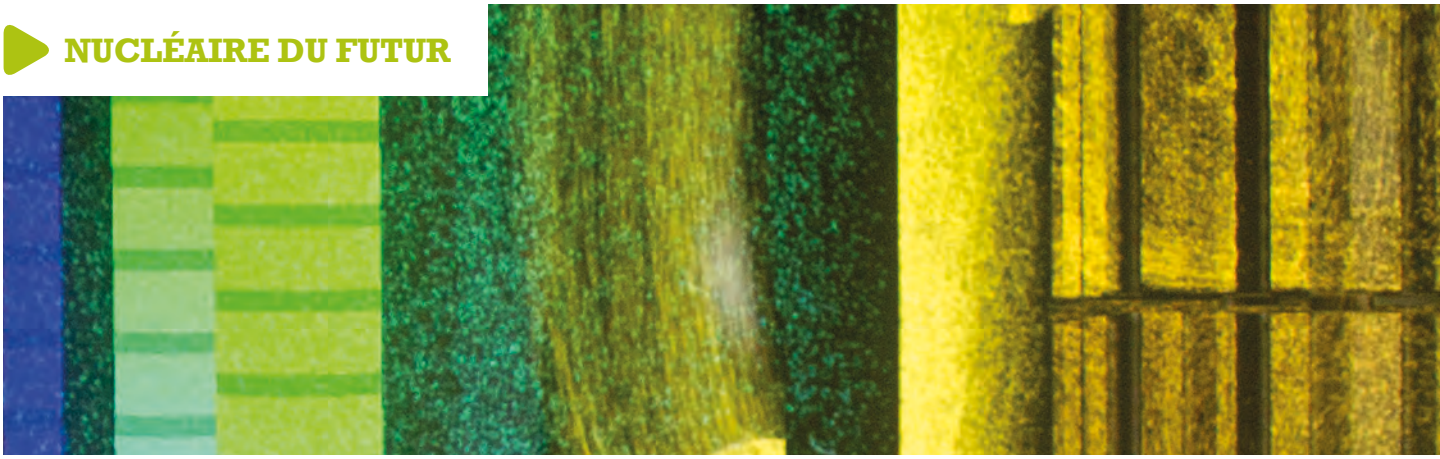
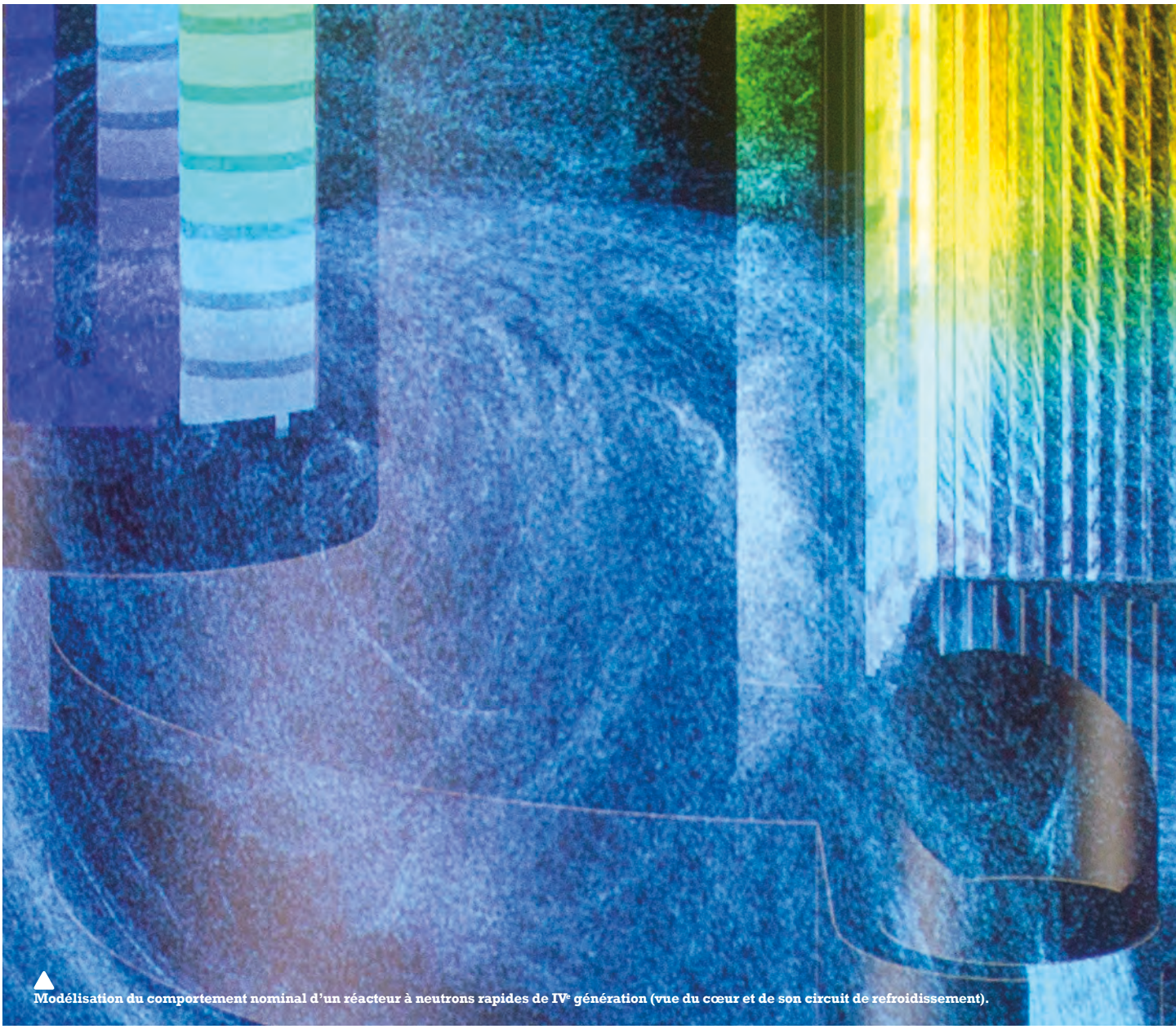
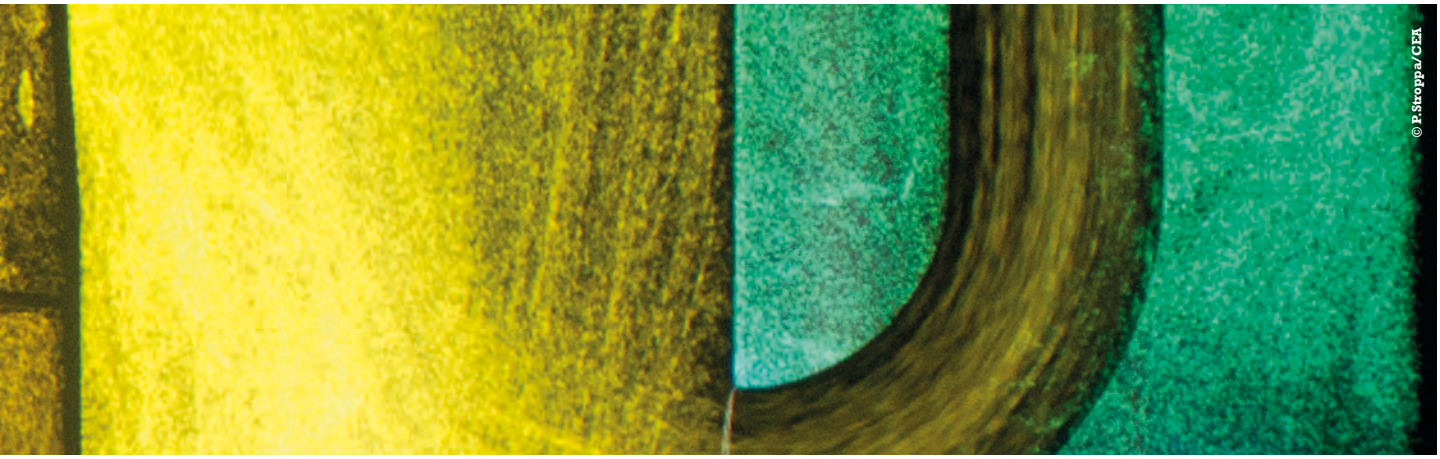


