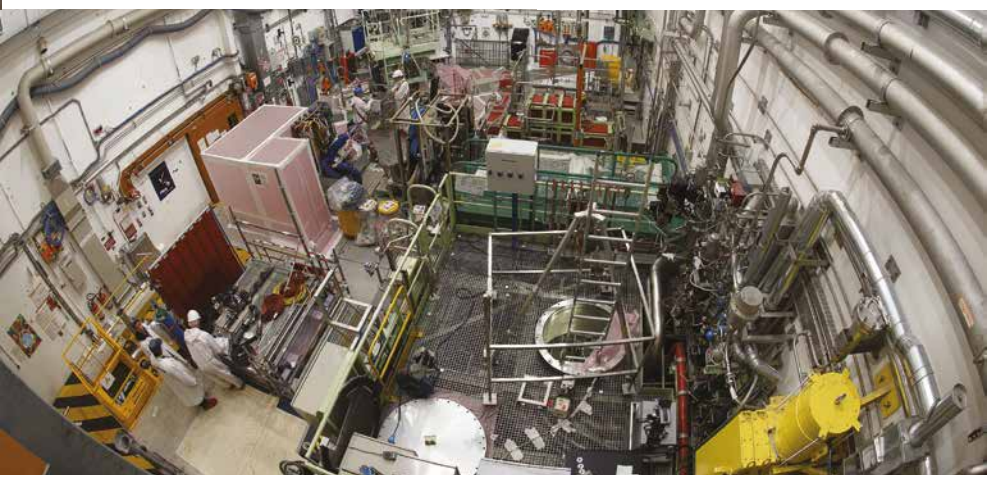
Le 16 décembre 2015, Osiris, réacteur expérimental de type piscine à eau légère et à cœur ouvert, a été définitivement mis à l'arrêt. Mis en service en 1966 sur le centre CEA de Saclay, cet outil a permis pendant près de 50 ans de participer à l'étude des matériaux et combustibles des centrales nucléaires actuelles et futures. Il a également permis de produire des radioéléments en vue d'applications médicales et industrielles mais aussi du silicium dopé destiné à l'industrie électronique.

Avant la mise à l'arrêt définitif du réacteur, les équipes ont réalisé 100 expériences d'irradiations en 2015 (54 en 2014), tenant ainsi les engagements qui avaient été pris. Elles concernaient par exemple le soutien aux études d'EDF sur l'augmentation de la durée de fonctionnement du parc actuel et sur l'amélioration de la manœuvrabilité des réacteurs, ou encore, dans le cadre des programmes CEA, la transmutation des actinides mineurs. Concernant la production de radioéléments à usage médical, la réactivité et la mobilisation des équipes ont permis également la réalisation d'un très grand nombre d'irradiations de cibles d'uranium, notamment pour faire face à l'arrêt prolongé (près de trois mois) du réacteur hollandais HFR, principal fournisseur de ces radioéléments en Europe.

DIVERGENCE DU RÉACTEUR EXPÉRIMENTAL CABRI EN CONFIGURATION BOUCLE À EAU PRESSURISÉE

Le 20 octobre 2015, à Cadarache, le réacteur expérimental Cabri, destiné aux essais de sûreté des combustibles, a divergé pour la première fois en configuration boucle à eau pressurisée. Cette nouvelle configuration permettra de tester, avec une meilleure représentativité, les éléments combustibles des réacteurs à eau sous pression (REP) du parc actuel en situation accidentelle. Cette divergence, autorisée par l'Autorité de sûreté nucléaire le 19 octobre, fait suite à un important programme de jouvence qui visait à modifier l'installation au profit de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) dans le cadre de la poursuite des essais du programme international CIP (Cabri International Program[1]). Dans le cadre de cette rénovation, la boucle sodium du réacteur Cabri – permettant de reproduire les conditions de fonctionnement des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium – a été remplacée par une boucle à eau sous pression, et des rénovations, nécessaires à l'obtention du maintien de son fonctionnement, ont été effectuées. Celles-ci ont essentiellement porté sur le renforcement de l'installation pour la tenue au séisme, les manutentions, la ventilation et l'incendie ainsi que les essais en froid de la boucle à eau sous pression. Le CEA assure les remises à niveau et les jouvences de l'installation. L'IRSN en tant que demandeur et pilote du programme expérimental utilisateur en assure le financement.

(1) Piloté et cofinancé par l'IRSN, le CIP vise à étudier le comportement des crayons de combustible nucléaire et de leur gainage, lors d'un accident d'injection de réactivité dans les REP. Placé sous l'égide de l'OCDE/AEN, ce programme, lancé en 2000, associe de multiples partenaires nationaux et étrangers.



Vue générale du hall du réacteur Cabri, en fin de phase de rénovation.

ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT NUCLÉAIRE

Conduire des recherches dans le domaine nucléaire nécessite un parc d'installations en constante évolution. Il est donc nécessaire de mener des programmes de construction et de rénovation d'installations ainsi que des programmes de démantèlement de celles arrivées en fin de vie. Ils couvrent l'ensemble des activités réalisées après l'arrêt définitif du fonctionnement de l'installation jusqu'à l'atteinte d'un état final prédéfini. Le CEA a une stratégie conforme aux recommandations des autorités de sûreté : le démantèlement immédiat des installations, chaque fois que c'est réalisable, afin de diminuer les risques le plus rapidement possible et bénéficier des connaissances du personnel d'exploitation. Ces programmes d'assainissement et de démantèlement s'accompagnent d'actions de R&D en appui, l'objectif étant de diminuer les coûts, la durée des chantiers, les doses, les déchets et d'améliorer la sûreté des chantiers.

Première découpe de tuyauterie d'une cuve de dissolution à l'aide du bras Maestro équipé d'une tête laser (avant découpe à gauche, après découpe à droite).

En juillet 2015, dans le cadre de leur mission de contrôle des activités en INB, les autorités de sûreté nucléaire ont adressé au CEA un courrier conjoint demandant de réexaminer la stratégie globale de démantèlement, ainsi que celle de gestion des matières et des déchets radioactifs, de prioriser les opérations, de renforcer l'organisation et les équipes, et d'examiner la pertinence des ressources financières consacrées aux opérations. Ce travail, qui se poursuivra jusqu'à fin 2016, conduira le CEA à proposer des priorités mais aussi les scénarios et les chroniques de ses opérations, avec un objectif de réduire les risques liés au terme source.

CHANTIERS DE DÉMANTÈLEMENT

Aujourd'hui, 22 installations nucléaires de base (INB) civiles sont en cours de démantèlement au CEA. Une spécificité réside dans la grande variété d'installations à démanteler (réacteurs expérimentaux, laboratoires, ateliers et usine du cycle, installations de traitement de déchets et d'entreposage...), qui ne permet pas de bénéficier d'un effet de série. Au fil des années, le CEA a acquis une expérience importante, aussi bien dans la maîtrise d'ouvrage des opérations que des méthodologies et des savoir-faire nécessaires à leur réalisation.

MARCOULE

Le site de Marcoule réunit plusieurs grands chantiers de démantèlement, avec trois projets majeurs : le démantèlement de l'usine de traitement des combustibles usés UP1 et de l'Atelier pilote de Marcoule (APM) et la préparation du démantèlement du réacteur Phénix, mis à l'arrêt en 2009.

LE DÉMANTÈLEMENT D'UP1

L'usine UP1 a permis de retraiter les combustibles usés des réacteurs nucléaires G1, G2 et G3 du centre de Marcoule avec pour objectif de produire le plutonium nécessaire aux besoins de la Défense nationale. Elle a également retraité des combustibles usés civils en provenance des réacteurs uranium naturel graphite gaz (UNGG) d'EDF et de Vandellos en Espagne.

Elle constitue aujourd'hui l'un des plus grands chantiers de démantèlement d'Europe. Le programme de démantèlement couvre les ateliers de dégainage, l'usine de traitement proprement dite, l'Atelier de vitrification de Marcoule (AVM), les ateliers de support et d'entreposage (ASE) et la reprise et le conditionnement des déchets anciens (RCD), bitumes et hors bitumes.

- Concernant l'usine, l'année 2015 a été marquée par le désentreposage et le transfert de déchets historiques de moyenne activité à vie longue de l'atelier MAR 200 de l'usine vers l'installation MAR 400, répondant aux nouvelles normes antisismiques. Ce transfert constituait à ce titre un jalon significatif de sûreté de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Il intégrait toute une chaîne d'opérations (contrôle radiologique des fûts, conditionnement en conteneurs, transport entre les deux installations, déchargement, nouveau contrôle radiologique et entreposage dans la nouvelle zone), qui se sont déroulées de mai à décembre. Au total 100 fûts ont été transférés en 28 transports.

Fûts de déchets de moyenne activité à vie longue stockés dans la zone d'entreposage de l'installation MAR 400.

Par ailleurs, le bras téléopéré Maestro a été mis en actif au sein de l'usine fin 2015 pour effectuer des découpes laser de cuves de dissolution dans lesquelles étaient historiquement dissous les combustibles usés à traiter. Le couplage du bras à la technologie laser constitue une première mondiale et apporte une réponse adaptée pour la découpe de structures en acier inoxydable très dur de forte épaisseur (plusieurs centimètres) dans un milieu contraignant : très fort niveau de radioactivité, grandes dimensions et masse des cuves, faible accessibilité, travail « en aveugle » et en déporté. L'objectif est de terminer le démantèlement du premier dissolveur fin 2016 et du second fin 2018.

Découpe d'une centrifugeuse à l'aide du bras Maestro au sein d'une cellule de l'APM à Marcoule.

- S'agissant de l'AVM, les études de démantèlement ont démarré, ainsi que les travaux de renforcement de l'installation suite aux études complémentaires de sûreté demandées par l'ASN aux exploitants nucléaires suite à l'accident de Fukushima. C'est à ce titre que la phase 1 des travaux de démantèlement de la partie haute de l'évaporateur a été achevée en 2015. L'enclenchement de la phase 2 est prévu en 2016.
- Pour ce qui concerne l'ASE, le démantèlement est prévu au fur et à mesure de la mise à l'arrêt des installations. En 2015, les opérations préparatoires aux opérations de vidange des bassins non utilisés de la station de traitement des effluents liquides (STEL) de Marcoule ont démarré et se poursuivront en 2016.
- Dans le domaine de la reprise et du conditionnement des déchets (RCD) anciens, les opérations se structurent en deux grands domaines : la RCD bitumes (reprise des fûts d'enrobés bitumes) et la RCD hors bitumes. Pour le premier domaine, la reprise des fûts d'enrobés bitumes des casemates 1 et 2 de la STEL se poursuit conformément aux attentes de l'ASN. Pour le second domaine, il s'agit de caractériser, en vue de la reprise d'ici à 2030, les autres déchets anciens actuellement entreposés dans des fosses du dégainage et de la zone nord (déchets métalliques de structure (magnésium, aluminium, acier...) ou pulvérulents (résines, zéolithes, boues...)).

LE DÉMANTÈLEMENT DE L'ATELIER PILOTE DE MARCOULE (APM)

Mis en actif en 1962 et arrêté en 1997, l'APM a été créé pour confirmer, à l'échelle d'un pilote, les procédés de traitement des combustibles irradiés mis au point dans les laboratoires. Il compte 30 cellules de haute activité, cinq chaînes blindées et 230 boîtes à gants. Depuis mi-2015, un bras robotisé Maestro réalise les opérations de démantèlement pilote par découpe mécanique de différents équipements du procédé ainsi que l'évacuation des déchets produits. Fin 2015, il avait été déposé et découpé deux centrifugeuses, un pH-mètre, un filtre pulsé, un pot décanteur et diverses tuyauteries représentant environ une tonne de déchets, qui sera envoyée vers le centre de stockage Andra de l'Aube. Ce chantier pilote se poursuivra en 2016 et fera l'objet à la mi-année d'un rapport de retour d'expérience qui sera adressé à l'Autorité de sûreté nucléaire de Défense.

LE DÉMANTÈLEMENT DE LA CENTRALE PHÉNIX

Le réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium Phénix a été arrêté fin 2009. En attendant la publication du décret d'autorisation de démantèlement prévu courant 2016, les opérations préparatoires se sont poursuivies tout au long de l'année 2015.

Parmi elles, on peut citer la carbonatation d'un des circuits secondaires du réacteur. Leur vidange est en effet terminée depuis 2011 mais la présence de sodium résiduel, sous forme de film sur les tuyauteries, nécessite un traitement par une double opération de carbonatation, puis de rinçage. En accord avec l'ASN, l'opération de carbonatation du premier circuit a eu lieu avec succès en 2015 : il s'agit de faire circuler un mélange contrôlé de vapeur d'eau, de gaz carbonique et d'azote pour transformer le sodium en soude, puis en carbonate inerte chimiquement. S'en suivront les opérations de préparation de ce circuit, pour une mise en œuvre du rinçage en 2017.

Parallèlement, le chantier de construction de l'installation NOAH, destinée à traiter le sodium liquide issu du réacteur en le transformant en soude, s'est poursuivi. L'opération de bétonnage du radier s'est déroulée en août et marque une étape importante de la construction de cette installation.

FONTENAY-AUX-ROSES

Les opérations d'assainissement-démantèlement des installations de Fontenay-aux-Roses concernent deux INB : l'INB 165, dite procédé, et l'INB 166, dite support. La première regroupe l'ensemble des bâtiments où ont été menés les programmes de R&D dans le domaine de la radiochimie et du traitement des combustibles usés. La seconde regroupe toutes les autres installations, notamment celles dédiées à la gestion des déchets produits.

