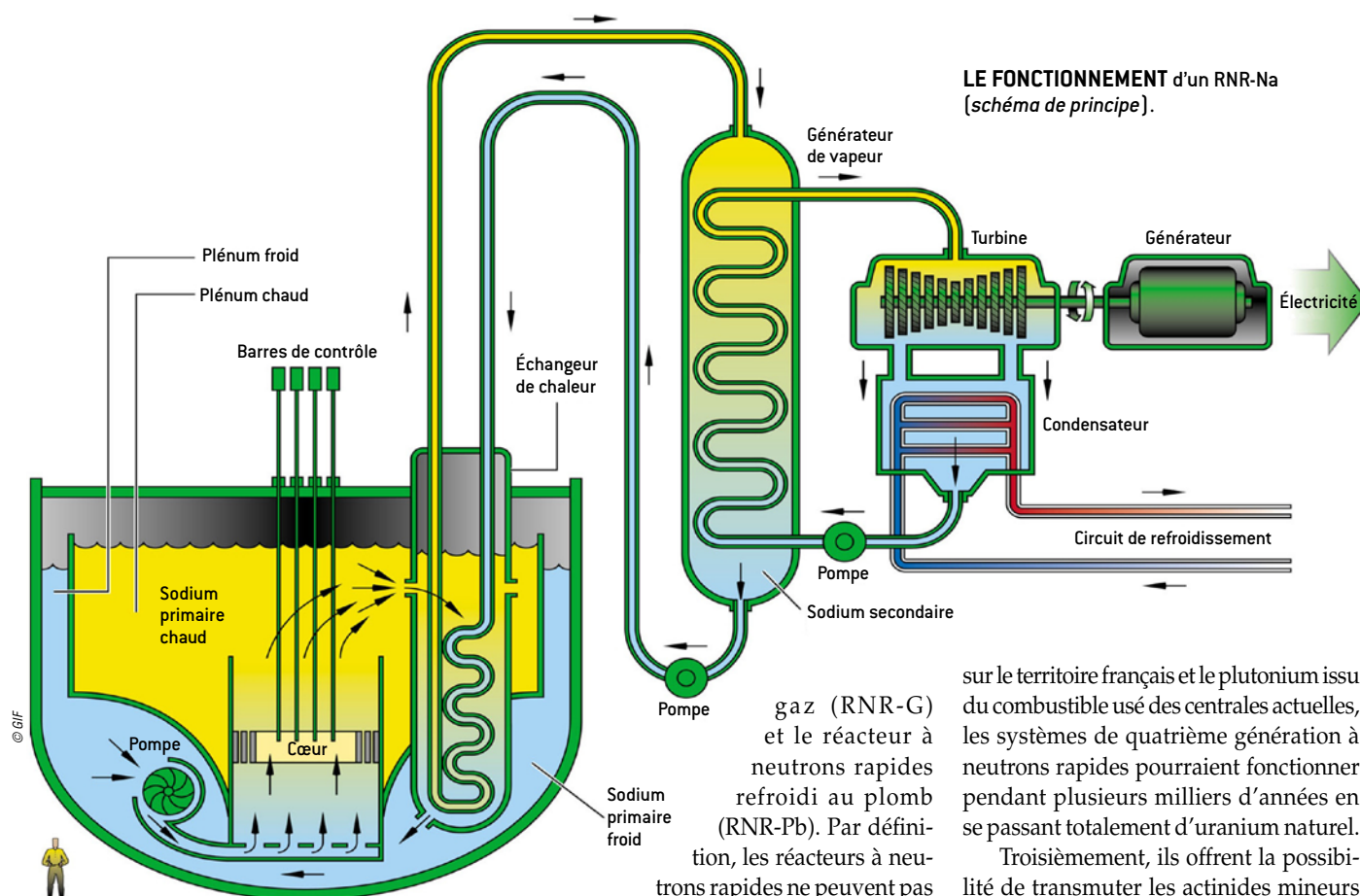




LE FONCTIONNEMENT d'un RNR-Na
[schéma de principe].