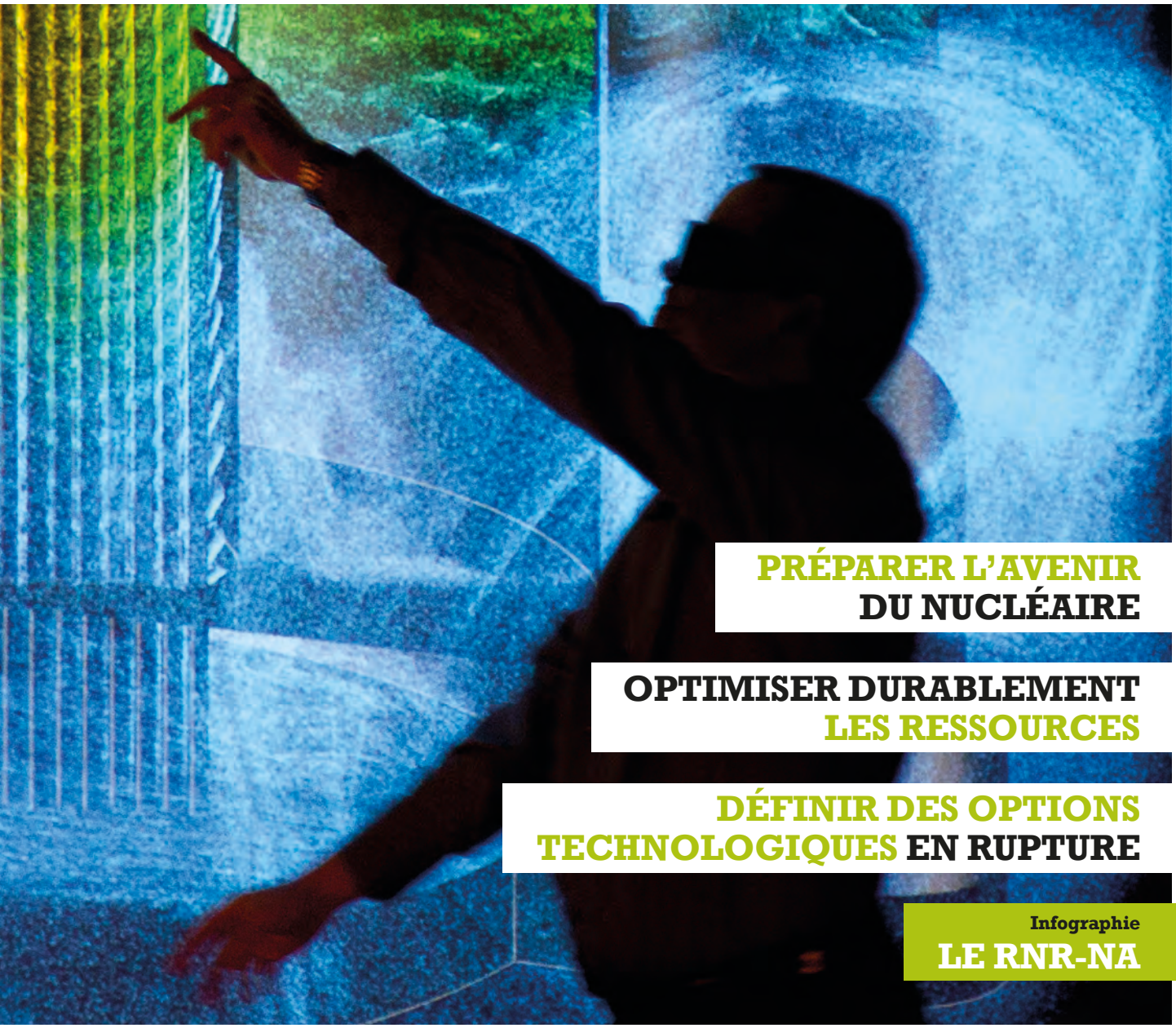
ASTRID, UNE OPTION POUR LA QUATRIÈME GÉNÉRATION



Modélisation du comportement nominal d'un réacteur à neutrons rapides de IVe génération (vue du cœur et de son circuit de refroidissement).