TRANSMISSION À L'ASN DU DOSSIER DE MODIFICATION DES DÉCRETS DE DÉMANTÈLEMENT DES DEUX INB DU SITE

Les décrets encadrant les opérations d'assainissement et de démantèlement du centre CEA de Fontenay-aux-Roses sont en vigueur respectivement jusqu'au 2 juillet 2017 pour l'INB165 et jusqu'au 2 juillet 2018 pour l'INB 166. Dans ce cadre, deux dossiers de demande de nouveaux décrets ont été transmis, en vue de leur instruction et de leur présentation en enquête publique, auprès des autorités compétentes : l'ASN et la Mission sûreté nucléaire et radioprotection (MSNR) sous la tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. La demande vise principalement à prolonger les délais nécessaires en vue du déclassement des installations selon les nouvelles dates du planning directeur pour les projets pilotés sur le centre, et à définir une révision de l'état final en proposant un plan de démantèlement consolidé et innovant. Les dossiers transmis dans les délais constituent l'atteinte d'un jalon contractuel entre l'ASN et le CEA. Ils marquent l'achèvement de discussions entre les pouvoirs publics et le CEA et traduisent une véritable volonté du CEA de poursuivre les opérations de démantèlement et d'évacuation des déchets, déjà bien engagées.

Chaîne blindée Antinea à Fontenay-aux-Roses (à gauche) et opération de démantèlement d'une sorbonne (à droite).

AVANCÉES DANS LE DÉMANTÈLEMENT DE L'INB 165 : FIN DU DÉMANTÈLEMENT DE LA CHAÎNE BLINDÉE ANTINEA

La chaîne blindée Antinea, implantée dans le bâtiment 18 de l'INB165, était constituée de cinq enceintes alpha. Elle avait été conçue pour mettre en œuvre un procédé d'élaboration du plutonium 238 à l'état métallique, destiné à servir de source de chaleur pour alimenter en énergie des générateurs isotopiques pour stimulateurs cardiaques. Cette chaîne blindée a ensuite été orientée sur des activités de préparation de sources scellées à base d'oxyde d'actinides ou de mélanges à base d'éléments cibles comme le béryllium. Du fait de la forte émission de neutrons des composés présents dans les cellules, leur blindage avait été réalisé à l'aide de caissons en acier doux, remplis d'eau. Après une phase d'études, les travaux de démantèlement ont débuté en juillet 2014 par la dépose des protections biologiques et le démantèlement d'une sorbonne. La dépose de la première enceinte a eu lieu en mars 2015. Afin de poursuivre les opérations, les quatre autres enceintes ont été transférées en entreposage dans un local spécifique. Elles sont maintenant en attente d'autorisation à la découpe. Le démantèlement de la chaîne s'est terminé fin octobre 2015 par le traitement des châssis. Il s'agit de la 11e chaîne blindée démantelée à Fontenay-aux-Roses sur les 17 chaînes qui existaient en 1999. Deux autres chaînes sont en cours de démantèlement et quatre chaînes sont encore en exploitation, dont la chaîne blindée Petrus qui sera la dernière du bâtiment 18 à être démantelée.

ÉVACUATION DES DERNIERS EFFLUENTS HAUTEMENT RADIOACTIFS DU SITE

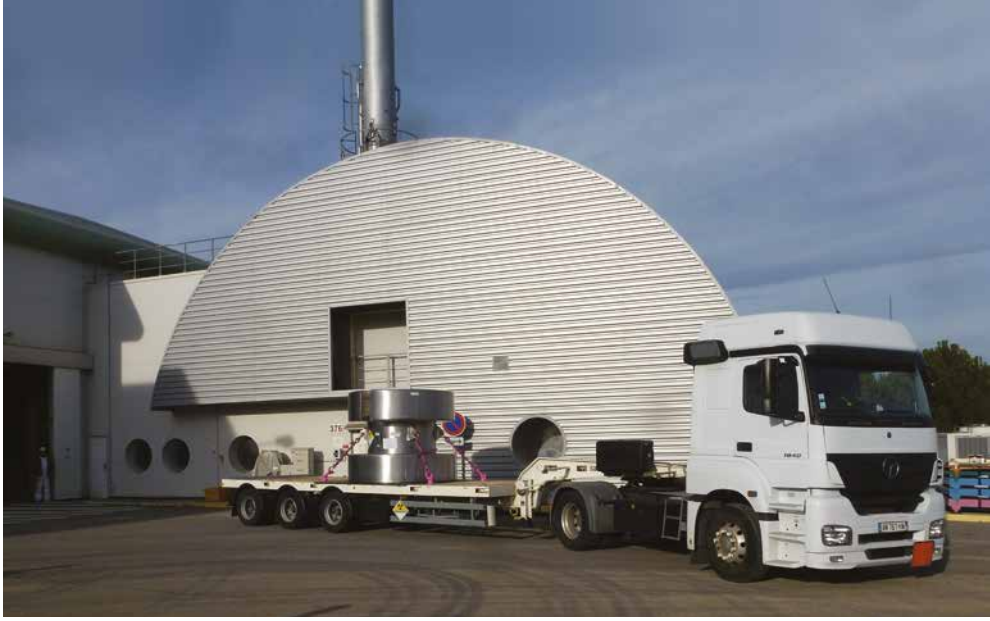
Les derniers effluents hautement radioactifs du site de Fontenay-aux-Roses ont été évacués en 2015. Il s'agissait de 10 m³ d'effluents alpha, produits dans le bâtiment 18 de l'INB 165. Ils ont été transportés vers la STEL de Marcoule, en quatre transports, au moyen de l'emballage LR 56. Ces effluents aqueux avaient été générés par les activités d'assainissement du bâtiment, dont le traitement d'effluents radioactifs issus de la chaîne blindée Petrus.

SACLAY

FIN DU TRAITEMENT DES CUVES DES LABORATOIRES DE HAUTE ACTIVITÉ DE SACLAY (LHA)

Une des cuves avant son démantèlement (en haut) et lors de sa découpe (en bas).

Les LHA (INB 49) comportaient, parmi les équipements et locaux à démanteler ou assainir, 30 cuves d'effluents radioactifs regroupées par paires à l'extérieur des bâtiments. Chaque cuve, installée dans les années 1970, était positionnée dans un cuvelage enterré et reliée à la cellule adjacente par un réseau de canalisations circulant dans des caniveaux. La dernière des 30 cuves a été déposée en avril 2015, ce qui constitue une étape majeure du démantèlement de l'installation. Les opérations ont été menées d'une façon similaire sur 14 paires de cuves : chaque cuve a été sortie de son emplacement et découpée dans un sas de chantier. Les conditions d'intervention ont été adaptées au risque de contamination et au type de radioéléments présents. Deux sas de chantier identiques, de type nucléaire, ont été construits pour mener à bien ces opérations. Les 28 cuvelages correspondants ont également été assainis et la peau inox garantissant l'étanchéité de ceux-ci a été retirée. Ces opérations se sont déroulées dans des sas de chantier de structure plus légère. Pour la dernière paire de cuves, reliée à la cellule dans laquelle ont été fabriquées des sources de césium, les conditions d'intervention ont nécessité de mettre en place des protections biologiques au-dessus des cuves pour protéger de l'irradiation les intervenants et les bâtiments voisins. Un assainissement interne des cuves par sablage a été réalisé pour permettre la sortie de chaque cuve de son cuvelage et sa découpe dans le sas de chantier.



Arrivée du premier colis inox issu de la fosse 6 de l'INB56 à l'installation Cedra à Cadarache.

GRENOBLE

DÉCLASSEMENT DU RÉACTEUR SILOÉ

Entré en divergence en 1963 et arrêté en 1997, le réacteur Siloé a été officiellement déclassé par arrêté du 12 février 2015, homologuant la décision de l'ASN. Siloé est ainsi le troisième et dernier réacteur du centre CEA de Grenoble à être déclassé, après Siloëtte en 2007 et Mélusine en 2011. La zone libérée par les réacteurs va être utilisée pour construire des installations dédiées à la R&D sur la biomasse.

CADARACHE

A Cadarache, les activités d'assainissement-démantèlement concernent des chantiers de différentes INB, ainsi que des opérations de reprise et de conditionnement de déchets et/ou de traitement et d'évacuation de combustibles usés. Plusieurs avancées importantes ont été réalisées en 2015.

LE PARC D'ENTREPOSAGE DES DÉCHETS RADIOACTIFS SOLIDES (INB 56)

L'INB 56 est une installation permettant d'entreposer des déchets très faiblement, faiblement ou moyennement radioactifs. Mise en service dans les années 1960, elle a graduellement été remplacée par l'installation Cedra depuis 2006. Dans ce cadre, des opérations de reprise et de conditionnement de déchets sont mises en œuvre. Elles concernent les deux zones de l'installation : le parc d'entreposage constitué de hangars, de trois piscines d'entreposage de combustibles expérimentaux qui en ont déjà été évacués et de six fosses contenant des déchets de moyenne activité à vie longue, et la zone constituée de cinq tranchées contenant principalement des déchets de moyenne activité à vie courte et d'un hangar de déchets de très faible activité. L'année 2015 aura été une année importante car marquée par la réalisation d'opérations d'extraction de déchets résultant de la mise en œuvre d'équipements qui, pour être opérationnels, ont nécessité des mois d'études, de conception, d'instruction technique et de sûreté. Ainsi, le premier colis inox de la fosse 6 a pu être extrait et transféré vers Cedra en décembre. L'évacuation des 191 colis inox contenus dans cette fosse fait l'objet d'un objectif prioritaire de sûreté (OPS), dont l'échéance sera précisée sur la base de la cadence de reprise observée d'une dizaine de colis. Par ailleurs, une des cinq alvéoles de la fosse 3 a été totalement libérée de ses déchets en octobre, permettant ainsi de poursuivre la reprise d'une deuxième alvéole. Enfin, les opérations de reprise des déchets sur la tranchée 2 se sont poursuivies à une cadence d'environ 5 m^3 par mois, et constituent un OPS pour fin 2017.

STATION DE TRAITEMENT DES DÉCHETS SOLIDES (STD)

La station de traitement des effluents actifs et des déchets solides (INB 37) de Cadarache se décompose en deux sous-ensembles, l'un dédié au traitement des effluents liquides (STE) et l'autre au traitement et au conditionnement des déchets solides (STD). Le premier est actuellement en arrêt de production et est remplacé par l'installation Agate. Le deuxième doit être pérennisé et fait l'objet de rénovations, ce qui implique le démontage en milieu nucléaire d'anciens équipements obsolètes dans le respect d'un planning et d'un scénario compatibles avec le projet de rénovation. Parmi les avancées de 2015, on peut noter la fin du démontage de la cellule blindée de la presse de 250 tonnes, étape préliminaire au démontage de la presse elle-même.

PROJETS TRANSVERSES POUR L'ASSAINISSEMENT-DÉMANTÈLEMENT

L'avancée des chantiers d'assainissement-démantèlement et de reprise et de conditionnement des déchets requiert la mise en œuvre de projets transverses à tous les chantiers, destinés à coordonner l'ensemble de ces activités. Il s'agit par exemple des transports, de la gestion des flux de déchets et matières, des installations de service nucléaire, mais aussi de la R&D au service de l'ensemble des chantiers.

Le nouvel emballage Tirade.

TRANSPORT

Le transport inclut toutes les opérations et conditions associées au mouvement de matières radioactives depuis la conception des emballages jusqu'au déchargement et la réception au lieu de destination. Dans ce contexte, la DEN est responsable de la définition et de la mise en œuvre d'un parc d'emballages adapté aux besoins en transports de matières radioactives de l'ensemble du CEA, domaine qui peut être décliné en trois activités opérationnelles principales : la réalisation des transports, le maintien en conditions opérationnelle et réglementaire du parc d'emballages et les conception, fabrication et duplication de nouveaux emballages et équipements associés.

TIRADE, UN NOUVEL EMBALLAGE DÉDIÉ AU TRANSPORT DE DÉCHETS TECHNOLOGIQUES

Dans le cadre du développement de son parc d'emballages, la DEN en a conçu un nouveau, appelé Tirade, dédié au transport de déchets radioactifs. Sa conception prend en compte l'ensemble des contraintes opérationnelles des installations nucléaires (poids, encombrement, mode de chargement/déchargement, types de fût à transporter...) et répond aux exigences de démonstration de sûreté les plus récentes en particulier vis-à-vis des risques radiologiques et d'explosion interne induits par la présence de matières radioactives radiolysables ou thermolysables. Pour ce faire, des développements originaux et des matériaux spécifiques ont été mis en œuvre permettant de garantir par exemple la robustesse du système de fermeture en cas d'explosion ou de chute ou bien une performance très élevée des protections biologiques et thermiques, autorisant ainsi le transport de déchets irradiants. L'année 2015 a été marquée par la mise en service de ce nouvel emballage avec la réalisation, en décembre, d'un premier transport à blanc depuis Fontenay-aux-Roses vers Cadarache, pour tester les modes de chargement et de déchargement ainsi que le roulage.

MISE EN ACTIF ET PREMIER CHARGEMENT SOUS EAU DE L'EMBALLAGE IR200

L'année 2015 a été marquée par la mise en actif et la première immersion en piscine, au sein de l'INB 72 de Saclay, d'un nouvel emballage du parc CEA, appelé IR200. Un premier panier de 26 crayons de combustibles usés, puis un second de 23 crayons ont été chargés sous eau. L'introduction des combustibles dans un emballage complétement immergé fut une première sur cette INB. L'emballage IR200 chargé a été expédié vers l'installation LECA-STAR de Cadarache. Les combustibles y seront traités et reconditionnés avant entreposage dans l'installation Cascad, également à Cadarache.

Ces deux opérations s'inscrivent dans le cadre de l'objectif prioritaire de sûreté visant au désentreposage des combustibles usés de l'INB 72 à fin 2017. En effet, l'INB 72 a pour rôle de traiter le flux courant des déchets radioactifs produits par les activités scientifiques et d'exploitation nucléaire du CEA Saclay et est aussi le lieu d'entreposage de déchets historiques : déchets technologiques, sources radioactives sans emploi et combustibles irradiés entreposés en massifs, en puits et dans une piscine.

L'emballage IR200 en fond de piscine de l'INB 72 à Saclay.

