



## Les réacteurs du futur: pour du courant à très long terme

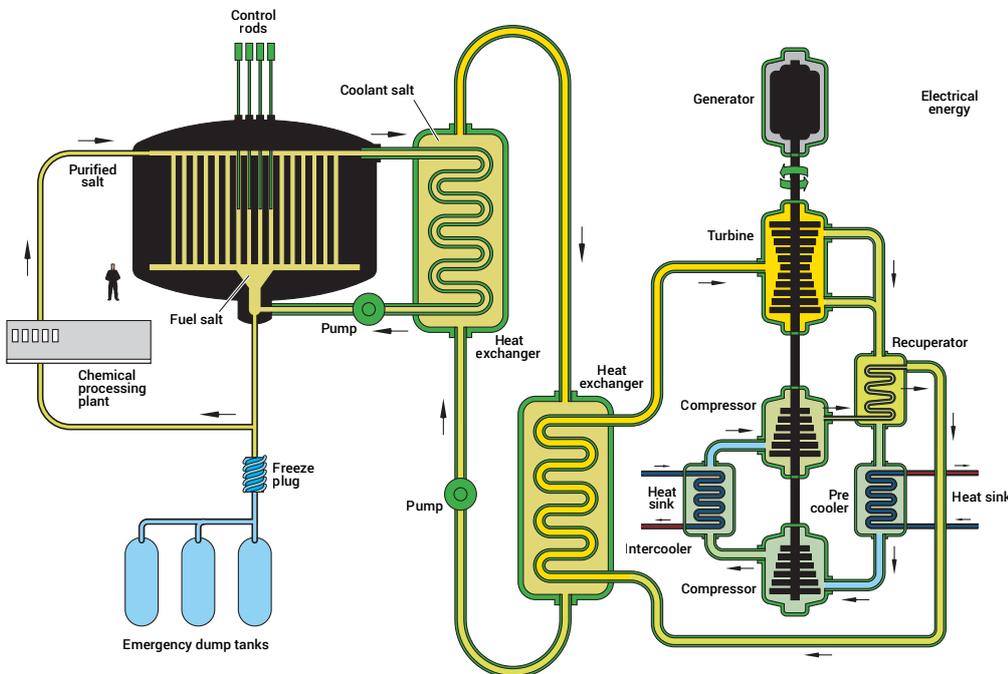
**Les centrales nucléaires qui sont construites actuellement appartiennent, pour la plupart, à la troisième génération. La prochaine étape concerne les petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactors, SMR), déjà disponibles: les premiers prototypes et installations de démonstration sont en construction, voire en fonctionnement. Toutefois, les scientifiques travaillent désormais sur des réacteurs pour la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle.**

▲ *Le futur se prépare maintenant: La centrale nucléaire chinoise de démonstration à Shidao Bay, qui comprend un réacteur haute température à lit de boulets du type HTR-PM, est en exploitation depuis fin 2021. Source: Université de Tsinghua*

En combinaison avec les énergies renouvelables, les systèmes dits de la quatrième génération apporteront une contribution majeure à la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'humanité à long terme. Sur l'initiative des États-Unis, neuf pays se sont réunis en 2000 pour créer le «Generation IV International Forum» (GIF) qui regroupe désormais la Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom) et 13 pays, dont la Suisse. L'objectif est de développer d'ici 2040 de nouveaux réacteurs et cycles de combustibles permettant de réduire drastiquement la consommation des ressources, la quantité de déchets radioactifs et les possibilités de détournement pour la fabrication d'armes nucléaires. Le GIF a sélectionné six systèmes de réacteurs en vue de leur développement. Trois d'entre eux sont des surgénérateurs (Fast Reactors).

À l'intérieur de ces réacteurs, les neutrons, qui entretiennent la réaction en chaîne, se déplacent sans être ralentis. Ces types de réacteur n'ont pas besoin de modérateur. Que cela concerne le Molten Salt Reactor (réacteur à sels fondus) ou le Supercritical Water-cooled Reactor (réacteur refroidi à l'eau supercritique): les concepts peuvent être avec des neutrons rapides mais aussi avec un modérateur thermique. Selon le type de réacteur, le modérateur peut être de l'eau (légère) normale, de l'eau lourde, ou du graphite.