© P. Stroppa/CEA

Assurer l'indépendance énergétique et la sécurité d'approvisionnement, améliorer les standards de sûreté, optimiser durablement la gestion des matières et minimiser la production des déchets. Le tout, sans émettre de gaz à effet de serre. Voici le cahier des charges du nucléaire du futur fixé par le Forum international génération IV.
La conception du démonstrateur technologique de réacteur à neutrons rapides Astrid, prévue par la loi du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières et des déchets radioactifs, est confiée au CEA et financée dans le cadre des investissements d'avenir votés par le Parlement en 2010.
Dossier réalisé par Vahé Ter Minassian



PRÉPARER L'AVENIR DU NUCLÉAIRE

OPTIMISER DURABLEMENT LES RESSOURCES

DÉFINIR DES OPTIONS TECHNOLOGIQUES EN RUPTURE

Infographie
LE RNR-NA

Vue plongeante depuis le toit du bâtiment réacteur Phénix, au centre CEA de Marcoule.

© P. Vigouroux/CEA

PRÉPARER L'AVENIR DU NUCLÉAIRE

Besoin vital et facteur de croissance, la maîtrise de l'énergie est un enjeu majeur du monde de demain. L'industrie nucléaire dispose à cet égard de sérieux atouts tout en étant confrontée à des problématiques de sûreté, de durabilité des ressources, de gestion des déchets qui imposent de poursuivre sur la voie de l'innovation technologique.

Certains chiffres parlent d'eux-mêmes : en 2030, la demande énergétique à l'échelle du globe aura doublé sous l'effet conjugué de la croissance des pays émergents et de l'augmentation de la population - nous serons 9 à 10 milliards en 2050. À l'heure où les ressources disponibles sont en voie de raréfaction et où il apparaît de plus en plus urgent d'engager une lutte efficace contre le changement climatique, il est devenu indispensable de disposer de sources d'énergie à la fois compétitives et « bas carbone ».

En étant capable de produire massivement de l'électricité sans générer de gaz à effet de serre, le nucléaire dispose d'atouts qui lui permettent de s'imposer comme l'une des solutions prometteuses. Mais, rappelle Christophe Béhar, directeur de l'Énergie nucléaire du CEA : *« cette industrie est, comme d'autres, confrontée aux problèmes de sûreté de son approvisionnement et de raréfaction de ses matières premières. En 2012, on estimait que les ressources disponibles en uranium s'élevaient à 71 giga tonnes d'équivalent pétrole, contre 161 et 236 pour le gaz et le pétrole. »*

Enfin, la réduction des stocks de plutonium, le devenir des déchets à vie longue comme les **actinides mineurs**• et la lutte contre la **prolifération nucléaire**• sont autant de questions qui imposent de poursuivre sur la voie de l'innovation en matière de technologie nucléaire.

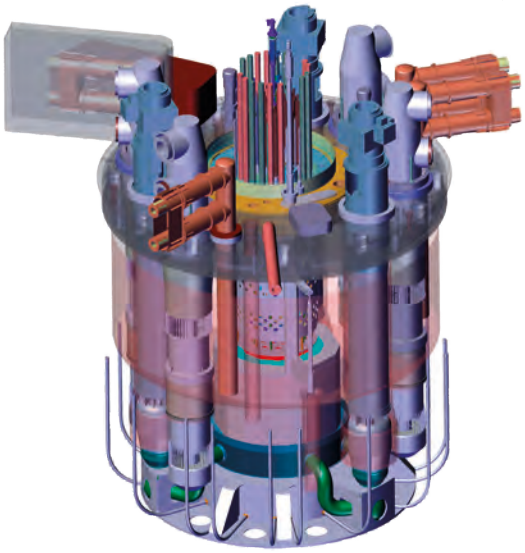
• **Actinides mineurs :** noyaux lourds autres que le plutonium (neptunium, américium, curium) formés dans un réacteur par capture successive de neutrons par les noyaux d'uranium du combustible.

• **Prolifération nucléaire :** détournement du plutonium ou d'autres matières fissibles à des fins militaires.

La France impliquée dans deux projets de réacteurs à neutrons rapides

Lancé en l'an 2000 sur proposition des États-Unis, le Forum international génération IV s'est fixé pour but de promouvoir le nucléaire du futur en préconisant le développement de six concepts de machines (*voir encadré*). Fortement impliquée dans cette initiative, la France a décidé de porter ses efforts sur deux d'entre eux : les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) - filière de référence - et les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz (RNR-G) - option à plus long terme - qui se différencieront totalement des réacteurs à neutrons rapides des générations précédentes tout en bénéficiant de l'expérience acquise au cours de programmes passés comme Phénix et Superphénix. *« Nous n'avons pas voulu nous investir dans la filière des RNR refroidis au plomb car ces derniers posent des problèmes techniques importants et ne peuvent fonctionner qu'à de faibles puissances électriques »* précise Christophe Béhar.

Ce choix s'explique par les multiples avantages des réacteurs à neutrons rapides, notamment l'impact qu'aurait leur mise en service sur l'état des ressources mondiales en uranium. En effet, cette technologie permet de brûler tout type d'uranium (dans les systèmes actuels, seul l'isotope minoritaire uranium 235 (^{235}U) est utilisé), y compris l'uranium appauvri issu du combustible usé sorti des centrales actuelles. Elle offre également la possibilité de multi-recycler le plutonium produit par le parc actuel des ▶▶



© CEA

Écorché du cœur du démonstrateur technologique de RNR-Na, Astrid.

LES OBJECTIFS DU FORUM INTERNATIONAL GÉNÉRATION IV

En 2001, les 13 partenaires du Forum international génération IV établissent une charte officielle, donnant le coup d'envoi de cette instance de coopération en matière de R&D pour établir la faisabilité et les performances des réacteurs du futur. Objectif : développer des réacteurs à la sûreté renforcée, durables (entre autres, économes en uranium), économiquement compétitifs par rapport aux autres sources d'énergie, non proliférant, résistants aux attaques terroristes et créant peu de déchets ultimes.

Fin 2002, six concepts de réacteurs sont sélectionnés. Trois sont des filières à neutrons rapides (RNR) : RNR gaz, RNR sodium et RNR plomb. Les autres utilisent des neutrons thermiques : réacteurs à eau supercritique (RESC), à très haute température (RTHT) et à sels fondus (RSF). La France s'implique essentiellement dans deux filières : les RNR sodium dont elle a l'expérience avec Phénix et Superphénix et, dans une moindre mesure, les RNR gaz, avec des partenaires européens.