GESTION DES FLUX DE DÉCHETS ET MATIÈRES

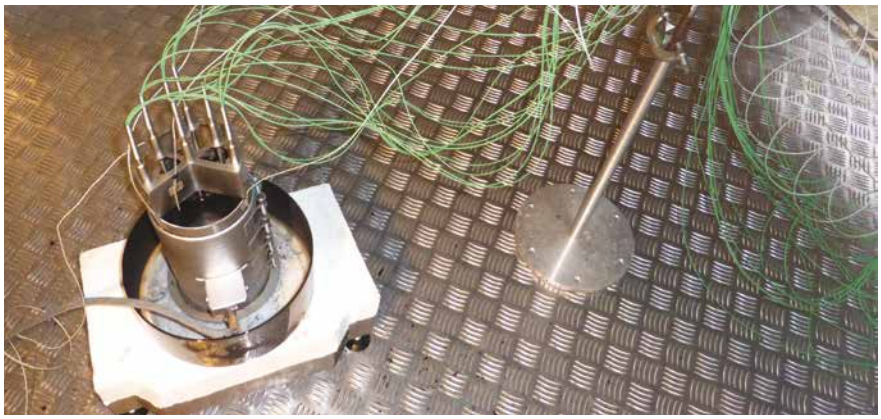
La gestion des flux de déchets radioactifs, des matières et des combustibles sans emploi a pour objectif de permettre le déroulement nominal des activités de R&D et des programmes d'assainissement et de démantèlement.

Un des objectifs principaux pour le CEA est de disposer de filières opérationnelles de traitement et d'entreposage des déchets radioactifs de toutes les catégories, ainsi que d'une capacité d'évacuation en ligne vers les exutoires opérationnels de l'Andra (Cires et CSA), et ceci dans un contexte technico-économique optimisé. Un second objectif majeur est de disposer à terme des stockages futurs, capables de prendre en charge respectivement tous les colis de déchets de haute activité (HA) et moyenne activité à vie longue (MA-VL), et les colis de faible activité à vie longue (FA-VL).

SPÉCIFICATIONS D'ACCEPTATION DES COLIS DE DÉCHETS HA ET MA-VL DU CEA DANS CIGÉO

Le CEA mène des actions techniques et scientifiques pour contribuer à la prise en charge future des colis de déchets HA et MA-VL à Cigéo, le projet de centre de stockage profond des déchets radioactifs dont l'Andra est maître d'ouvrage. Il contribue également à la mise en place de spécifications d'acceptation opérationnelles de ses colis de déchets HA et MA-VL en condition de stockage dans Cigéo. En particulier, en tant que propriétaire de colis majoritairement de type MA-VL, le CEA définit et réalise des programmes de R&D spécifiques sur les enrobés de boues bitumées (~15 % de l'inventaire de dimensionnement des colis MA-VL à Cigéo), les colis cimentés de divers déchets technologiques (~10 % de l'inventaire MA-VL de Cigéo) et les déchets contenant du magnésium métallique (gaines usées de la filière UNGG).

Un des résultats majeurs de l'année 2015 est la présentation en audition, devant la Commission nationale d'évaluation, des conclusions sur la démonstration de la maîtrise des risques en condition de stockage profond des colis bitumeux, notamment vis-à-vis du risque incendie. Il s'agit d'un programme quadripartite (CEA, Andra, AREVA, EDF), dont les conclusions font l'objet d'un dossier constitué de 17 rapports techniques. Elles confirment en particulier que les colis de stockage béton contenant quatre fûts d'enrobés de boues bitumées, soumis à un scénario incidentel d'incendie en environnement thermique enveloppe (2 h à 1000 °C), restent mécaniquement intègres. L'échauffement par le flux de chaleur externe des fûts de bitume placés dans le colis de stockage béton reste très limité, et ne conduit pas à un auto-échauffement ni à une auto-inflammation. Ces résultats couplant des expérimentations à l'échelle représentative et des modélisations thermochimiques confortent la démonstration de la maîtrise des risques incendie en condition de stockage profond de ces colis.



Montage expérimental dédié aux essais de sollicitation thermique d'enrobés de boues bitumées, à l'échelle du kilogramme.

ÉTUDE SUR LES DÉCHETS TRITIÉS

Dans le cadre des engagements pris par la France pour l'accueil du projet ITER, notamment dans les domaines de la gestion des déchets radioactifs et du démantèlement, le CEA intervient en soutien technique à l'Agence ITER-France. Dans ce cadre, une approche innovante pour la gestion des déchets tritiés a été proposée. À partir d'un scénario défini par un inventaire déchets et un terme source associé, la technique qui apparaît la plus adaptée est déterminée sur la base d'une analyse multicritères considérant notamment la sûreté, la protection de l'environnement, la faisabilité technique et les coûts. L'entreposage apparaît comme la solution apportant une réponse à tous les types de déchets. Le traitement thermique, de type chauffage ou incinération, a été identifié comme un procédé attractif pour les déchets technologiques tritiés, car il offre une réduction de volume et un taux de détritiation plus élevé mais il nécessite une gestion des déchets secondaires créés et une évaluation fine des gains financiers. Un article intitulé *Tritiated waste management opportunities based on the reduction of tritium activity and out-gassing* et le poster associé, présentant la méthodologie et les résultats obtenus, ont été reconnus comme les meilleurs de la conférence *Waste Management* 2015, congrès international qui se déroule chaque année aux Etats-Unis à Phoenix en Arizona. Il réunit près de 2 000 scientifiques, ingénieurs, managers et étudiants. L'étude se poursuivra en 2016 et participera à la définition et l'optimisation technico-économique d'Intermed, future installation d'entreposage des déchets contenant du tritium en vue de sa décroissance pour une cinquantaine d'années correspondant à une diminution de l'inventaire tritium d'un facteur 16.

INSTALLATIONS DE SERVICE NUCLÉAIRE

Pour gérer ses matières nucléaires et ses déchets radioactifs, le CEA s'appuie sur un parc d'installations de service nucléaire. Celles-ci lui permettent de traiter, conditionner et entreposer les matières nucléaires, les combustibles usés, les effluents liquides et les déchets solides issus des programmes de R&D et d'assainissement et démantèlement. Ce parc datant pour partie de la création des centres, le CEA s'est engagé dans un important programme de reconfiguration (arrêts/créations d'installations, travaux de rénovation...), en vue de l'adapter aux besoins futurs et aux nouvelles exigences de sûreté.

PREMIER BÉTON POUR L'INSTALLATION D'ENTREPOSAGE DIADEM

Dans l'attente de la mise en service de Cigéo par l'Andra, le CEA a identifié le besoin de disposer d'une installation d'entreposage pour ses déchets fortement irradiants et/ou à forte composante alpha, provenant de cinq sites du CEA. Suite aux conclusions favorables et sans réserve de l'enquête publique réalisée en juin et juillet 2014, la construction de cette installation, baptisée Diadem, a pu démarrer en 2015 sur le site de Marcoule d'où provient la plupart des déchets concernés. Ainsi, le premier béton de l'installation a été coulé en mai. L'installation devrait entrer en service fin 2018, pour une durée d'exploitation estimée à cinquante ans.

Pose du premier béton Diadem par le directeur du centre de Marcoule.

R&D POUR L'ASSAINISSEMENT-DÉMANTÈLEMENT

Forte de son expertise dans le domaine de l'assainissement et du démantèlement nucléaire, la DEN a structuré ses actions de R&D dans ce domaine autour de six thématiques : l'évaluation de l'état radiologique des installations et des sols, la caractérisation des déchets, la réalisation sûre et économiquement optimisée d'opérations en milieu hostile, la décontamination des structures et des sols, le traitement optimisé des déchets et des effluents, les outils et méthodes de chiffrage et de gestion des matières, déchets et transports. Zoom sur quelques actions.

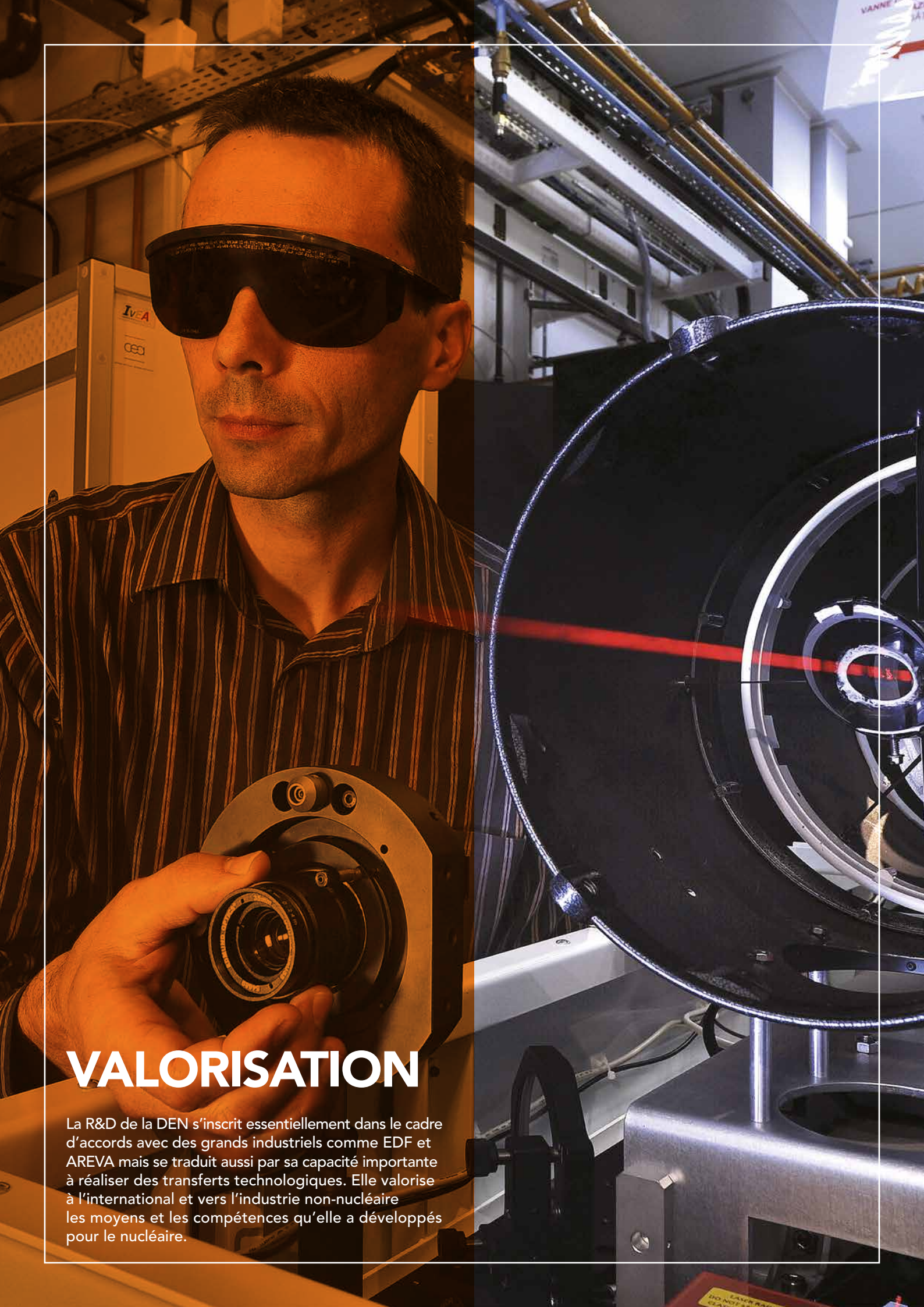
SEPT PROJETS RETENUS SUITE À L'APPEL À PROJETS PIA ANDRA

La DEN s'est investie dans le cadre de l'appel à projets Andra du programme investissements d'avenir (PIA) dédié à l'optimisation de la gestion des déchets radioactifs de démantèlement. Sur les douze propositions impliquant la DEN dans le cadre de la première session, sept ont été retenues par l'Andra en 2015. Elles portent sur le développement de technologies et procédés utiles aux opérations de démantèlement du CEA. Les besoins dans ce domaine ne manquent pas : mesures de dosimétrie par OSL (luminescence stimulée optiquement) fibrée, cartographie neutronique, autoradiographie pour la mesure non destructive de radioéléments émetteurs béta ou alpha, vitrification « in-can melting » pour le conditionnement de déchets MA-VL, nouvelles matrices de conditionnement moins sensibles aux rayonnements ou encore fusion décontaminante d'aciers contaminés en uranium ou de déchets tritiés. Dix-neuf autres propositions ont été préparées fin 2015 pour une sélection en 2016.

BRAS MAESTRO : PREMIÈRES MISES EN ACTIF ET MISE EN ŒUVRE DE LA DÉCOUPE LASER DE FORTE PUISSANCE

Parmi les procédés innovants mis au point et développés par le CEA pour ses chantiers de démantèlement, en lien avec des partenaires industriels, le robot téléopéré Maestro fait figure de prouesse technologique. Il permet d'accéder à des zones très irradiantes interdites aux opérateurs et d'y introduire divers outils de caractérisation, décontamination, découpe et préhension, nécessaires aux différentes tâches d'un chantier de démantèlement. 2015 a été l'année des « mises en actif » pour le bras Maestro avec les démarrages du démantèlement d'une cellule blindée de l'Atelier pilote de Marcoule (APM) en juin puis des dissolveurs de l'usine UP1 à Marcoule en fin d'année. Sur ce dernier chantier a eu lieu une première mondiale, fruit de nombreuses années de développement au CEA : la découpe laser téléopérée de ces dissolveurs dont le matériau est un métal très difficile à couper par des moyens mécaniques, compte tenu de sa dureté et de sa forte épaisseur.

Bras téléopéré Maestro au sein d'une cellule de l'APM à Marcoule.