*Des informations sur le « Generation IV International Forum» sont disponibles sur le site: [www.gen-4.org](http://www.gen-4.org).*



◀ Molten Salt Reactor (MSR)  
Source: Generation IV International Forum

### Le Gas-cooled Fast Reactor (GFR) ou réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz (RNR-G):

Réacteur à neutrons rapides haute température refroidi du gaz (hélium) avec cycle du combustible fermé; développement des réacteurs Magnox et AGR britanniques actuels. Le GFR allie les propriétés du réacteur à neutrons rapides (moins de déchets grâce à un retraitement multiple du combustible et fission des actinides à longue durée de vie) et celles des réacteurs haute température (rendement élevé du cycle thermique et utilisation industrielle de la chaleur produite, par ex. pour la production d'hydrogène).

### Le Lead-cooled Fast Reactor (LFR) ou réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb (PNR-Pb):

Réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb avec cycle du combustible fermé; développement de petits réacteurs actuels utilisés pour la propulsion navale. Le concept LFR se distingue par une sécurité passive élevée. L'utilisation du plomb comme caloporteur permet de faire fonctionner le réacteur à basse pression. Le point d'ébullition est particulièrement élevé, ce qui rend quasiment impossible une évaporation du caloporteur. Par ailleurs, le plomb est moins réactif, ce qui empêche, par exemple, les explosions d'hydrogène, et retient les produits de fission.

### Le Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) ou réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na):

Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium avec cycle du combustible fermé; développement de systèmes de réacteur utilisés depuis des décennies. Le refroidissement avec du sodium liquide offre une densité énergétique élevée pour une faible quantité de caloporteur, et permet de faire fonctionner le réacteur à basse pression. Tandis

que l'environnement exempt d'oxygène empêche la corrosion, le sodium réagit chimiquement avec l'air et l'eau et impose un système de refroidissement fermé.

### Le Molten Salt Reactor (MSR) ou réacteur à sels fondus (RSF):

Réacteur à sels fondus; combustible et caloporteur sous forme liquide à base de fluorure d'uranium. Un MSR expérimental était en service aux États-Unis dans les années 1960. Ces réacteurs présentent le potentiel de diminuer considérablement la quantité des déchets radioactifs produits. Ces concepts permettent d'exclure toute fusion du cœur et l'exploitation est possible également à basse pression. Les SMR rapides peuvent aussi fonctionner avec du thorium.

### Le Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR) ou réacteur à eau légère supercritique (RESC):

Les réacteurs à eau légère avec vapeur supercritique; développement des réacteurs à eau bouillante actuels. Ces réacteurs haute température et haute pression fonctionnent au-dessus du point critique thermodynamique de l'eau (374°C, 22,1 MPa). Ils présentent un rendement plus élevé que les réacteurs actuels et ne possèdent ni pompes de refroidissement ni générateur ou séparateur de vapeur. L'encombrement du confinement nécessaire et des turbines à vapeur peut être sensiblement réduit ici par rapport aux réacteurs traditionnels.

### Le Very High Temperature Reactor (VHTR) ou réacteur à très haute température (RTHT):

Développement des réacteurs haute température actuels, par exemple du réacteur modulaire à lit de boulets. Le VHTR représente l'étape suivante du développement des réacteurs haute température refroidis au gaz. Il s'agit d'un réacteur modéré au

graphite et refroidi à l'hélium, qui fonctionne en spectre de neutrons thermiques. Le VHTR est destiné à la production d'électricité et d'hydrogène, ce dernier étant obtenu à partir de l'eau en recourant à des procédés thermo-chimiques, électrochimiques ou hybrides. Sa température de sortie élevée rend le VHTR intéressant pour les industries chimique, pétrolière et du fer.

Des informations sur la «Sustainable Nuclear Fission Technology Platform» de l'UE sont disponibles sur: [www.snetp.eu](http://www.snetp.eu).