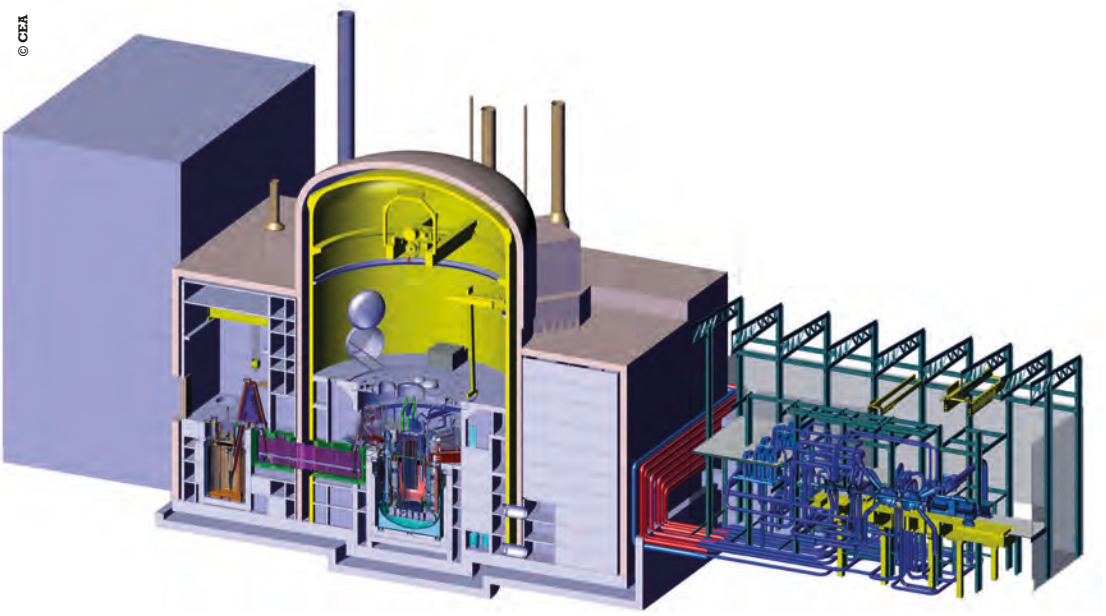
Les 13 partenaires : Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Corée du Sud, Chine, États-Unis, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse ainsi que l'Euratom.

réacteurs à eau légère. Une autre raison du choix de ce type de réacteurs tient au fait qu'ils contribuent à la gestion des déchets radioactifs à vie longue et à leur diminution grâce à la transmutation• des actinides mineurs. Enfin, et du fait de ces avantages, ces réacteurs sont un rempart contre la prolifération nucléaire dans la mesure où ils suppriment la nécessité d'enrichir l'uranium et consomment eux-mêmes le plutonium qu'ils produisent.

•**Transmutation :** transformation d'un atome en un autre atome par réaction nucléaire. En l'occurrence, il s'agirait de fissionner les actinides mineurs pour obtenir des éléments toujours radioactifs mais à durée de vie moins longue.

Vers le démonstrateur technologique Astrid

Reste à mettre au point cette nouvelle filière de réacteurs. Ce à quoi s'emploie depuis 2010 le CEA avec des partenaires publics et privés (*voir encadré*) grâce au projet de RNR-Na, baptisé Astrid. Ce démonstrateur technologique de 600 MWe n'en est pour l'instant qu'à l'état d'avant-projet sommaire. Les options de conception, reposant sur l'expérience acquise dans le passé, prévoient de fortes améliorations pour positionner ce réacteur au niveau attendu de la quatrième génération. « *Il s'agit notamment de poursuivre les innovations sur le plan de la sûreté car le démonstrateur technologique devra rompre, sur ce point, avec ses prédécesseurs* » insiste Christophe Béhar. La phase actuelle dite « d'avant-projet sommaire » est prévue jusqu'à fin 2015. Elle sera suivie, de 2016 à 2019, d'une étape « d'avant-projet détaillé ». Des études qui bénéficient d'une aide de 650 millions d'euros du programme Investissements d'Avenir (sur l'enveloppe de 1 milliard d'euros allouée au nucléaire du futur). Et si les pouvoirs publics le décident, ce démonstrateur technologique pourrait voir le jour durant la décennie 2020-2030, ce qui permettrait un déploiement industriel en France à l'horizon 2040. Juste à temps pour répondre aux défis de la seconde moitié du XXIe siècle. ●



© CEA

Vue en coupe de l'ilôt nucléaire et de la salle des machines d'Astrid.

LES PARTENAIRES DU PROJET ASTRID

Pour les études d'ingénierie et de R&D qui mobilisent actuellement plus de 500 personnes, la direction de l'énergie nucléaire du CEA (CEA-DEN) collabore avec différents industriels français et étrangers. Voici le rôle de chacun :

- CEA : pilote du projet et chargé de la conception du cœur ;
- Airbus Defence and Space : fiabilité et sûreté de fonctionnement ;
- Alcen : cellules chaudes ;
- Alstom : système de conversion d'énergie eau-vapeur et gaz ;
- Areva NP : chaudière, contrôle commande et auxiliaires nucléaires ;
- Bouygues : génie civil et ventilation ;
- Comex Nucléaire : innovations sur robotique et manutention ;
- EDF : assistance à maîtrise d'ouvrage, retour d'expérience d'exploitation, des études de sûreté et de conception du cœur, de l'inspection en service et des matériaux (durée de vie) ;
- Jacobs France : moyens communs et infrastructures ;
- JAEA, MHI et MFBR : conception de systèmes de sûreté et contribution à la R&D associée ;
- Rolls-Royce : échangeurs compacts sodium-gaz et manutention du combustible ;
- Toshiba : pompes électromagnétiques de grande taille.

OPTIMISER DURABLEMENT LES RESSOURCES

Les réacteurs à neutrons rapides intéressent aussi l'industrie nucléaire parce que leur capacité de recyclage permettrait de résoudre certains problèmes liés aux stocks d'uranium et de plutonium.