VALORISATION

La R&D de la DEN s'inscrit essentiellement dans le cadre d'accords avec des grands industriels comme EDF et AREVA mais se traduit aussi par sa capacité importante à réaliser des transferts technologiques. Elle valorise à l'international et vers l'industrie non-nucléaire les moyens et les compétences qu'elle a développés pour le nucléaire.

Analyses élémentaires et isotopiques d'échantillons d'uranium et de plutonium en boîtes à gants à Saclay.

ANALYSES ISOTOPIQUES À FAIBLE INCERTITUDE

Dans le cadre de la lutte contre la prolifération nucléaire, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a mis en place en 2015 un programme international d'intercomparaison (RORO) pour des mesures isotopiques de l'uranium (U) et du plutonium (Pu) par spectrométrie de masse. Des chercheurs du Laboratoire de développement analytique nucléaire isotopique et élémentaire (LANIE) de Saclay, membre depuis 2014 du réseau NWAL[1] de l'AIEA dédié à l'analyse de matériaux nucléaires, y ont participé. Leurs analyses de cinq échantillons U et Pu par spectrométrie de masse, selon les cas à « source thermo-ionisation » ou à « source plasma multicollection », ont permis d'atteindre de faibles incertitudes sur les isotopes minoritaires U (234 et 236) de l'ordre de quelques pour mille.

L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA DEN EN SOUTIEN À ITER

ITER est un prototype de fusion thermonucléaire, de type tokamak, actuellement en construction à Saint-Paul-lez-Durance. Le CEA prend part à ce projet de recherche international depuis la phase d'études en s'étant positionné via F4E[3] sur des activités où les équipes de la DEN possèdent une expertise technique et scientifique (matériaux, mécanique, neutronique,..). ITER Organization, responsable de la conception de l'installation de recherche, de sa construction, de son exploitation et de sa mise à l'arrêt a elle aussi lancé des appels à projets sur les volets exploitation et maintenance, auxquels le CEA a répondu compte tenu de l'expérience de la DEN dans ces domaines. En novembre 2015, il a ainsi signé un contrat d'une durée de trois ans. La DEN y apporte son expertise sûreté et maintenance sur des équipements du tokamak et les cellules chaudes. De nouvelles sollicitations sont attendues et l'on peut noter un second contrat en cours de signature notamment sur l'expertise des transferts nécessaires entre le tokamak et les cellules chaudes.

Microalgue avant extraction (à gauche) ; microalgue après extraction : extrait CO_2 de bêta-carotène (à droite).

DÉMONSTRATION DES CAPACITÉS DE VALORISATION DE MICROALGUES PAR CO_2 SUPERCRITIQUE

Les équipes de la DEN à Marcoule ont participé, en lien avec des partenaires industriels et académiques, à un projet qui visait la culture d'une microalgue native[2] à très grande échelle en milieu ouvert sur des salines inexploitées et son bioraffinage pour une valorisation en bioénergies (biométhane, biodiesel) et bioproduits. Cette étude a mis en évidence le fort potentiel des microalgues comme source de dérivés lipidiques à haute valeur ajoutée (bêta-carotène, oméga 3) ainsi que les possibilités d'extraction de lipides neutres par CO_2 supercritique sur une vingtaine de kilos d'algues sèches, démontrant ainsi la maturité de cette technologie face aux autres procédés (micro-ondes, agro-solvant). L'expertise technologique acquise par la DEN dans le domaine du CO_2 supercritique a d'ailleurs fait l'objet de cessions de brevets. En 2015, la start-up DFD est ainsi passée au stade industriel après une première vente de machine de « nettoyage CO_2 » de pièces mécaniques pour l'industrie.

(1) NetWork of Analytical Laboratories.

(2) Dunaliella salina, espèce de microalgue qui se développe spontanément et préférentiellement dans les milieux lagunaires très salés.

(3) Fusion for Energy. Organisme de l'Union européenne, en charge d'attribuer des marchés pour la contribution de l'Europe à ITER.

Découpe au laser de simulant du corium.

LES TECHNOLOGIES FRANÇAISES DU DÉMANTÈLEMENT SÉLECTIONNÉES POUR FUKUSHIMA

Au terme d'un premier appel d'offres international, une offre française portée par Onet Technologies et basée sur les technologies développées par le CEA a été sélectionnée pour une subvention du ministère japonais de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie (METI). Elle a porté sur l'étude et les essais en inactif de la découpe en air et sous eau des débris de combustibles fondus (le corium) des réacteurs accidentés de Fukushima-Daiichi.

Dans cette étude, le CEA a apporté son expertise sur le corium et sur le procédé de découpe laser téléopéré qu'il développe par ailleurs pour ses propres chantiers de démantèlement. Facilement pilotable à distance, il possède une grande tolérance de positionnement pour la découpe de couches hétérogènes de matériaux et génère moins d'aérosols que la plupart des autres techniques disponibles.

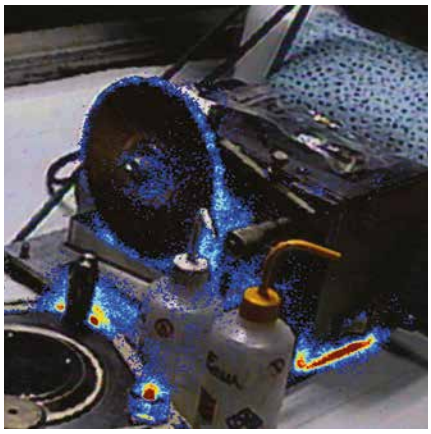
Cette première étude, remise en mars 2015, a été appréciée par les japonais. A l'issue d'un nouvel appel d'offres international, ils ont à nouveau retenu cette technologie mi-2015 pour des études et essais plus approfondis sur simulants plus réalistes, à mener en 2016 et 2017.

Cette étude fait d'ailleurs écho à la mise en œuvre réussie, fin 2015, de la découpe laser téléopérée par le système Maestro, pour le démantèlement des dissolveurs de l'usine de traitement de combustibles usés UP1 du site CEA de Marcoule.

VENTE D'UNE CAMPAGNE DE MESURES PAR ALPHA CAMÉRA SUR LE SITE DE SELLAFIELD

Sellafield Ltd a mis en place un projet destiné à identifier les technologies innovantes pouvant contribuer à mieux maîtriser les coûts des opérations de démantèlement de l'usine de traitement de combustibles usés THORP. Dans ce cadre, le système de mesure de caractérisation de contamination alpha développé par le CEA a été retenu en 2015 pour la réalisation d'une campagne expérimentale sur site mi-2016. Ce système a déjà été testé en actif, en particulier sur l'Atelier de technologie du plutonium (ATPu) à Cadarache. Ces essais à Sellafield lui donneront plus de visibilité en vue d'une industrialisation au bénéfice des chantiers de démantèlement du CEA.

Ce premier échange avec Sellafield Ltd a permis d'établir un contact en vue de la mise en place de projets communs dans le futur, comme par exemple une réponse conjointe dans le cadre du call Euratom H2020 pour le traitement thermique de déchets issus des opérations de démantèlement.



Localisation de décontamination alpha en boîte à gants sur l'installation Atalante à Marcoule.

Gamma caméra à base de scintillateur couplée avec une sonde de spectrométrie gamma compacte.

PARTENARIAT AVEC ENGIE SUR LA CARACTÉRISATION DES ÉTATS RADIOLOGIQUES

Laborelec, le centre de recherche et de compétences dans les technologies de l'électricité du groupe ENGIE, est en charge de la préparation du démantèlement des centrales belges de Doel et Tihange, et notamment de deux réacteurs de la centrale de Doel qui devaient être mis à l'arrêt définitif en 2015, avant que leur durée de vie ne soit prolongée de dix ans. En 2015, la DEN et Laborelec ont dans ce cadre conduit une collaboration dans le domaine de la caractérisation des états radiologiques initiaux des installations avant leur démantèlement, problématique qui représente un enjeu fort pour la construction des scénarios de démantèlement. La collaboration porte aussi sur le développement d'une gamma caméra (à base de scintillateur et couplage avec une sonde de spectrométrie gamma compacte) et de son instrumentation associée, développée sur la base d'un brevet DEN. Le partenariat se poursuivra en 2016, avec notamment le développement d'algorithmes pour affiner la localisation des sources gamma dans l'espace, en exploitant directement les données des images visibles réalisées.

CENTRES

La DEN déploie ses activités de recherche sur trois centres : Saclay, tourné plus particulièrement vers la recherche amont, la simulation, les matériaux et la chimie ; Cadarache, orienté vers la recherche sur les réacteurs et leurs combustibles ; et Marcoule, orienté vers la recherche sur le cycle du combustible, amont et aval.

Installation Atalante où sont entre autres menées les études sur les procédés de séparation pour l'américium.

MARCOULE : R&D POUR LE CYCLE DU COMBUSTIBLE ET CHANTIERS DE DÉMANTÈLEMENT

Fort de 60 ans de grandes premières au service de la filière nucléaire française, le site de Marcoule rassemble aujourd'hui les équipes et moyens de la DEN engagés dans les recherches sur le cycle du combustible nucléaire. Parallèlement, le centre assure le pilotage opérationnel de grands chantiers d'assainissement-démantèlement, à Marcoule et sur les centres nucléaires civils du CEA.

LA R&D POUR LE CYCLE DU COMBUSTIBLE

Au plan industriel, le centre de Marcoule a poursuivi les études engagées au profit d'AREVA pour l'optimisation du fonctionnement des usines du cycle du combustible, tant pour les unités industrielles de l'amont - usine de conversion Comurhex de Malvési principalement - que pour l'usine de traitement et de recyclage des combustibles usés de La Hague.

- **Nouveau procédé de dissolution** - En 2015 a été mis au point un nouveau procédé de dissolution et digestion de combustibles nucléaires particuliers, tant sur le plan de la modélisation du futur procédé que sur celui des expérimentations, avec par exemple la dissolution d'un lot de pastilles de combustible de réacteurs à neutrons rapides (RNR).
- **R&D MOX[1]** - Le processus de transfert de Cadarache vers Marcoule des activités de R&D menées sur les combustibles MOX a progressé, avec l'arrivée des premiers équipements et l'aménagement de nouveaux laboratoires en inactif. L'objectif prévisionnel de redémarrage de cette activité, fixé à 2017, permettra un rapprochement des équipes CEA concernées auprès de leur client final : l'usine Melox d'AREVA à Marcoule. Cette nouvelle thématique de R&D pour le centre sera aussi l'occasion de renforcer le panel d'expertise et de moyens de R&D au sein du laboratoire de haute activité Atalante.
- **Séparation de l'américium** - Dans le cadre des études financées par les pouvoirs publics au titre de la loi de 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs, les équipes de Marcoule ont poursuivi une expérience visant à démontrer, à l'échelle du laboratoire, la faisabilité de recycler l'américium extrait de combustibles usés. La réalisation d'un essai d'extraction dit « intégral » grâce au procédé EXAm, développé par le CEA, a ainsi permis de récupérer plusieurs grammes d'américium purifié, à partir de combustibles usés provenant du parc EDF. La récupération de ce radioélément devra ensuite conduire à l'élaboration de pastilles de combustible chargées en actinides mineurs, et à leur irradiation ultérieure dans un réacteur à flux rapide en vue de démontrer leur capacité à être transmutées.
- **Vitrification des déchets radioactifs** - Outre le soutien apporté aux campagnes de vitrification en creuset froid de combustibles de type uranium-molybdène, réalisées en usine, les experts du laboratoire commun de vitrification CEA-AREVA de Marcoule ont réalisé plusieurs essais du procédé d'incinération-vitrification « Pivic », destiné au traitement de déchets technologiques mixtes (déchets métalliques et organiques), pour les usines Melox et de La Hague. Le centre a aussi poursuivi ses actions de R&D sur le comportement à long terme des colis de déchets prévus pour rejoindre le stockage géologique Cigéo de l'Andra, avec en particulier une étude lancée, en actif, sur l'altération de verre industriel destiné au stockage profond.

Creuset, chauffé par induction, dans lequel les déchets seront incorporés à du verre en fusion.

(1) Mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium.

Opérateur aux commandes du bras maître (à droite)
pour déplacer le bras robotisé Maestro (à gauche) dans la cellule de l'APM.

LES CHANTIERS DE DÉMANTÈLEMENT

En matière d'assainissement-démantèlement, les chantiers engagés à Marcoule ont connu des avancées notables. L'enjeu principal reste la réduction du terme source mobilisable présent dans les installations, comme rappelé par les autorités de sûreté (ASN et ASND) lors de leur visite conjointe sur le centre en septembre.

- **Les débuts du bras robotisé Maestro** - 2015 a été une année marquante avec la mise en service en actif, dans les installations de Marcoule, de deux premiers exemplaires du bras robot Maestro, fruit d'un codéveloppement de plus de dix ans entre le CEA et la société Cybernetix. Ce système téléopéré polyvalent et robuste permettra une fiabilisation des chantiers en haute activité. Ainsi, tandis qu'à l'Atelier Pilote de Marcoule (APM) les opérations de démantèlement par découpe mécanique d'équipements ont débuté sur une cellule de haute activité, à l'usine de traitement des combustibles usés UP1 c'est un chantier complexe de découpe de cuves de dissolveurs (zone dite « MAR 200 ») qui a pu être engagé. L'utilisation du bras robotisé Maestro est associée à celle d'un procédé de découpe par laser, développé par le CEA.
- **Désentreposage** - Le désentreposage de déchets anciens reste un enjeu fort pour le centre. Les opérations se sont poursuivies sur les différentes installations concernées dans et autour de l'usine UP1. L'année a notamment été marquée par l'implantation d'un procédé de cimentation dans l'ancienne installation de dégainage des combustibles, permettant d'entamer le pompage et la cimentation de boues présentes en fond de fosses.
- **« Premier béton » pour Diadem** - Au printemps a été coulé le « premier béton » de la future installation d'entreposage Diadem, dédiée à l'accueil temporaire de déchets irradiants issus des chantiers d'assainissement-démantèlement du CEA, avant leur expédition vers les centres de l'Andra.
- **Un procédé de décontamination du césium** - Dans le cadre de la R&D mise en place pour optimiser les procédés d'assainissement-démantèlement, les recherches menées à Marcoule ont permis la réalisation d'un pilote de décontamination par mousse de flottation pour le traitement de terres contaminées en césium. Un procédé susceptible d'application, au Japon, pour la remédiation des terres contaminées de la région de Fukushima.