systèmes a été réalisée dans le cadre du Forum international Génération IV (GIF). Cette association intergouvernementale, lancée en 2000 à l'initiative des États-Unis, regroupe treize membres : l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Chine, les États-Unis, Euratom, la France, le Japon, la Corée du Sud, le Royaume-Uni, la Russie et la Suisse. Elle élabore et pilote des programmes coordonnés de recherche et développement en support aux systèmes nucléaires, qui doivent satisfaire aux critères de cette quatrième génération de réacteurs : durabilité, économie des ressources en uranium, poursuite des progrès en compétitivité et en sûreté atteints sur les réacteurs à eau de troisième génération, minimisation de la production de déchets radioactifs, plus grande résistance à la prolifération nucléaire, application de l'énergie nucléaire à d'autres voies que la production d'électricité.

Le GIF a sélectionné six concepts de réacteur, dont trois sont intrinsèquement à neutrons rapides : le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), le réacteur à neutrons rapides refroidi au

gaz (RNR-G) et le réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb (RNR-Pb). Par définition, les réacteurs à neutrons rapides ne peuvent pas comporter dans leur cœur d'éléments modérateurs des neutrons, ce qui est le cas de l'eau, par exemple. Le choix du caloporteur se limite à quelques matériaux présentant une bonne transparence aux neutrons, pour l'essentiel des métaux fondus (sodium ou plomb) ou des gaz (hélium).

L'énergie des neutrons rapides est typiquement plusieurs centaines de fois supérieure à celle des neutrons thermiques des réacteurs du parc actuel. Les systèmes à neutrons rapides (RNR) présentent de ce fait trois intérêts majeurs.

Premièrement, ils peuvent utiliser sans limitation tout le plutonium produit par le parc actuel des réacteurs à eau légère ou par eux-mêmes, ce qui permet d'assurer une gestion rationnelle et pérenne du plutonium, justifiant ainsi pleinement son statut de matière énergétique valorisée.

Deuxièmement, ils peuvent brûler tout type d'uranium, alors que dans les systèmes actuels, seul l'uranium 235 (un isotope minoritaire) est utilisé. En permettant de valoriser la totalité de l'uranium extrait du sol, ils multiplient par un facteur proche de 100 l'énergie que l'on peut extraire d'une masse donnée d'uranium naturel. Avec l'uranium appauvri présent