Actuellement, la France importe 8000 tonnes d'uranium naturel par an qui permettent la fabrication des 1000 tonnes d'uranium enrichi qui alimentent les centrales. Le reste, l'uranium appauvri, soit 7000 tonnes, est entreposé. Cet uranium appauvri (constitué pour l'essentiel d'uranium 238) ne pourrait de toute manière pas être employé comme combustible des réacteurs à eau sous pression (REP) du parc EDF. Au cours du temps, il s'est accumulé sur le territoire français et son stock représente aujourd'hui plus de 270000 tonnes !

Autre matière à gérer durablement : le plutonium issu du combustible usé des centrales (10 tonnes par an). En France, il est traité pour fabriquer du **MOX**•. Or ce carburant fissile dont la production s'élève à 120 tonnes par an ne peut être utilisé efficacement qu'une seule fois. Après son passage en réacteur, il est entreposé en piscine bien qu'il contienne encore du plutonium. N'y aurait-il pas un moyen de le valoriser ?

Résorber les stocks existants, sans en constituer de nouveaux

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) peuvent apporter des solutions. Utilisant un carburant fissile fait de 80 % d'uranium 238 et de 20 % de plutonium, ils produisent de l'énergie en brûlant le plutonium et transforment également l'uranium en plutonium. Parfois, en quantités égales s'ils fonctionnent (cas d'Astrid) selon un mode **isogénérateur**•.

L'avantage ? « *Il est double,* estime Bernard Boullis, directeur du programme "aval du cycle" du CEA-DEN. *Les RNR permettraient d'éviter de constituer des stocks de plutonium puisque tout serait "brûlé" et aussi de valoriser la presque totalité de l'uranium 238 contenu dans le combustible.* » En effet, dans les REP classiques, seule une infime partie d'uranium 235 du combustible sert à produire de l'énergie, ce qui génère un énorme gaspillage de matières premières. Dans les RNR, les 80 % d'uranium 238 seraient utilisables.

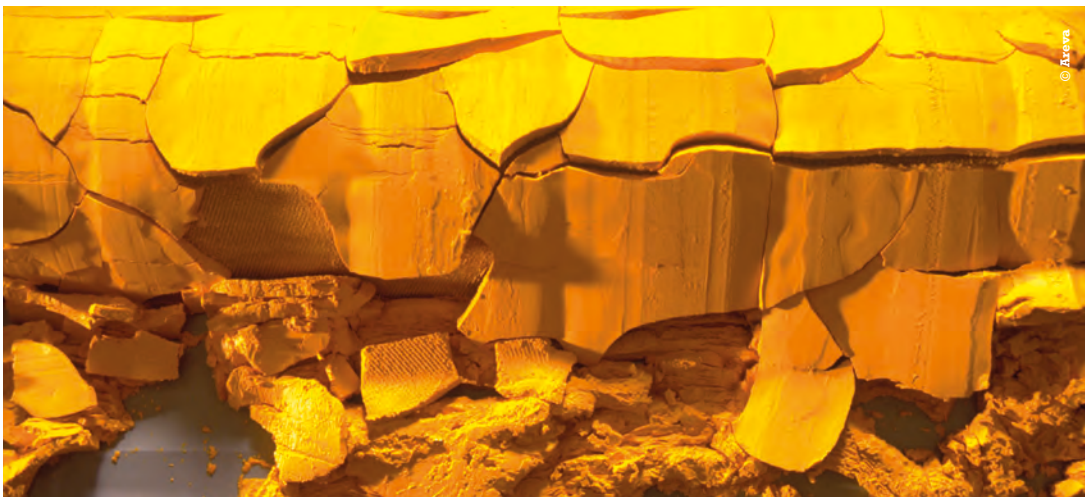
Autre avantage : il n'y aurait plus besoin d'enrichissement, limitant du coup les risques de prolifération nucléaire. Comme l'uranium 238 est naturellement plus abondant sur Terre que l'uranium 235, et que la France en dispose d'énormes quantités, il y aurait là un moyen de garantir la production d'électricité durant des milliers d'années !

Récupérer le plutonium du MOX usé

Reste que pour démarrer les premiers réacteurs, il faudrait disposer de plutonium. Les spécialistes estiment qu'il pourrait être récupéré dans le MOX usé, conservé dans les piscines de l'usine de La Hague dont les volumes seraient suffisants pour mettre en service dix centrales. Depuis l'an 2000, ils disposent en effet d'un procédé de traitement fiable et performant pour le récupérer. Enfin, les RNR pourraient aussi servir à se débarrasser de certains déchets problématiques de l'industrie nucléaire. Ces machines auraient, en effet, la capacité de « brûler » - transmuter - les actinides mineurs. Les procédés pour les isoler dans le combustible usé, avant cette opération, sont là aussi connus : ils sont en cours de développement sur le centre CEA de Marcoule. ●

• **MOX** (*Mixed OXydes*) **:** combustible nucléaire composé d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium.

• **Isogénération :** processus qui produit autant de combustible fissile qu'il en consomme.



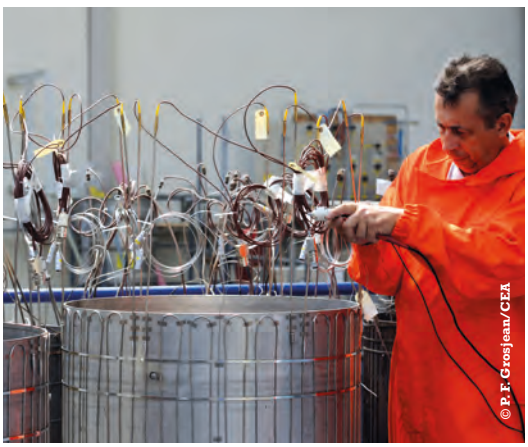
Plaque de *yellow cake*, concentré d'uranium obtenu après dissolution du minerai d'uranium dans de l'acide.

Piscine d'entreposage du site Areva à La Hague.

DÉFINIR DES OPTIONS TECHNOLOGIQUES EN RUPTURE

Après une relance des travaux de R&D en 2006 avec EDF et Areva, les études de conception d'Astrid ont commencé en 2010. Le CEA, maître d'ouvrage du programme, est aujourd'hui capable de dresser le portrait-robot de ce démonstrateur technologique de réacteur de quatrième génération qui pourrait voir le jour durant la décennie 2020-2030.