ZOOM

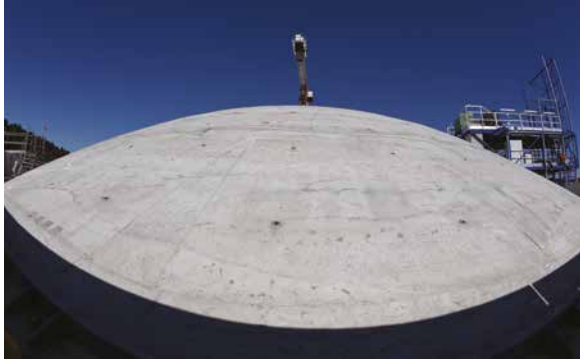
LA CONSTRUCTION DE L'INSTALLATION NOAH

Dans le cadre du projet de démantèlement de la centrale Phénix, et plus particulièrement du traitement du sodium liquide contenu dans les circuits primaire et secondaire de ce réacteur à neutrons rapides mis à l'arrêt définitif en 2009, le CEA Marcoule a engagé la construction d'une installation dédiée, baptisée NOAH. Celle-ci permettra la transformation du sodium liquide (principalement 1 500 tonnes issues de Phénix ainsi que quelques lots de sodium de volume très limité provenant d'autres centres CEA) en soude, avant neutralisation. Le chantier de construction, marqué à l'été par le coulage du radier, s'est poursuivi avec les premières élévations de voiles à partir de l'automne.

60 ans MARCOULE

MARCOULE : 60 ANS D'ESPRIT PIONNIER

L'année 2015 a été marquée par l'anniversaire des 60 ans du centre, célébré au mois d'octobre. Outre une cérémonie pour l'ensemble des personnels en présence de la Direction générale du CEA, les installations du centre ont ouvert leurs portes aux familles des salariés, le temps d'un week-end. Près de 4 000 personnes ont ainsi pu parcourir la vingtaine de points de visite proposés : anciens réacteurs ou laboratoires les plus récents. Un livre commémoratif composé de 60 portraits de salariés a également été édité, permettant de mettre en avant les activités du centre à travers quelques-uns des visages de celles et ceux qui les font avancer.



Dôme bétonné du bâtiment réacteur du RJH.

Vue aérienne du site de Cadarache.

CADARACHE : RECHERCHES SUR LES RÉACTEURS ET LES COMBUSTIBLES

Cadarache est le centre de recherche majeur en Europe sur les énergies bas carbone : fission et fusion nucléaire, solaire et biocarburants.
Le site dispose de compétences humaines importantes, d'une panoplie d'outils de recherche idéale avec trois réacteurs nucléaires de recherche et des plateformes technologiques sans équivalent dans le monde.

RÉACTEURS

- **Construction du réacteur expérimental RJH**
  Le réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH) est actuellement en construction sur le site de Cadarache. L'année 2015 a été marquée par la réussite de la coulée, en une seule phase et en 20 heures, de 730 m³ de béton auto-plaçant pour « habiller » le dôme du bâtiment réacteur. Le génie civil a atteint les 85 % de réalisation et les fabrications des équipements mécaniques en usine sont bien enclenchées. Les différents lots de construction et d'équipements du réacteur sont en majorité en phase de réalisation ou livrés. L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), qui a mené plus de 20 inspections sur le chantier depuis 2009, a régulièrement noté la bonne tenue du chantier.

- **Divergence du réacteur expérimental Cabri en configuration boucle à eau pressurisée**
  Le réacteur de recherche Cabri, en modification depuis 2003, a divergé pour la première fois dans cette nouvelle configuration boucle à eau pressurisée, représentative des réacteurs à eau sous pression (REP) du parc actuel. Les essais de mise en service s'étaleront jusqu'en 2017, date prévue pour le premier essai. Cabri permet de réaliser des études sur le comportement du combustible en situation accidentelle. L'installation a été modifiée au service de l'IRSN, dans le cadre du programme international CIP (Cabri International Program).

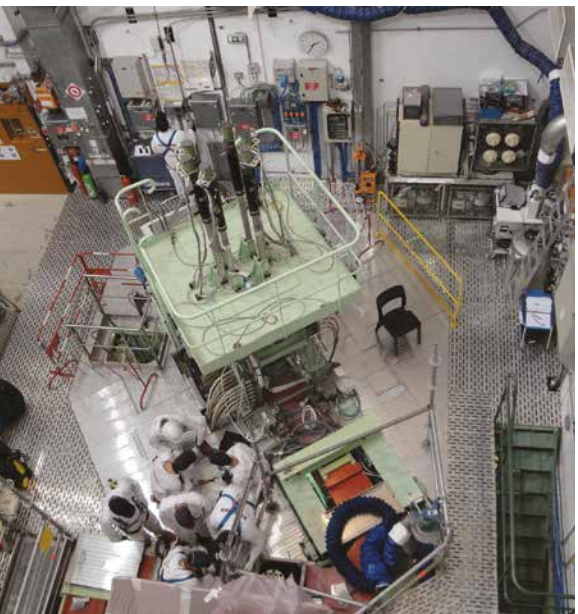
SIMULATION

La simulation numérique est un outil essentiel pour le développement des réacteurs et de leurs combustibles associés. C'est dans ce contexte que des codes et schémas de calcul sont développés par les équipes de Cadarache. Zoom sur quelques résultats de 2015.

- **Livraison du formulaire de calcul NARVAL 2 à AREVA TA**
  NARVAL est le formulaire de calcul neutronique pour les études de conception des cœurs de propulsion nucléaire. Lors de la livraison, la Direction des applications militaires du CEA, le service technique mixte des chaufferies nucléaires de propulsion navale et AREVA TA ont exprimé leur satisfaction pour le choix des méthodes retenues et des potentialités de ce code.

- **Livraison du code OSCAR à EDF**
  La nouvelle version V1.3 du code OSCAR 1, destiné à étudier la contamination dans les circuits des REP, a été livrée aux partenaires industriels EDF et AREVA. La maîtrise de la contamination représente de forts enjeux industriels en termes de réduction de la dosimétrie durant les arrêts de tranche et d'augmentation de la disponibilité des réacteurs.

- **Développement de l'application GERMINAL pour les réacteurs à neutrons rapides**
  Le plan de développement pluriannuel de la version 2 de l'application GERMINAL, dédiée à la simulation du comportement du combustible et des absorbants de la filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), a été établi jusqu'à 2024. L'application de la plateforme logicielle PLEIADES dont GERMINAL est l'un des codes pour la filière RNR, participe activement aux études de conception d'Astrid.



Hall de Cabri, avec vue sur la plateforme de pilotage des barres de commande (partie verte).

Plateforme d'essais en soutien à la R&D d'Astrid.

SYSTÈMES NUCLÉAIRES DU FUTUR

Le centre de Cadarache joue un rôle majeur dans les études sur les systèmes nucléaires du futur et en particulier dans le développement du démonstrateur technologique de RNR-Na Astrid. Une grande partie des moyens d'essais destinés à la qualification des options de ce réacteur sont mis en œuvre sur le site de Cadarache. Des essais ont ainsi été menés en 2015 sur les plateformes d'essais en sodium et en eau, utilisé comme fluide simulant. On peut notamment citer une première campagne d'essais d'injection de sodium dans l'eau en milieu ouvert, réalisée en soutien aux études de sûreté d'Astrid, avec un nouveau dispositif d'interaction sodium-eau. Les phénomènes complexes en jeu sont caractérisés à l'aide d'une instrumentation spécifique très fine intégrant un dispositif de visualisation ultra-rapide.

SOUTIEN AUX PARTENAIRES INDUSTRIELS

Le centre de Cadarache joue un rôle important dans la R&D en soutien au parc industriel actuel, en particulier dans les domaines des combustibles et de la sûreté nucléaire.

- **Comportement du combustible**
  Une avancée technique inédite pour la compréhension du comportement du combustible est le développement d'un dispositif expérimental original mesurant directement les fluctuations de pression dans une maquette d'assemblage combustible REP. Les données recueillies apportent une avancée importante pour la compréhension des vibrations induites par le fluide en écoulement, enjeu important pour les REP.

- **Impact des situations accidentelles sur le comportement du combustible**
  Le premier essai pour analyser le comportement thermique et mécanique du combustible nucléaire irradié lors d'un transitoire accidentel a été réalisé dans l'installation Mexiico, implantée dans le laboratoire chaud LECA de la DEN à Cadarache. Cet essai a été mené dans le cadre du programme international Nuclear Fuel Industry Research (NFIR), piloté par l'Electric Power Research Institute (EPRI) pour le compte d'un regroupement d'industriels et de laboratoires.

ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT

Le centre de Cadarache met en œuvre à la demande de l'Andra des compétences et des moyens expérimentaux pour la caractérisation des colis de déchets, afin de vérifier qu'ils sont conformes aux spécifications des exutoires. Dans ce cadre, une nouvelle installation, la cellule blindée CADECOL, est opérationnelle depuis 2015. Cette nouvelle installation de l'INB 156 peut répondre dorénavant, par ses capacités d'expertise et de reconditionnement, aux besoins des supercontrôles de colis de déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) de l'Andra.

Par ailleurs, le système de drainage mis en place sous le Laboratoire d'études et de fabrications expérimentales de combustibles avancés (LEFCA) du site pour prévenir le risque de liquéfaction des sols en cas de séisme est opérationnel et, conformément à la décision de l'ASN, le dossier a été mis à disposition du public en novembre 2015. En effet, cette installation avait fait l'objet en 2003 d'une réévaluation de sûreté, qui a conclu à la poursuite de l'exploitation sous réserve de la mise en œuvre d'un programme de rénovations, intégrant notamment le risque liquéfaction des sols.

RENCONTRES DES SAVOIRS

2015 a vu l'organisation de nombreuses manifestations sur des thèmes très variés : accidents graves, irradiation de matériaux, données nucléaires, instrumentation, ou encore médecine nucléaire et cybersécurité.

Le nouvel accord avec l'université d'Aix-Marseille a été signé. Il se concrétise par un grand nombre de structures, de partenariats, de programmes de recherche, de formations, d'événements scientifiques communs, dans de nombreuses disciplines. S'y ajoutent les synergies avec le CNRS, les écoles d'ingénieurs et autres organismes de recherche.

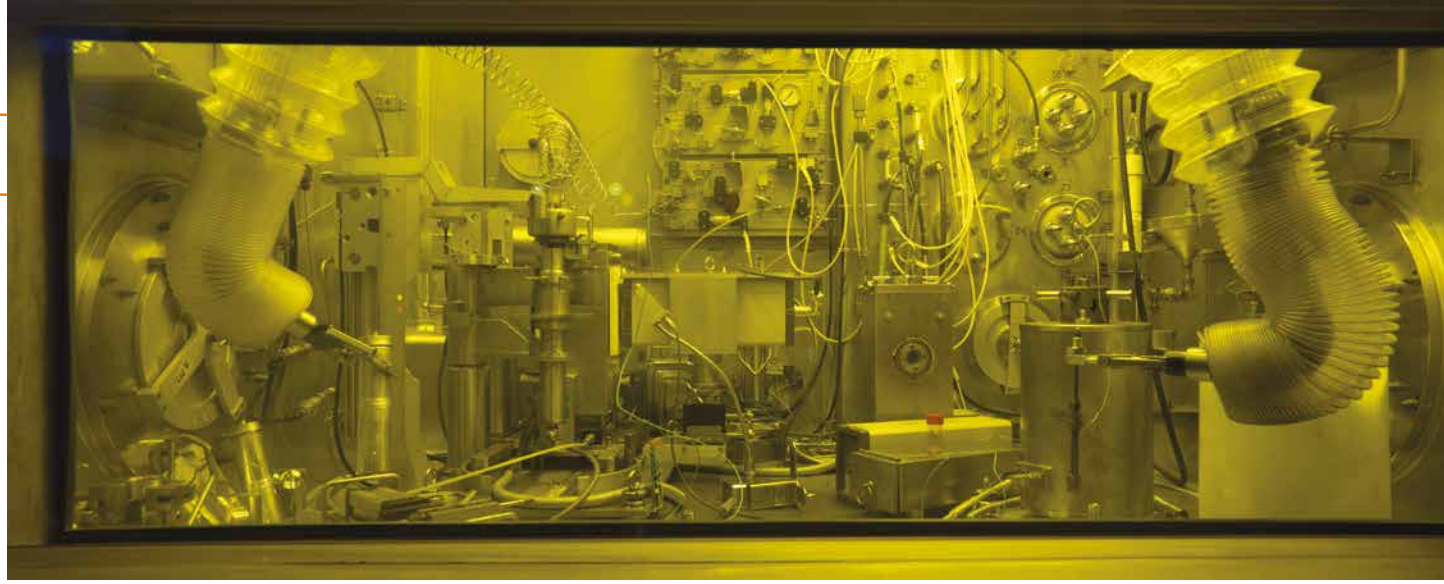
Cadarache a fêté les 20 ans de « Cadarache Jeunes », opération d'accueil sur le centre, qui s'adresse habituellement aux collégiens de la Région. Pour l'occasion ce sont leurs enseignants et encadrants qui ont été accueillis.

Pour le grand public, Cadarache a mis en place un nouveau dispositif pour les visiteurs isolés qui sont ainsi venus s'ajouter au plus de 10 000 visiteurs groupés annuels, dont de nombreux scolaires. Cadarache a également organisé la fête de la science à Sainte-Tulle (04) avec un grand succès auprès des jeunes. Pour compléter ces rencontres, une journée portes ouvertes a permis d'accueillir 2 500 proches des salariés.