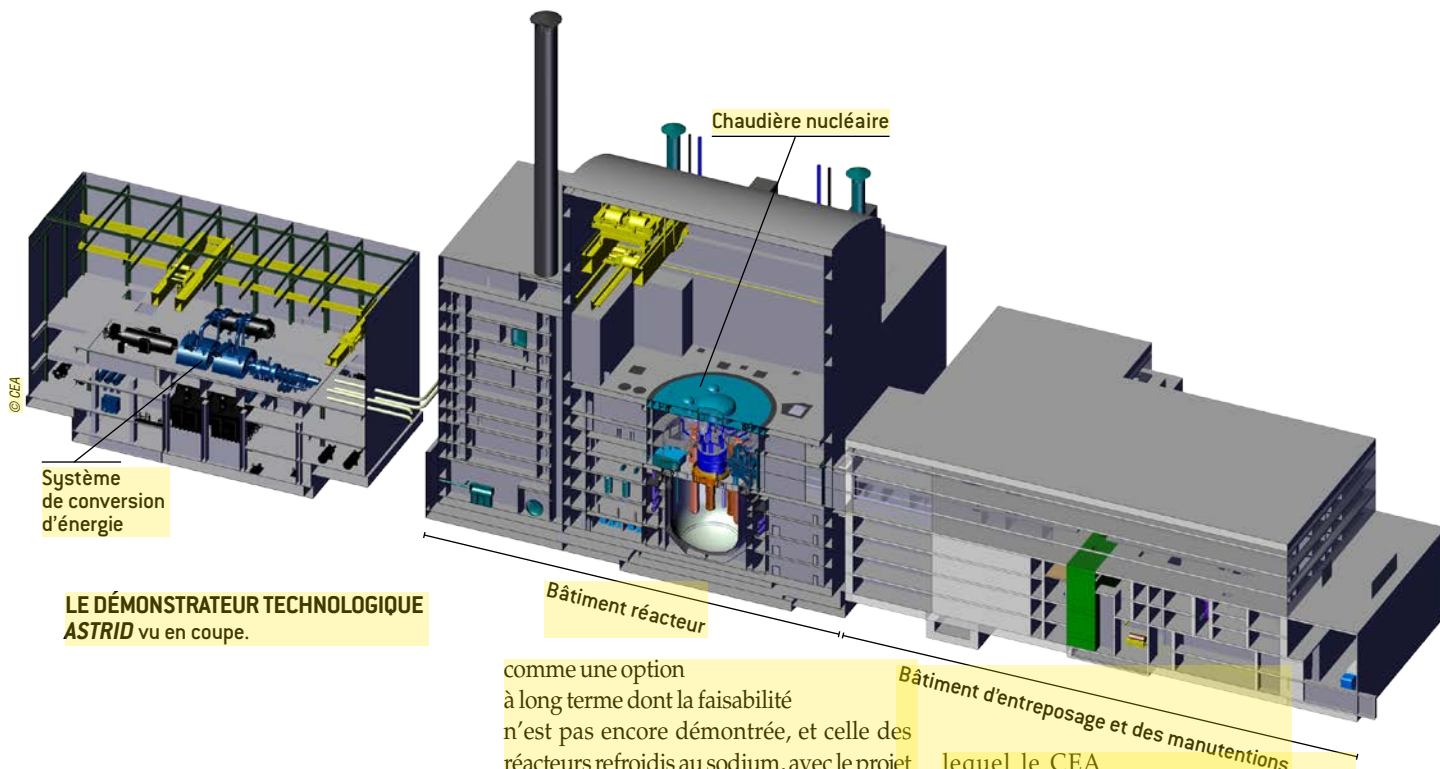
sur le territoire français et le plutonium issu du combustible utilisé des centrales actuelles, les systèmes de quatrième génération à neutrons rapides pourraient fonctionner pendant plusieurs milliers d'années en se passant totalement d'uranium naturel.

Troisièmement, ils offrent la possibilité de transmuter les actinides mineurs (l'américium, par exemple), qui sont les principaux contributeurs de l'émission de chaleur et de la radiotoxicité résiduelle à long terme des déchets ultimes. Il est ainsi possible d'envisager une réduction d'un facteur 10 de l'emprise de la zone de stockage des déchets de haute activité à vie longue, et, au bout de 300 ans, une diminution jusqu'à un facteur 100 de la radiotoxicité contenue dans ces déchets.

Les RNR représentent donc la composante clé d'une stratégie de cycle fermé permettant de gérer efficacement les matières valorisables présentes dans les combustibles usés, d'abord ceux d'un parc de réacteurs à neutrons thermiques, puis ultérieurement ceux d'un parc homogène de réacteurs à neutrons rapides.

Une filière de référence

Au sein du CEA, la Direction de l'énergie nucléaire est chargée de mener pour la France les recherches sur ces systèmes nucléaires en rupture technologique forte par rapport aux précédentes générations de réacteurs du même type. Les recherches se concentrent sur deux filières à neutrons rapides : celle des réacteurs refroidis au gaz, qui apparaît



LE DÉMONSTRATEUR TECHNOLOGIQUE
ASTRID vu en coupe.

comme une option à long terme dont la faisabilité n'est pas encore démontrée, et celle des réacteurs refroidis au sodium, avec le projet de démonstrateur technologique *Astrid* (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*), dont le CEA est maître d'ouvrage pour les études.