Montage d'une section d'essais destinée aux études de magnétohydrodynamique.



Montage d'une maquette de tuyauterie du circuit secondaire d'un RNR-Na pour des essais de systèmes de détection de fuite.

« *Un réacteur doté des meilleurs standards de sûreté du moment et capable d'optimiser la gestion des matières.* » Telle est pour François Gauché, qui dirige les programmes de recherche dans ce domaine au CEA-DEN, la définition d'un réacteur de quatrième génération. « Sûreté maximum » parce qu'elle devra être au moins à la hauteur de celle de l'EPR et intégrer le retour d'expérience des évaluations de sûreté réalisées sur les centrales françaises, suite à l'accident de Fukushima. « Capacité d'optimisation », car cette technologie futuriste devra pouvoir tirer de la ressource disponible « *cent fois plus d'énergie que ne le font les réacteurs actuellement déployés sur le parc nucléaire français* ». Ce cahier des charges explique les principaux choix technologiques que les équipes du CEA-DEN ont opérés pour le projet Astrid, en partenariat avec des industriels. Ainsi, ce réacteur sera à « neutrons rapides » (RNR), parce que la physique impose que seul ce procédé puisse convertir en énergie jusqu'à plus de 80 % de l'uranium naturel, tout en utilisant comme matières premières les énormes stocks d'uranium 238 constitués par l'exploitation du parc EDF durant des décennies, ainsi que le plutonium contenu dans les combustibles usés. Il sera également en « rupture technologique » pour que son niveau de sûreté dépasse celui de tous les autres RNR qui ont pu exister jusqu'ici, comme par exemple Phénix ou Superphénix.
Enfin, il sera un réacteur de 600 MWe raccordé au réseau car, explique François Gauché, « *son rôle sera de démontrer que les options techniques retenues pour Astrid sont extrapolables à une filière de réacteurs de production d'électricité, grâce à des progrès sur l'opérabilité du réacteur.* » En exploitation commerciale, un réacteur du futur devra être disponible pour produire de l'énergie au moins 90 % du temps. Dès lors, il s'agit de démontrer aux industriels que la technologie du RNR sodium est capable d'atteindre cet objectif par la mise au point progressive de procédures adaptées.

Le sodium pour des neutrons rapides

Les options technologiques et les principaux axes de recherches du projet peuvent se décliner selon un mode semblable. Ainsi, le choix des RNR fixerait de lui-même la nature du liquide caloporteur à utiliser pour refroidir le cœur du réacteur. Ne devant pas ralentir les neutrons, ce fluide ne peut être de l'eau comme dans les REP du parc EDF. D'autres critères comme la viscosité, la corrosivité ou les propriétés thermiques doivent être aussi considérés. Et au bout du compte, indique François Gauché : « *même si on peut employer du gaz, le meilleur choix possible est le sodium liquide porté à des températures de 200 à 550 °C.* »
Mais les défauts du sodium demandent à être corrigés, et ce, dès la conception du réacteur. Dans les réacteurs

comme Superphénix, une vidange du sodium se traduisait, par exemple, par une hausse de la réactivité du cœur ; ce que les ingénieurs-chercheurs du CEA-DEN veulent maintenant éviter en développant pour Astrid un cœur à sûreté améliorée. Pour limiter les conséquences d'une mise en contact accidentelle de ce métal liquide avec l'eau, ils envisagent également de remplacer le générateur de vapeur servant à produire de l'électricité par un circuit et une turbine fonctionnant à l'azote pressurisé.
Enfin, les risques d'incendie, liés à une fuite de sodium dans le bâtiment, seront limités par les progrès sur la détection de fuite ainsi que par le casematage ou l'inertage des locaux les plus exposés. Des capteurs ultrasonores hautes températures (*voir encadré*) ou des robots résistant aux fortes chaleurs devront aussi être employés lors des opérations d'inspection qui sont plus compliquées dans un RNR sodium, puisque le sodium est naturellement opaque.

Poursuivre l'innovation

Une telle présentation des faits ne signifie pas que toutes les options techniques sont déjà décidées. L'important est de donner la priorité à l'innovation et un effort important de R&D reste nécessaire, en soutien aux études d'ingénierie cofinancées par le CEA et les partenaires industriels.
Cet état des lieux ne préjuge pas non plus de la date à laquelle les premières centrales de quatrième génération arriveront sur le marché, puisque le projet Astrid n'a pas une vocation commerciale. Il vise simplement *« à préparer le futur et faire en sorte qu'une filière de IVe génération soit disponible à partir de 2040 »*. Pour ce faire, il devra, à cette date, avoir accumulé une quinzaine d'années d'exploitation tout en ayant pu réaliser une série d'expériences visant à démontrer ses capacités : essais d'opérabilité, tests de vieillissement des matériaux, tests de transmutation, etc. ●

© P. Grosjean/CEA

Expérimentation en boîte à gants sodium.

DES ULTRASONS POUR PERCER L'OPACITÉ DU SODIUM

Parmi les innovations autour du projet Astrid, le développement d'une instrumentation permettant la visualisation sous sodium constitue un enjeu majeur. L'objectif étant d'améliorer la démonstration des capacités d'inspection et de surveillance.
Comment voir à travers le sodium chaud, milieu opaque à l'aspect d'aluminium fondu ? À partir du retour d'expérience des RNR ayant déjà fonctionné dans le monde, une équipe du CEA-DEN, en collaboration avec le CEA-List[1], a développé deux techniques de contrôle non destructif par ultrasons. Celles-ci utilisent des **traducteurs**• électromagnétiques et piézoélectriques immergés en sodium, tel que l'explique Olivier Gastaldi, chef de projet[2] au CEA-DEN : *« Ils émettent des ultrasons et enregistrent les échos qui leur reviennent. Les données sont ensuite analysées par des algorithmes de traitement du signal pour générer une image permettant de visualiser en 3D l'objet ou la surface rencontrés, détecter d'éventuelles fissures ou encore identifier un assemblage de combustible dans le cœur. »* Une prouesse au regard des contraintes propres à un réacteur : températures élevées (200 à 600 °C selon l'application), irradiations, compatibilité chimique des matériaux avec le sodium. Une fois ces techniques développées, elles ont été testées dans l'eau qui présente des similitudes avec le sodium en terme de transfert d'ondes ultrasonores. Elles ont ensuite été vérifiées sous sodium. À présent, les scientifiques innovent sur des systèmes autorisant une déviation électronique du faisceau des ultrasons. En effet, pour qu'un objet soit vu par un traducteur monoélément, il faut qu'il soit dans l'axe de diffusion de celui-ci, ce qui est limitant pour l'obtention d'une image. En parallèle, le développement des algorithmes pour traiter l'information se poursuit pour reconstituer de façon optimale l'image attendue.