Cadarache a aussi été représenté dans plus de 40 réunions avec la Commission locale d'information.

ÉTUDE DES ACCIDENTS GRAVES

Dans le cadre des études menées à Cadarache sur les accidents graves, la formation d'un lit de débris lors d'une interaction corium-eau a été suivie par imageries X, ce qui constitue une première mondiale. Par ailleurs, le 5e essai du programme Verdon a été réalisé dans le cadre du programme international terme source (ISTP) et avec EDF, ENGIE, US-NRC, JAEA et l'IRSN. L'objectif est d'étudier le comportement des produits de fission présents dans le combustible d'un REP et « libérables » lors d'un accident allant jusqu'à la fusion du cœur.



Le Léci où ont été menés les examens sur le matériau de gainage de référence envisagé pour le démonstrateur Astrid.

SACLAY : LES SCIENCES DU NUCLÉAIRE ET LA SIMULATION POUR LES RÉACTEURS ET LE CYCLE DU COMBUSTIBLE

Les activités scientifiques de la Direction des activités nucléaires de Saclay couvrent trois thématiques : la simulation, les matériaux et la chimie.

SIMULATION POUR LES RÉACTEURS

La version 1.2 d'Apollo3®, le nouveau code de neutronique multi-filières développé par la DEN, a été distribué aux partenaires industriels AREVA et EDF fin décembre 2015. L'objectif d'Apollo3® est de reproduire de manière extrêmement fine les phénomènes se manifestant aussi bien dans les assemblages de combustible des réacteurs à neutrons thermiques (REP), que dans ceux des réacteurs à neutrons rapides (RNR). Il permet l'établissement de schémas de calcul novateurs sur l'ensemble des échelles « cellule, assemblage, cœur », avec une amélioration significative du compromis précision/temps de calcul. L'attendu principal est un calcul de cœur en une seule étape contre deux aujourd'hui. Une première phase a été franchie en 2015 avec le calcul du cœur d'Astrid, démonstrateur de RNR refroidi au sodium et d'un cœur REP 3D avec une modélisation avancée du réflecteur.

R&D POUR LES RÉACTEURS DE 2e ET 3e GÉNÉRATIONS

Début 2015, ont été menées pour la première fois, sur la ligne de lumière Mars du synchrotron Soleil, des expériences sur des échantillons de matériaux de cœur des REP (gaine de combustible base zirconium et aciers inoxydables de structures d'internes de cuve) très fortement irradiés en réacteur. Elles ont permis d'améliorer la compréhension des effets d'irradiation sur la microstructure des matériaux analysés.

R&D POUR LES RÉACTEURS DE 4e GÉNÉRATION

Des tronçons de gainage en acier 15-15 Ti (matériau de gainage de référence envisagé pour le démonstrateur Astrid) irradiés dans le réacteur Phénix à Marcoule ont été réceptionnés en avril 2015 au Léci[1] afin de caractériser leur comportement après irradiation. Les examens réalisés ont consisté en des mesures de densité, des essais mécaniques (traction, fluage), ainsi qu'en des observations microstructurales. Les résultats ont notamment servi à alimenter le dossier de synthèse des études d'avant-projet sommaire du projet Astrid, pour ce qui relève des matériaux de gainage.

ZOOM

LA MISE À L'ARRÊT DÉFINITIF DU RÉACTEUR OSIRIS

Le 16 décembre 2015, le réacteur de recherche expérimental Osiris a été définitivement mis à l'arrêt. Cet outil a permis pendant près de 50 ans de participer à l'étude des matériaux et combustibles des centrales nucléaires actuelles et futures, mais également de produire des radioéléments en vue d'applications médicales et industrielles. Une mission accomplie avec succès par les équipes du réacteur expérimental jusqu'à cette dernière étape.

Les équipes d'Osiris rassemblées dans l'enceinte du réacteur.

(1) Le Léci est un laboratoire chaud, situé à Saclay, essentiellement dédié à la caractérisation des matériaux irradiés.

(2) Milieu pauvre en oxygène.

(3) Grand équipement national de calcul intensif.

(4) Partnership for Advanced Computer in Europe.

R&D POUR L'AVAL DU CYCLE

Les matériaux des équipements de l'usine de La Hague (aciers inoxydables, zirconium, titane…) nécessitent une vigilance permanente vis-à-vis de leur tenue en milieu acide nitrique chaud et concentré. Le suivi du vieillissement de ces matériaux et la prédiction de la durée de fonctionnement de ces équipements, particulièrement complexes notamment dans les zones très irradiantes, seraient facilités par une meilleure connaissance des mécanismes de dégradation et leur modélisation. Une avancée significative a été obtenue en 2015 pour les alliages de zirconium. Un lien entre propriétés de surface et réactivité de celle-ci a été établi en couplant l'analyse des spectres des mesures de spectroscopie d'impédance électrochimique et des analyses de surface par spectroscopie de photoélectrons X. L'objectif est aujourd'hui d'étendre cette démarche aux autres matériaux utilisés dans l'usine. Cette compréhension des mécanismes de corrosion permettra de mieux prédire la durée de vie des équipements, et à terme, de suggérer des pistes d'optimisation des matériaux utilisés.

R&D POUR LE STOCKAGE

Les équipes de la DEN à Saclay ont conduit une expérience ayant pour but de quantifier les vitesses de corrosion d'aciers faiblement alliés au contact de l'argilite du futur centre industriel de stockage géologique (Cigéo), et d'identifier les produits de corrosion issus de cette réaction. Cette expérience a été menée à son terme avec succès puisqu'après six ans de corrosion à 90°C en milieu anoxique[2], les derniers échantillons ont été récupérés, et les interfaces de corrosion caractérisées à l'échelle micrométrique. Les résultats obtenus confirment la vitesse de corrosion réduite des aciers en contact compact avec des argilites, dans des conditions de température pertinentes pour le stockage de déchets nucléaires de haute activité.

MOYENS EXPÉRIMENTAUX

- Le 17 décembre 2015, le hall destiné à accueillir à Saclay les activités d'expérimentations analytiques, dédiées aux études de thermohydraulique pour la R&D nucléaire, a été inauguré. À l'horizon 2017, sera réuni sur Saclay l'ensemble des moyens analytiques en thermohydraulique et mécanique des fluides, permettant de simuler le comportement des systèmes nucléaires, en situations normales, incidentelles ou accidentelles.
- Le 14 septembre 2015, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a attribué, pour la première fois, son nouveau label ICERR (International Centre based on Research Reactors) aux centres de Saclay et Cadarache. Les outils expérimentaux de la DEN - réacteurs de recherche (RJH, Eole, Minerve, Isis, Orphée) et laboratoires chauds (Léci et Leca-Star) - seront proposés à des institutions des États membres de l'AIEA pour l'éducation, la formation de terrain et le développement conjoint de projets de R&D, sur la période 2015-2020.

Moyens d'essais de thermohydraulique : en haut une boucle dédiée à la validation du code de calcul Cathare, et en bas une boucle permettant la création d'un vortex d'entraînement de gaz pour l'étude des futurs réacteurs à neutrons rapides.

RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE

Alors que le titane et le zirconium partagent de nombreux points communs, les chercheurs de la DEN, du CNRS et de l'Université Claude Bernard Lyon 1 ont démontré que la déformation plastique de ces deux métaux se développe différemment. Il est pourtant communément admis qu'ils devraient réagir de façon semblable aux contraintes mécaniques. En couplant l'expérimentation par microscopie et la modélisation, et grâce aux grands moyens de calcul de Genci[3] et de Prace[4], les chercheurs ont découvert deux mouvements de dislocation différents dans ces matériaux. Leur but est désormais d'étudier différents alliages innovants pour en évaluer les caractéristiques de façon prédictive. Ces résultats ont été publiés dans la revue *Nature Materials* le 20 août 2015.

ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT À FONTENAY-AUX-ROSES

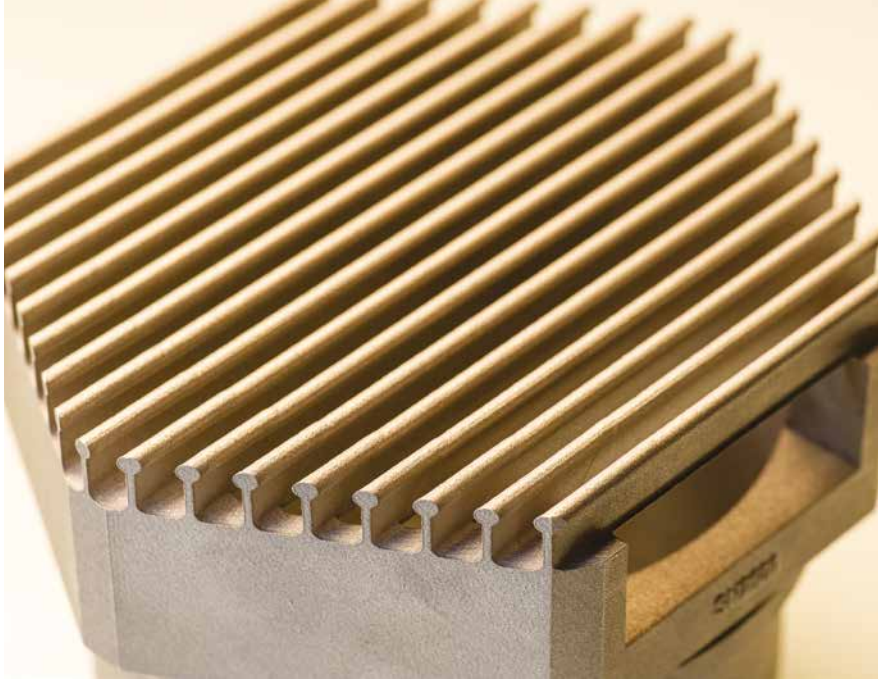
La dépose de la première enceinte de la chaîne blindée Antinea, constituée de cinq enceintes de confinement alpha, a eu lieu en mars 2015. Afin de poursuivre les opérations, les quatre autres enceintes ont été transférées en entreposage dans un local spécifique. Elles sont maintenant en attente d'autorisation à la découpe. Le démantèlement de la chaîne s'est terminé fin octobre 2015 par le traitement des châssis.

Par ailleurs, les opérations de traitement puis d'évacuation, d'une part des déchets produits par les chantiers d'assainissement et de démantèlement, et d'autre part des déchets historiques entreposés dans divers bâtiments, se sont poursuivies à un rythme soutenu dans l'objectif de diminuer le terme source présent dans les deux INB du site. Par exemple, 850 fûts de déchets de faible et moyenne activités de 200 litres ont été évacués du bâtiment 91 vers le centre de stockage de l'Aube de l'Andra sur la période 2013-2015.

Entreposage de fûts de déchets au sein du bâtiment 91 sur le site CEA de Fontenay-aux-Roses.

ACCOMPAGNEMENT DES PROGRAMMES ET RELATIONS EXTÉRIEURES

La DEN a mis en place une organisation intervenant en soutien à ses programmes : Programme transversal matériaux avancés, Direction scientifique, Cellule relations internationales, Direction de la qualité et de l'environnement, Institut de technico-économie des systèmes énergétiques. Toutes ces unités concourent à la réussite et à la visibilité des travaux de la DEN.



Démonstration de faisabilité géométrique d'une pièce complexe intéressant l'industrie nucléaire par fabrication additive.

PROGRAMME TRANSVERSAL MATÉRIAUX AVANCÉS

Le programme transversal matériaux avancés a conduit, au cours de l'année 2015, un certain nombre d'actions de mise en visibilité, de représentation extérieure du CEA, de réflexion stratégique et de coordination.

PLANS DE DÉVELOPPEMENT

Depuis 2015, le programme transversal matériaux avancés a structuré son activité autour de trois grandes priorités.

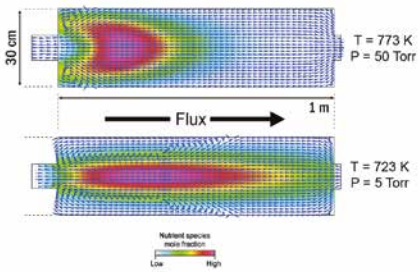
- **Le génie des procédés d'élaboration et d'intégration des matériaux.** Parce qu'elle détermine leur structure et leurs propriétés, l'ingénierie des matériaux constitue le premier pilier du programme et recouvre le développement de procédés robustes, la révision des procédés « conventionnels », l'évaluation de procédés émergents et l'invention de nouveaux procédés dans le domaine des nanomatériaux ou du recyclage des métaux stratégiques.
- **Le développement de nouveaux matériaux sur mesure :** matériaux architecturés multifonctionnels, matériaux auto-réparants, bio-inspiration des matériaux, intégration de fonctions directement dans les matériaux (capteurs…), numérique au service du design, techniques de criblage haut débit sont autant d'enjeux face à la complexité croissante des cahiers des charges fonctionnels.
- **La science du vieillissement, la durabilité et le cycle de vie des matériaux et des ressources.** Les matériaux et composants fonctionnant dans des environnements parfois hostiles, il est nécessaire d'adresser la durabilité des matériaux, dans sa globalité, avec des études sur la prédiction du comportement, la caractérisation en opération et la caractérisation aux échelles de la simulation.

PREMIÈRE FORMATION EN LIGNE FRANÇAISE SUR LA FABRICATION ADDITIVE

La fabrication additive est au carrefour du numérique et de la science des matériaux. Cette technologie permet une réduction significative de la matière consommée et est peu énergivore. De plus, elle permet de réaliser d'un tenant, sur toute une gamme de matériaux (plastiques, métaux, alliages, céramiques), des pièces aux géométries complexes, difficilement accessibles par les méthodes traditionnelles telles que le moulage ou l'usinage. En partenariat avec la PME 3D4Pro, Supmeca et Alstom, le CEA a contribué en 2015 à la mise en place du premier MOOC[1] en français sur la fabrication additive. Il s'agit d'un parcours d'information web gratuit et libre d'accès sur les technologies, les usages industriels et les enjeux de la fabrication additive.