« En France, les études sont pilotées par le CEA autour du projet *Astrid*. »

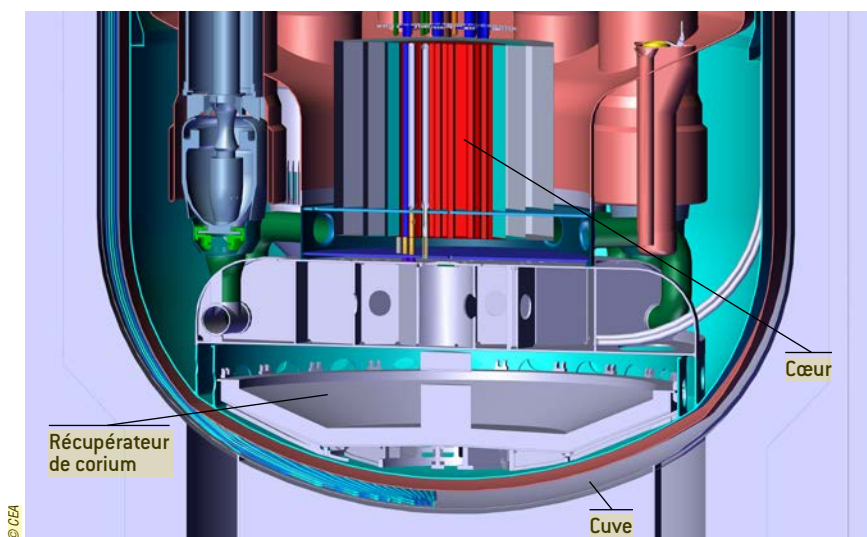
Le concept de RNR refroidi au gaz représente une option à long terme, car les verrous technologiques à lever sont importants (à titre d'exemple, il nécessite le développement de matériaux résistants à de très hautes températures et de systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle). Son développement s'appuie sur un projet de réacteur expérimental de petite taille, nommé *Allegro*, dont la conception est portée par un consortium européen constitué de quatre instituts de recherche-développement (VUJE Slovaquie, UJV République tchèque, MTA-EK Hongrie, NCBJ Pologne), pour

lequel le CEA

intervient en soutien. Le premier prototype, non électrogène dans un premier temps, sera nécessairement de très faible puissance, et ne saurait fonctionner avant 2030.

Le concept de RNR refroidi au sodium est la filière de référence pour les RNR de quatrième génération, avec une dimension internationale potentielle et une maturité qui pourrait être atteinte pour la seconde moitié de ce siècle en France, et probablement plus tôt dans d'autres pays. En France, les études sont pilotées par le CEA, autour du projet *Astrid*, qui bénéficiera de l'expérience des RNR ayant déjà fonctionné dans le monde, mais qui sera en rupture technologique complète avec eux.

Le choix du sodium comme fluide caloporteur découle d'une analyse multicritère. Outre le fait qu'il ne ralentit pas les neutrons – condition essentielle pour les RNR –, le sodium liquide est doté de bonnes propriétés thermiques (conductivité, évacuation de la chaleur) et d'une faible viscosité, ce qui en fait un excellent caloporteur. Il est faiblement activé par les neutrons, ce qui évite de produire de grandes quantités de déchets radioactifs. Il est peu corrosif, ce qui le rend compatible avec les aciers. En outre, il offre d'excellentes garanties en termes de sûreté ; sa faible inertie thermique confère ainsi aux RNR-Na un excellent comportement en cas de perte de source froide externe (atmosphère, eau). Ses principaux inconvénients résident en son opacité (qui complique certaines opérations d'inspection ou de maintenance) et en sa forte réactivité chimique avec l'eau



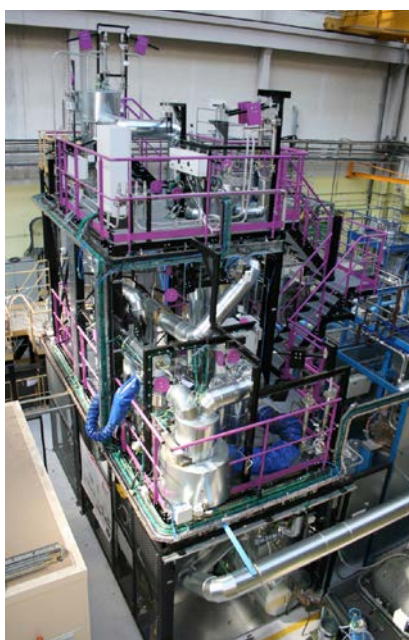
LE RÉACTEUR D'ASTRID, avec son récupérateur de corium.