• **Traducteurs :** dispositif convertissant un signal physique en un signal mécanique.

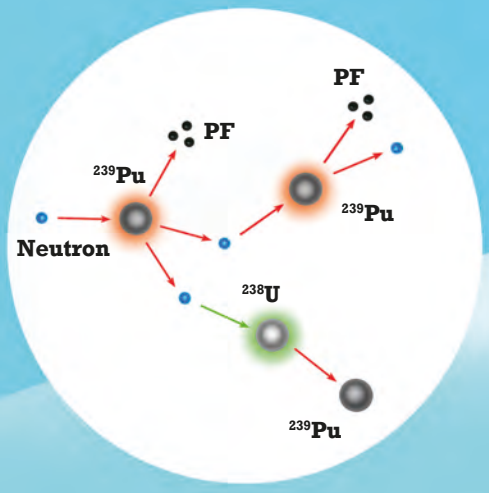
Notes :

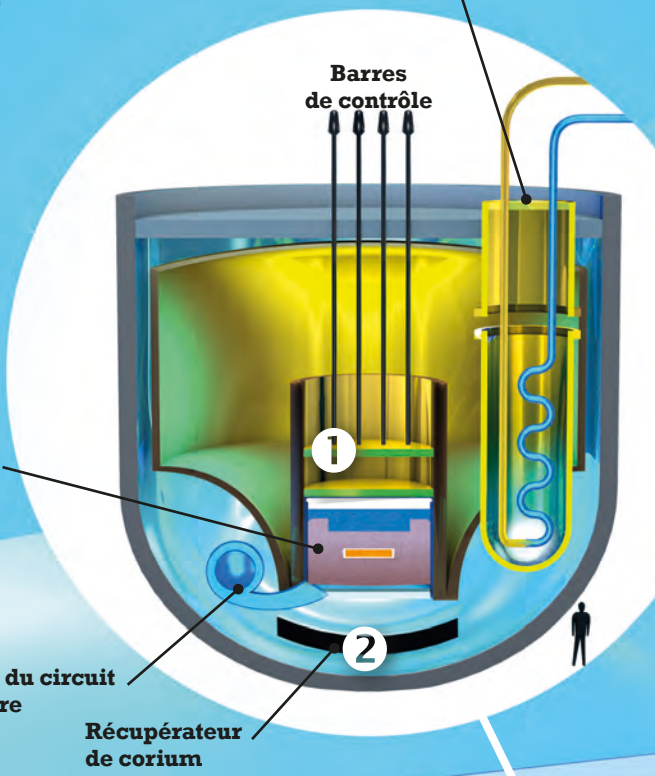
1. *Institut de CEA Tech, spécialiste des systèmes interactifs, systèmes embarqués, capteurs et traitement du signal.*

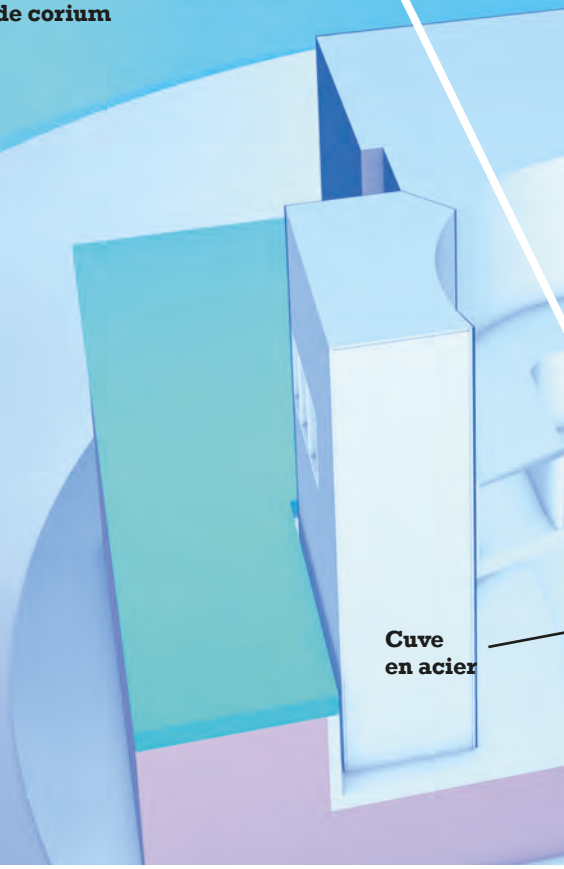
2. *Projet Technologies sodium.*

LE RNR-Na

Le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na) fonctionne comme un réacteur nucléaire classique : la fission des atomes de son combustible, au sein de son cœur, génère de la chaleur qui est véhiculée jusqu'à un turbogénérateur pour produire de l'électricité. Dans le contexte de la IVe génération, les RNR-Na innovent, tant sur l'optimisation des matières premières que sur l'amélioration de la sûreté. Voici quelques pistes proposées par le CEA-DEN, maître d'ouvrage du démonstrateur technologique de RNR-Na Astrid.







FONCTIONNEMENT

La réaction de fission nucléaire

Le combustible nucléaire d'un RNR-Na est un mélange d'environ 80 % d'uranium 238 (^{238}U) et 20 % de plutonium 239 (^{239}Pu).

Dans le cœur du réacteur, les neutrons fissionnent les atomes ^{239}Pu. Ces derniers – en plus de libérer de l'énergie et de la chaleur et de générer des produits de fission (PF) – émettent d'autres neutrons qui cassent à leur tour d'autres atomes, et ainsi de suite (réaction en chaîne). Parallèlement, les atomes fertiles (non-fissiles) ^{238}U capturent des neutrons et se transforment en ^{239}Pu (fissile). La consommation en ^{239}Pu est ainsi compensée par la production issue de ^{238}U.