INNOVATION DANS LE DOMAINE DES DÉPÔTS CHIMIQUES EN PHASE VAPEUR

En partenariat avec le CIRIMAT[2] de Toulouse et le Labex CEMAM[3] de Grenoble, le CEA a déposé un brevet sur le procédé de DLI-MOCVD (Direct Liquid Injection Metal Organic Chemical Vapor Deposition) en cycle fermé avec recyclage du précurseur organométallique[4]. Ce brevet porte sur la possibilité de recycler le précurseur en mode continu après utilisation dans le réacteur de dépôt. Le procédé a pu être modélisé dans le cadre d'une thèse, rendant ainsi possible la conception d'un réacteur de grandes dimensions. Afin de poursuivre le développement de ce procédé prometteur, le CEA a mis en place un second projet avec le CIRIMAT et une PME innovante, DEPHIS. Il s'agit de réaliser un réacteur pilote pour poursuivre la démonstration de l'intérêt du procédé pour les applications nucléaires, et évaluer le potentiel de valorisation dans d'autres secteurs industriels (aéronautique, mécanique…).



Apport de la simulation numérique pour l'optimisation de l'homogénéité de dépôt dans un réacteur pilote de DLI-MOCVD.

(1) Massive Open Online Course.

(2) Centre inter-universitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux.

(3) The Centre of Excellence of Multifunctional Architectured Materials.

(4) Molécules organiques contenant des atomes métalliques, qui, par thermolyse, donnent naissance à des carbures, des nitrures ou carbonitrures.

R&D sur les systèmes d'échange de chaleur compacts sodium-gaz pour la conversion d'énergie.

Conseil scientifique de la DEN.

LA VIE SCIENTIFIQUE À LA DEN

La Direction scientifique a pour responsabilité la stratégie scientifique globale de la DEN. Ses missions premières se déclinent en six axes : relations avec le Haut-commissaire à l'énergie atomique, promotion de l'expertise scientifique et technique de la DEN, organisation de l'évaluation de l'ensemble des unités de la direction, identification des grands défis scientifiques à relever, promotion de la production scientifique de la DEN et liaison avec le monde universitaire.

L'ÉVALUATION SCIENTIFIQUE

LE CONSEIL SCIENTIFIQUE DU CEA

Le Conseil scientifique du CEA a examiné les 30 novembre et 1er décembre 2015 les recherches de l'établissement relatives au calcul haute performance, à la simulation et à l'analyse de données. La DEN a contribué à cet exercice au travers de trois présentations (stratégie de simulation, architecture logicielle, focus sur la neutronique) et quatre posters.

LE CONSEIL SCIENTIFIQUE DE LA DEN

Du 19 au 21 octobre 2015, le Conseil scientifique de la DEN a évalué les recherches portant sur l'option du système de conversion par turbine à gaz pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na). Cette évaluation a conduit :

- à recommander d'approfondir les implications techniques et économiques de ce choix ;
- à cerner au mieux l'ensemble des risques liés à l'échangeur sodium-gaz en termes de fabrication, fiabilité, planning de développement jusqu'à la qualification ;
- à maintenir un volet d'études suffisant sur le système de conversion eau-vapeur, pour en faire une réelle option de repli.

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES

LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE

En 2015, les chercheurs de la DEN ont produit 517 publications scientifiques dans des revues à comité de lecture, dont 120 copubliées avec d'autres laboratoires de recherche internationaux.

LES THÈSES, POST-DOCS ET HDR

En 2015, une recherche particulièrement active de cofinancements a permis d'accroître sensiblement le nombre de nouveaux entrants en thèse (92) par rapport à 2014 (+11 %). Par ailleurs, la DEN poursuit sa politique d'encouragement à passer des habilitations à diriger des recherches (HDR). Neuf nouvelles HDR ont ainsi été obtenues en 2015, ce qui porte à 113 le nombre total de chercheurs habilités à la DEN, auxquels il faut ajouter 19 Docteurs d'Etat.

LA FORMATION NUCLÉAIRE DE BASE

Cette formation permet à tout nouvel arrivant d'acquérir les connaissances scientifiques et techniques transverses et offre aux chercheurs et ingénieurs une culture nucléaire générale de base sur l'ensemble des thématiques de recherche développées au sein de la DEN. En 2015, le niveau 2 de cette formation a été dispensée à Saclay à 28 participants ayant déjà suivi le niveau 1.

ZOOM

LA CRÉATION D'UNE REVUE SCIENTIFIQUE NUCLÉAIRE EN LIGNE

La DEN a créé en 2015 la revue scientifique en ligne *EPJ N - Nuclear Sciences and Technologies* (affiliée à l'*European Physical Journal*) avec l'appui de la Société française de l'énergie nucléaire (SFEN) et de l'éditeur EDP Sciences. Cette revue est déjà référencée dans le *Web of Science*.

(1) Cet effet contribue à assurer la stabilité d'un réacteur nucléaire, en diminuant la réactivité de son cœur lors d'une élévation de sa température.

L'EXPERTISE À LA DEN

LA FILIÈRE EXPERTS

Depuis 2009, le CEA a mis en place une filière d'expertise afin de mettre en visibilité ses scientifiques de haut niveau. La DEN compte aujourd'hui 72 experts de niveau 4 (directeurs de recherche et experts internationaux) et 274 experts seniors. Ces experts sont des référents scientifiques dans leur domaine. Ils sont sollicités en tant que de besoin pour répondre à des demandes spécifiques émanant de la hiérarchie et contribuent au rayonnement de la DEN à l'extérieur du CEA.

Réalisation d'expériences pour étudier l'interaction du corium avec le béton.

LA VEILLE TECHNOLOGIQUE

Les actions de veille documentaire se sont poursuivies pour constituer une base de données sur les thèmes suivants : technologie des réacteurs à eau, chimie de l'extraction, chimie analytique, aciers sous irradiation, décontamination, traitement à haute température, traitement d'effluents, technologie des RNR-Na, sûreté des réacteurs et des piscines et simulation numérique appliquée à la neutronique.

LES SÉMINAIRES SCIENTIFIQUES

Afin de guider les orientations futures en matière de recherche, la Direction scientifique organise régulièrement des séminaires pour instruire des questions scientifiques importantes pour la DEN et sa stratégie de recherche. En 2015, six thématiques ont été traitées :

- la compréhension de la sélectivité en chimie séparative ;
- les spécifications du combustible MOX pour les premiers cœurs d'Astrid, démonstrateur de RNR-Na ;
- les potentialités des microsystèmes pour la recherche sur l'aval du cycle du combustible nucléaire ;
- les spécifications et technologies envisageables pour renforcer la résistance aux accidents des combustibles des réacteurs à eau sous pression (REP) ;
- la conception du récupérateur de corium pour Astrid ;
- le concept de cœur à effet Doppler[1] renforcé.

PARTICIPATION À L'ANCRE

La DEN participe activement aux travaux de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (Ancre), notamment à travers l'animation du groupe « Energies nucléaires » par la Direction scientifique. L'année 2015, marquée par l'organisation à Paris de la 21e Conférence des Parties (COP) à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, a conduit l'Ancre à mener en propre une étude sur les « leviers de la décarbonation » dans le cadre d'un projet international visant à élaborer des trajectoires de décarbonation nationales compatibles avec l'objectif des 2°C de réchauffement global maximum à l'horizon 2050. Le groupe a par ailleurs fait réaliser une étude prospective des besoins de chaleur de l'industrie française situés à moins de 100 km des centres de production nucléaire et susceptibles d'être couverts par cogénération. Elle ouvre des perspectives *a priori* intéressantes, dont il convient de confirmer la viabilité économique.

Quatre autres séminaires scientifiques ont été organisés dans le cadre de l'institut tripartite CEA/EDF/AREVA dans les domaines suivants :

- le vieillissement des aciers dans les REP ;
- les combustibles REP à robustesse accrue en cas d'accident ;
- la maîtrise du corium en cuve ou hors cuve en cas d'accident grave ;
- la révision du référentiel de sûreté pour l'analyse des accidents de perte de réfrigérant primaire.

Chimie séparative par hydrométallurgie au service du recyclage des métaux stratégiques.

MISSIONS À L'INITIATIVE DU HAUT-COMMISSAIRE À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Dans le cadre d'une mission commanditée par le Haut-commissaire à l'énergie atomique, plusieurs experts ont contribué en 2015 à une analyse des codes de neutronique et de thermohydraulique développés par la DEN. Les orientations qui s'en dégagent appellent à renforcer la place du numérique et la maîtrise des incertitudes dans ces codes, ainsi que l'utilisation des calculs de dynamique des fluides pour simuler numériquement la thermohydraulique des réacteurs.

ENSEIGNEMENTS ET FORMATIONS NUCLÉAIRES

La DEN transmet les connaissances et savoir-faire qu'elle a développés en apportant une contribution forte à l'enseignement du nucléaire et des technologies associées, essentiellement en France mais également dans des formations de portée internationale. Cette contribution se concentre prioritairement sur des formations stratégiques dispensées par une quinzaine d'établissements d'enseignement supérieur de l'Université Paris-Saclay et plus largement d'Île-de-France, des académies de Montpellier, Grenoble et Aix-Marseille, et du Grand-Ouest. Elle a impliqué en 2015 près de 500 salariés de la DEN qui ont dispensé près de 10 000 heures de formation, en majorité pour le compte de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) : trois quarts sur des formations diplômantes et un quart dans le cadre de la formation continue. L'année 2015 aura été marquée par l'ouverture des masters de l'Université Paris-Saclay, et par le tutorat et l'accueil en stage de fin d'études à la DEN de cinq étudiants de la première promotion de l'Institut franco-chinois de l'énergie nucléaire (IFCEN).

Visite de la plateforme expérimentale Tamaris à Saclay par une délégation chinoise.

LA DEN À L'INTERNATIONAL

La DEN coopère avec la plupart des grands pays nucléaires. Les enjeux de cette coopération peuvent être régaliens, lorsqu'il s'agit de répondre à la demande de l'Etat, qui peut encourager la mise en place d'un partenariat stratégique, avec volet nucléaire, avec d'autres pays ; scientifiques ou techniques, lorsqu'il s'agit de mettre en place des coopérations à l'étranger avec des compétences complémentaires à celles de la DEN ; économiques, lorsque la DEN se positionne en offre de services vis-à-vis des industriels étrangers, ou cherche des participations étrangères à ses investissements en infrastructures de recherche.

Les coopérations sont particulièrement dynamiques autour des réacteurs à neutrons rapides de 4e génération refroidis au sodium (RNR-Na), des grandes infrastructures de R&D et du démantèlement et de l'assainissement, avec le travail effectué et à faire sur la centrale de Fukushima-Daiichi.

CHINE

La coopération avec la Chine s'articule autour de laboratoires associés. Trois sujets font l'objet d'une coopération dynamique : les RNR-Na, la Chine étant également engagée dans des projets dans cette filière, le vieillissement des matériaux et la sûreté des réacteurs à eau sous pression (risque hydrogène). Cette coopération va s'intensifier dans le domaine de l'aval du cycle avec la perspective de la vente par AREVA à la Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) d'une usine de traitement-recyclage du combustible usé.

ÉTATS-UNIS

L'accord avec le Département de l'énergie américain (DoE) a été renouvelé en 2012. Il s'articule autour de plusieurs groupes de travail, très actifs : neutronique et sûreté (en particulier sur le projet Astrid), séparation, combustibles avancés et simulation. La coopération autour d'Astrid pourrait se renforcer par l'utilisation d'installations américaines pour la qualification des composants en sodium.

GRANDE-BRETAGNE

La décision de la Grande-Bretagne de relancer son programme nucléaire permet de renforcer la coopération. Le NNL, laboratoire national nucléaire britannique, a pris une participation de 2 % dans le consortium international RJH. Il a aussi signé en mars 2016 une lettre d'intention avec le CEA, comportant plusieurs sujets potentiels de coopération : optimisation et mutualisation des installations, assainissement et démantèlement, et développement des systèmes nucléaires du futur. Astrid fait l'objet, en marge de cette lettre d'intention, d'un accord particulier avec là aussi des aspects techniques détaillés.

JAPON

Les relations avec le Japon se développent autour de deux grands thèmes : le programme Astrid et l'assainissement-démantèlement de Fukushima-Daiichi. Sur Astrid, le Japon a fait part de son intérêt à étendre significativement les sujets sur lesquels il travaille tant au niveau de la R&D que du design. De nouveaux domaines de coopération, pouvant mener à des propositions d'amélioration de conception et à une utilisation des installations de l'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA) pour des programmes expérimentaux, sont en cours de discussion. Sur l'assainissement-démantèlement de la centrale de Fukushima-Daiichi, le CEA a signé en 2015 deux Memorandum of Understanding (MoU), respectivement avec la Nuclear Damage compensation and decommissioning Facilitation corporation (NDF), qui met en place la feuille de route du démantèlement de la centrale, et TEPCO qui est intéressé par des techniques spécifiques de démantèlement.

RUSSIE

La coopération, relancée en 2010, porte principalement sur le développement des RNR-Na. Elle concerne essentiellement la R&D autour d'Astrid : utilisation des moyens d'irradiation russes et de la maquette BFS pendant les travaux de la maquette critique Masurca du CEA, étude de la faisabilité d'une irradiation d'un combustible prototypique d'Astrid dans le réacteur BN-600.

INDE

La coopération, très encadrée et limitée à la recherche de base et à la sûreté, permet à la DEN d'échanger entre autres dans le domaine des RNR-Na. L'autre volet de la coopération concerne le RJH, dans lequel l'Inde a pris une participation de 2 % et des actions de collaboration en nature (développement de Cloé, boucle d'irradiation pour l'étude de la corrosion.) L'Inde a également manifesté son intérêt à participer au projet Plinius-2, plateforme expérimentale permettant de tester le comportement du corium dans différentes configurations.