et l'oxygène de l'air. Ils sont suffisamment bien connus pour permettre de développer des parades efficaces ; ainsi, l'utilisation du sodium ne constitue pas un frein à l'atteinte des objectifs de la quatrième génération. Autre avantage, les RNR-Na ont fait l'objet de nombreux projets dans le monde qui ont permis d'accumuler plus de 400 années-réacteur d'exploitation, dont 100 en exploitation industrielle. Ils constituent, par ailleurs, la voie aujourd'hui retenue en référence par l'ensemble des pays qui se sont engagés dans le développement de RNR de cette nouvelle génération.

Des options innovantes

Le déploiement industriel de RNR-Na de quatrième génération nécessite la qualification préalable, à une échelle représentative, des diverses avancées technologiques appelées par les objectifs de performance assignés à la quatrième génération de réacteurs nucléaires. C'est dans ce contexte que le démonstrateur technologique *Astrid* a été proposé par le CEA et ses partenaires. Sa puissance (1500 mégawatts thermiques, soit environ 600 mégawatts électriques) a été définie pour concilier une flexibilité d'utilisation suffisante et la nécessaire représentativité au regard des principaux aspects industriels.

La phase de R&D qui se poursuit permet des choix d'options particulièrement avancés, notamment en matière de sûreté et d'exploitabilité. Parmi les avancées décisives réalisées par le CEA et ses partenaires figurent les éléments suivants : un cœur innovant, naturellement résistant aux situations accidentelles, qui confère au réacteur un comportement naturel favorable en cas de perte de refroidissement et qui constitue une avancée essentielle, unique au monde, dans le domaine de la sûreté ; un système de conversion d'énergie qui n'utilise pas d'eau, mais un gaz, supprimant ainsi toute possibilité d'interaction de l'eau et du sodium ; un récupérateur de cœur fondu (le corium) intégré à la cuve du réacteur ; des dispositions d'inertage (l'utilisation d'un gaz inerte comme l'azote pour supprimer les risques de réaction du sodium avec l'air) et de détection précoce de fuites qui éliminent les risques de feu de sodium ; des moyens multiples et redondants d'évacuation de la puissance résiduelle, le réacteur pouvant en outre utiliser l'atmosphère comme moyen de



MOYENS D'ÉTUDES et de développement du système de conversion d'énergie d'*Astrid*, qui utilise un échangeur de chaleur sodium-gaz.

MOYENS D'ESSAIS de systèmes de détection de fuite sur les tuyauteries du circuit de sodium secondaire d'*Astrid*.



refroidissement, même en cas de perte des alimentations électriques et de la source froide. De plus, la conception de ce système prend en compte les besoins d'inspection en service pendant toute la durée de vie du réacteur. *Astrid* intègre également des dispositions qui permettent de réduire la durée des arrêts pour le rechargement du combustible et d'augmenter le taux de combustion ainsi que la durée de cycles.

Des collaborations nombreuses

Pour la mise en œuvre du projet *Astrid*, le CEA est entouré d'industriels partenaires qui participent aux études au travers d'accords de collaboration prévoyant une contribution sur leurs fonds propres. Ce projet implique d'ores et déjà 600 personnes, dont près de la moitié sont le personnel de ces partenaires. Tandis que la maîtrise d'ouvrage et le pilotage du projet sont assurés par le CEA, de nombreux industriels, français mais aussi étrangers, y participent : Areva intervient dans le domaine de la chaudière (c'est-à-dire du cœur jusqu'au générateur de vapeur), du contrôle commande et des auxiliaires nucléaires ; EDF est impliqué dans la R&D et l'assistance à la maîtrise d'ouvrage ; Alstom intervient dans le domaine du système de conversion d'énergie ; Bouygues le fait sur le génie civil et la ventilation ; Comex Nucléaire se consacre principalement sur la problématique de l'inspection en service ; Jacobs France travaille sur les moyens communs et les infrastructures ; Toshiba collabore sur