L'^{238}U, matière première des RNR, représente 99 % de l'uranium naturel alors que l'^{235}U, matière première utilisée dans les réacteurs nucléaires actuels, ne représente que 1 %.

Le système caloporteur

Dans un RNR-Na, le fluide caloporteur est du sodium – quand celui des réacteurs actuels est de l'eau – qui présente l'avantage de rester liquide jusqu'à 900 °C.

Dans le cœur, une pompe pousse du sodium froid (400 °C) entre les assemblages de combustible pour qu'il récupère l'énergie produite par les réactions de fission. En sortie du cœur, le sodium atteint 550 °C. Sa chaleur est extraite du circuit primaire par l'échangeur intermédiaire d'un deuxième circuit dans lequel circule également du sodium. Ainsi réchauffé, le sodium du circuit secondaire est dirigé vers un dispositif qui convertit sa chaleur pour actionner un turbogénérateur et produire de l'électricité.

PRINCIPALES INNOVATIONS

❶ Un cœur à réactivité maîtrisée

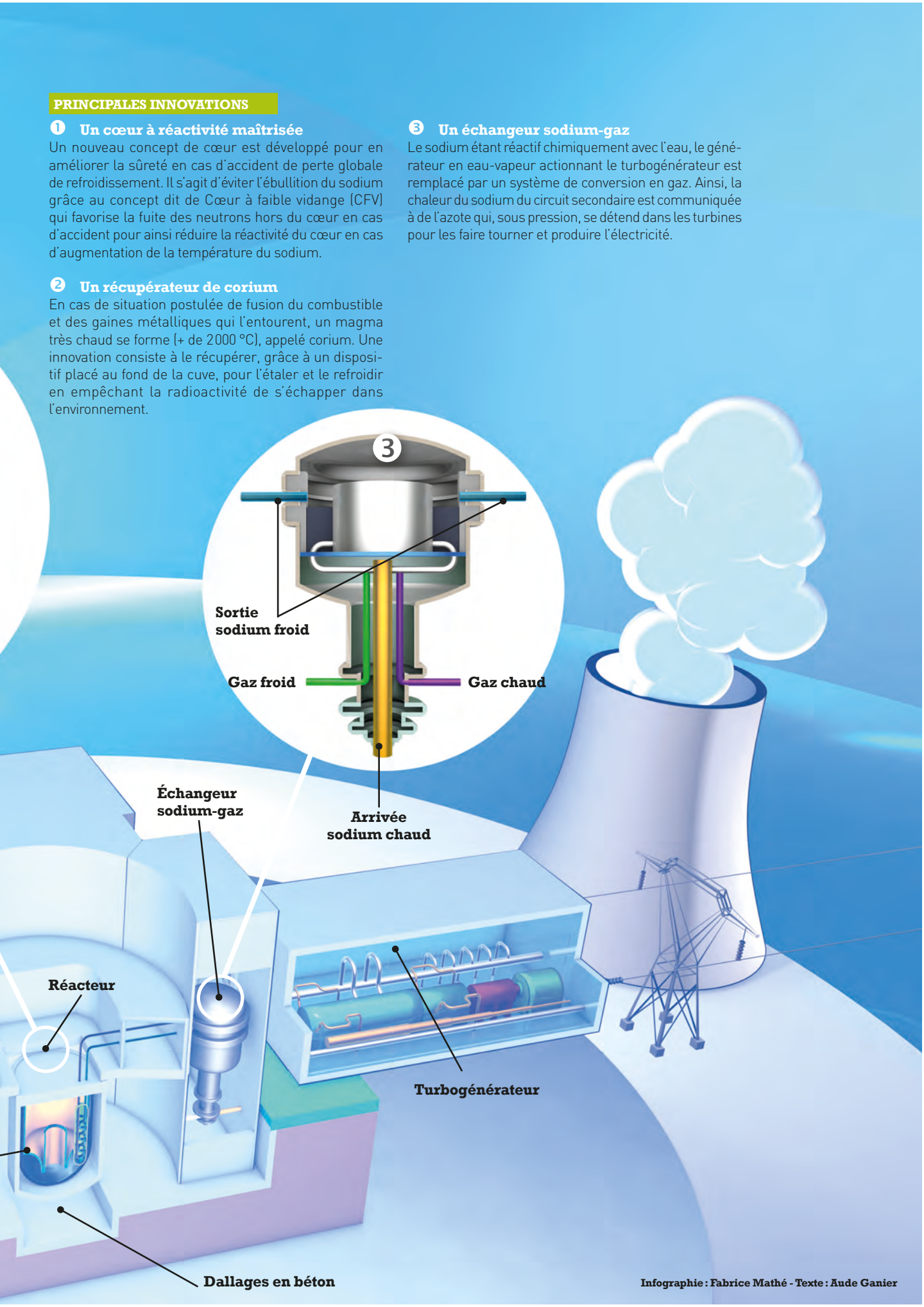
Un nouveau concept de cœur est développé pour en améliorer la sûreté en cas d'accident de perte globale de refroidissement. Il s'agit d'éviter l'ébullition du sodium grâce au concept dit de Cœur à faible vidange (CFV) qui favorise la fuite des neutrons hors du cœur en cas d'accident pour ainsi réduire la réactivité du cœur en cas d'augmentation de la température du sodium.

❷ Un récupérateur de corium

En cas de situation postulée de fusion du combustible et des gaines métalliques qui l'entourent, un magma très chaud se forme (+ de 2000 °C), appelé corium. Une innovation consiste à le récupérer, grâce à un dispositif placé au fond de la cuve, pour l'étaler et le refroidir en empêchant la radioactivité de s'échapper dans l'environnement.

❸ Un échangeur sodium-gaz

Le sodium étant réactif chimiquement avec l'eau, le générateur en eau-vapeur actionnant le turbogénérateur est remplacé par un système de conversion en gaz. Ainsi, la chaleur du sodium du circuit secondaire est communiquée à de l'azote qui, sous pression, se détend dans les turbines pour les faire tourner et produire l'électricité.



Infographie : Fabrice Mathé - Texte : Aude Ganier