EUROPE COMMUNAUTAIRE

La DEN participe activement à la gouvernance de la plateforme technologique européenne dédiée à la fission nucléaire (SNETP) et à ses piliers techniques ESNII (sur le nucléaire durable de 4e génération) et NUGENIA (initiative de R&D concernant les réacteurs de 2e et 3e générations). L'effort pour obtenir des financements de l'Europe, routés sur des projets européens d'intérêt pour la DEN, dans le cadre du programme de travail Euratom, s'est par ailleurs poursuivi. D'autres partenariats européens sont formés en marge du cadre strictement communautaire. En 2015, des accords de coopération ont ainsi été signés avec la Suisse (PSI), l'Allemagne (KIT et HZDR) et l'Italie (ENEA), dans le cadre du projet ARDECO (Astrid R&D European Cooperation) sur Astrid.

EUROPE CENTRALE

Un consortium nommé V4G4, réunissant la Hongrie, la Slovaquie, la République tchèque et la Pologne, a été créé en 2013. Il a pour objectifs de construire de nouvelles compétences en R&D nucléaire pour les réacteurs de 4e génération, en particulier les réacteurs rapides à caloporteur gaz, et de coordonner l'effort des quatre instituts impliqués (chacun hébergera une compétence thématique) pour constituer un centre de R&D nucléaire d'Europe centrale. Le projet Allegro est formellement piloté dans le cadre de ce consortium depuis mi-2015. Aujourd'hui, la DEN y contribue en tant que conseil, et accompagne la réflexion du consortium V4G4 sur l'étape préalable de définition d'un programme de R&D robuste, et en première étape d'une feuille de route pour la conception et la sûreté d'Allegro. Le CEA réfléchit à la formalisation de son statut de membre associé au consortium V4G4.

INITIATIVES MULTILATÉRALES

Les centres CEA de Saclay et Cadarache ont été labellisés « ICERR » (International Center based on Research Reactor) par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Cette certification permettra au CEA d'accroître la visibilité internationale des installations labellisées (le RJH et ses installations associées : Isis, Orphée, Léci, Eole-Minerve, et Leca-Star), et de renforcer son attractivité notamment vis-à-vis des pays souhaitant se doter d'un programme électronucléaire, de capacités techniques et former leurs chercheurs.

Outre sa participation au Forum international génération IV (GIF), dont elle est l'un des membres fondateurs et qu'elle préside en la personne de son directeur de 2016 à 2019, la DEN participe activement à l'initiative NI2050 de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE-AEN). Elle porte sur la définition de programmes de R&D internationaux permettant de soutenir un développement du nucléaire approprié à la mise en place d'un mix énergétique mondial à bas carbone, conformément au scénario 2 degrés celsius de l'Agence internationale de l'énergie (930 GWe à horizon 2050).

Yukiya Amano, Directeur général de l'AIEA (à droite) remet les certifications ICERR à Daniel Verwaerde, Administrateur général du CEA (à gauche).

Journée Sécuriden à Marcoule :
échanges et sensibilisation autour de la sécurité.

LE MANAGEMENT « QUALITÉ, SÉCURITÉ, ENVIRONNEMENT » À LA DEN

La DEN, résolument engagée dans un processus de management par la qualité de ses activités, a mis en place, en cohérence avec sa structure opérationnelle, une organisation dédiée pour simplifier ses procédures et améliorer en permanence l'efficacité de son management, renforcer les transversalités, et permettre la généralisation des meilleures pratiques existantes sur tous les sites où elle est présente. La triple certification qualité, sécurité, environnement (QSE) du système de management de la DEN, obtenue en 2013, a été confirmée en 2015.

LE MANAGEMENT PAR LA QUALITÉ

Depuis sa création, la DEN a mis en place de nombreux outils permettant d'apprécier sa performance vis-à-vis de ses principaux objectifs. Les jalons en sont un exemple ; ce sont les échéances importantes d'un projet qui se matérialisent le plus souvent par une réalisation concrète de type production de livrables. En 2015, le taux d'atteinte des jalons a été de plus de 95 %, témoignant ainsi de l'importance pour la DEN de tenir les délais des projets.

LA SÉCURITÉ DES PERSONNES

La DEN s'est dotée d'une politique de protection des travailleurs visant à mettre en place et à entretenir au sein de ses équipes et chez ses prestataires, intervenant dans ses installations, une culture de sécurité.

Le nombre d'accidents du travail survenus en 2015 est resté au même niveau qu'en 2014, tant pour les personnels CEA que pour ceux des entreprises prestataires. Les déplacements et les accidents dits de la vie courante en représentent toujours la plus grande part. Il est à déplorer le décès, en septembre, d'un collaborateur d'une entreprise extérieure, qui intervenait sur un chantier de génie civil à Marcoule. Une enquête est toujours en cours pour en déterminer les circonstances précises.

La sensibilisation représente un maillon essentiel de la culture de sécurité. C'est pourquoi la DEN organise chaque année, sur les centres où elle est présente, une journée « Sécuriden » pour sensibiliser à la sécurité les personnels, agents CEA et entreprises extérieures. Cette opération s'est déroulée sur la journée du 3 novembre et portait notamment sur la vigilance par rapport aux situations à risque, la gestion de crise, la prise en compte du risque électrique dans les situations de la vie courante et la formation des nouveaux arrivants. Des conférences avec des intervenants extérieurs, la scénarisation de situations génératrices d'accidents ou de troubles, des ateliers dans les installations ont contribué à sensibiliser les salariés à ces risques.

Journée Sécuriden à Saclay :
échanges et sensibilisation autour de la sécurité.

LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

La DEN s'est également dotée d'une politique de protection de l'environnement, dont la sûreté nucléaire est une constituante majeure.

Le nombre d'événements significatifs impliquant la sûreté, la radioprotection ou l'environnement a augmenté par rapport aux années précédentes. Néanmoins, seuls sept d'entre eux ont eu un impact décelable sur le personnel ou l'environnement.

LA PROTECTION DES MATIÈRES NUCLÉAIRES

La DEN doit assurer la protection des matières nucléaires, qu'elle utilise pour réaliser ses programmes de R&D, contre le vol et le détournement. Cette protection est définie conformément à une réglementation spécifique qui a fait l'objet d'une évolution récente. Les industriels détenteurs sont ainsi conduits à réviser cette protection au travers d'études de sécurité de leurs sites et installations. En 2015, les mises à niveau ont été poursuivies conformément au calendrier établi.

Des prélèvements d'eau, d'air et de végétation sont régulièrement effectués puis analysés en laboratoire.

LA MAÎTRISE DE LA CONFIDENTIALITÉ ET LA SÉCURITÉ DES SYSTÈMES D'INFORMATION

Soumise aux exigences d'ouverture aux collaborations internationales, de respect de la confidentialité due à ses partenaires industriels et de protection de son patrimoine scientifique et technique, la DEN a poursuivi son plan d'actions pour la maîtrise de la confidentialité.

Elle a également continué à mettre en place des dispositions lui permettant de répondre aux nouvelles réglementations relatives à la protection du potentiel scientifique et technique de la nation.

LA CONTRIBUTION DE LA DEN À LA NORMALISATION NUCLÉAIRE

Concernant les systèmes nucléaires de 4e génération, l'élaboration d'une normalisation adaptée pour la conception et la réalisation de ces systèmes est incontournable.

En conséquence, la DEN mène une activité significative dans ce domaine, dans laquelle les équipes de R&D, notamment sur les matériaux et la mécanique, sont très impliquées.

La DEN a poursuivi son soutien à la politique d'ouverture de l'Association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matières et chaudières électronucléaires (Afcen) à d'autres exploitants, constructeurs et organismes de recherche y compris à l'étranger. Elle est restée impliquée dans cette démarche en 2015 en assurant, pour le compte de l'Afcen, la présidence d'un workshop de l'*European Committee for Standardization* (CEN), visant à définir les adaptations souhaitables de codes pour leurs utilisateurs potentiels en Europe.

LE MANAGEMENT DE PROJET À LA DEN

La DEN déploie tous ses programmes sous forme de projets et s'est mobilisée en 2015 pour en améliorer les conditions de pilotage et de réalisation. À cette fin, elle a engagé la mise à jour du référentiel méthodologique de management de projet en y intégrant le retour d'expérience des projets menés depuis 2001, année de sa mise en place. Ce référentiel regroupe plus d'une vingtaine de documents opérationnels, qui permettent de mettre en œuvre des méthodes communes entre les différents acteurs des projets autour de la maîtrise des performances, coûts, délais et risques. Plusieurs guides constitutifs de ce référentiel ont ainsi été mis en chantier en 2015 ou sont en cours d'élaboration.

ZOOM

TROIS SÉMINAIRES POUR PROMOUVOIR L'USAGE DU RÉFÉRENTIEL DE MANAGEMENT DE PROJET

En 2015, le déploiement du référentiel méthodologique de management de projet a été engagé auprès des acteurs projets. Trois séminaires ont ainsi été organisés sur chaque centre pour en promouvoir l'usage et informer ces acteurs sur l'avancement de sa révision. Ils ont rassemblé plus de 250 participants. S'en sont suivies trois sessions de formation pour leur faire acquérir les bases de cet outil.

Présentation du rapport *Decarbonization Wedges* durant la COP21.

Conférence internationale Global 2015.

I-TÉSÉ

L'Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé) mène des études à caractère macroéconomique et microéconomique dans le but notamment de contribuer aux choix du CEA en matière de programmes de R&D.

ACTIONS DANS LE CADRE DE LA COP21

I-tésé s'est largement impliqué dans la COP21, qui s'est tenue à Paris en décembre 2015. En amont de cet événement, I-tésé a contribué dans le cadre de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (Ancre) à l'organisation de l'une des sessions de la conférence scientifique *Notre avenir commun face au changement climatique,* organisée à Paris en juillet.

Durant la COP21, I-tésé a été au cœur de trois événements :

- la remise au Gouvernement du rapport *Decarbonization Wedges,* établi dans le cadre de l'Ancre en lien avec l'ONU. Ce rapport analyse notamment les potentiels des technologies de l'énergie pour atteindre nos objectifs climatiques ainsi que les verrous à lever à l'horizon 2050 ;
- la participation à une présentation de cette étude en marge de la conférence ;
- la coordination d'une présentation sur le rôle de l'hydrogène, toujours en marge de la conférence.

CONTRIBUTION AU RAPPORT DE L'AIE ET DE L'AEN SUR LES COÛTS PRÉVISIONNELS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) et l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) ont publié fin 2015 leur étude de référence sur les coûts de l'électricité. Les équipes du CEA, et en particulier de l'I-tésé, y ont contribué en lien étroit avec les partenaires industriels et la Direction générale de l'énergie et du climat. La contribution de l'I-tésé concernait essentiellement les données françaises, notamment l'obtention d'un jeu de données unique entre les industriels des différentes filières, mais aussi des questions méthodologiques. Un résultat important de ce rapport est de mettre en évidence que malgré une baisse significative des coûts du solaire photovoltaïque, le nouveau nucléaire conserve sa compétitivité dans les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques en tant que moyen de production d'électricité bas carbone.

PARTICIPATION DE L'I-TÉSÉ À DES ÉVÉNEMENTS INTERNATIONAUX ET NATIONAUX

En septembre 2015, I-tésé a participé à Paris à la conférence internationale Global 2015 dédiée au cycle du combustible. I-tésé y a organisé une session sur les enjeux économiques de l'industrie nucléaire et a coordonné pour cette thématique le comité scientifique de la conférence.

En 2015, dans le cadre de réunions organisées sur la thématique de l'uranium à l'AIEA, I-tésé a présenté une méthode d'estimation quantitative des ressources mondiales d'uranium.

I-tesé a également organisé plusieurs événements dans le cadre de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN) : une conférence sur la place du nucléaire dans les scénarios énergétiques mondiaux à l'horizon 2050 et une journée dédiée à la méthodologie concernant l'estimation des coûts du démantèlement.

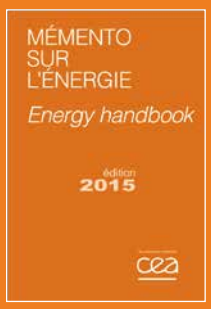
7e JOURNÉE ANNUELLE DE L'I-TÉSÉ

La 7e journée annuelle de l'I-tésé s'est déroulée le 17 juin 2015. Elle portait sur la thématique de la place de l'hydrogène dans la transition énergétique et a réuni plus de 150 participants. Parmi les temps forts de cette journée, on retiendra le débat sur le rôle pour l'hydrogène dans la transition énergétique avec comme invité principal Laurent Kalinowski, député et membre de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

ZOOM

ÉDITION DES LIVRETS ELECNUC ET MÉMENTO SUR L'ÉNERGIE

Comme chaque année, I-tésé a élaboré et édité ces deux livrets qui fournissent sous forme synthétique de nombreuses informations de référence relatives à l'énergie à l'échelle mondiale, avec un focus particulier sur la production du parc nucléaire.



Crédits photo : Saveau/Ingerop ; AREVA/Larrayadieu Eric ; S. Le Couster/CEA ; P.Allard/REA/CEA ;
G. Lesénéchal/CEA ; P. Stroppa/CEA ; PF. Grosjean/CEA ; F.N'Guyen/CEA ; L. Godart/CEA ; AIEA ;
O. Metzger. ; Stéphane Reboul/CEA ; EDF/Christel Sasso ; ONET Technologies ; SFEN ;

Conception & réalisation : **Obea communication**.
Ce rapport est imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement.

IMPRIM'VERT®

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea den

Direction de l'énergie nucléaire
Centre de Saclay
91191 Gif-sur-Yvette cedex

www.cea.fr

Contact communication : alexandra.bender@cea.fr