## Un «mangeur de déchets nucléaire» made in Switzerland

L'entreprise genevoise Transmutex SA développe un réacteur au thorium sous-critique refroidi au métal liquide équipé d'un accélérateur de particules, désigné TMX-START (Subcritical transmutation Accelerated Reactor using Thorium). «Sous-critique» signifie que le TMX-START n'est pas en mesure d'entretenir une réaction en chaîne de manière autonome. Des neutrons issus d'un accélérateur de particules sont nécessaires pour produire de l'uranium 233 à partir de thorium 232. Cet uranium fissionne ensuite en libérant de l'énergie. Ainsi, en cas d'interruption de l'alimentation électrique, le flux neutronique s'arrête automatiquement, ce qui entraîne un arrêt automatique du réacteur en quelques millisecondes seulement. Cette interruption du processus de fission nucléaire en cas de panne de l'approvisionnement énergétique interne ou externe induit une importante sécurité passive. Par ailleurs, le refroidissement du métal liquide permet d'évacuer de manière efficace la chaleur de désintégration, ce qui rend impossible toute explosion d'hydrogène.

Le réacteur de Transmutex peut aussi générer des déchets radioactifs combustibles. Les déchets à longue durée de vie sont transformés en déchets à courte durée de vie sous l'effet du bombardement neutronique. Ainsi, à la fin du processus, la quantité de déchets résiduels qui doivent être stockés dans un dépôt profond durant 500 ans est bien plus réduite. Transmutex espère pouvoir présenter un prototype au début des années 2030.

[www.transmutex.com](http://www.transmutex.com)

## Programme de recherche de l'UE

En 2007, l'UE a lancé la «Sustainable Nuclear Fission Technology Platform». Les thèmes de recherche concernent notamment la construction d'un réacteur rapide à caloporteur sodium («Astrid»), d'un réacteur rapide à caloporteur plomb («Alfred»), ainsi que d'un réacteur rapide haute température à caloporteur gaz («Allegrò»). De plus, un réacteur de recherche multidisciplinaire («Myrrha») sera construit à Mol, en Belgique. Il proposera des solutions innovantes en matière de traitement des déchets radioactifs ou de développement de systèmes de réacteurs avancés, et un accélérateur externe sera utilisé (ADS, Accelerator Driven System).

## Technologie d'après-demain

Tous ces projets concernent des installations de démonstration dont la rentabilité n'a pas encore été attestée. En dehors du cadre du GIF, la Russie a mis en service en 2016 un réacteur rapide refroidi au sodium d'une puissance électrique de 800 mégawatts. La Chine et l'Inde souhaitent elles aussi recourir à l'avenir aux réacteurs rapides. Le projet français «Astrid» a, quant à lui, été suspendu en 2019, le recyclage intégral du combustible n'étant pas pertinent au regard des prix actuellement bas de l'uranium naturel.

## Retour vers le futur: des sphères à la place de tubes

La première centrale nucléaire possédant un réacteur à lit de boulets est déjà en exploitation en Chine. Le HTR-PM (High-Temperature Gas-Cooled Reactor – Pebble Bed Module) est implanté à Shidao Bay, dans la province chinoise de Shandong, à environ 600 kilomètres au sud-est de Pékin. Il a été développé à l'Université de Tsinghua, à Pékin, où un réacteur expérimental, le HTR-10, est en exploitation depuis 2003. Cette conception de réacteur, testée en Allemagne il y a plus de cinquante ans déjà, présente un certain nombre de spécificités. Dans les réacteurs à eau légère traditionnels tels que ceux en exploitation en Suisse, le combustible est placé à l'intérieur de tubes fins de plusieurs mètres de long, reliés en faisceaux pour former des assemblages combustibles. Dans le réacteur à lit de boulets, en revanche, le combustible revêt la forme de sphères de la taille d'une balle de tennis. Ces sphères comportent plusieurs couches. Les particules dites Triso (tristructural-isotropic fuel) en constituent les éléments centraux. Il s'agit de microbilles d'environ un millimètre de diamètre à l'intérieur desquelles se trouve le combustible de dioxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>). Dans un premier temps, ce noyau du combustible est entouré de plusieurs couches de graphite (carbone). Le graphite permet de contrebalancer les changements de volume occasionnés par la formation de nouveaux éléments résultant du processus de fission nucléaire. Sans cela, les

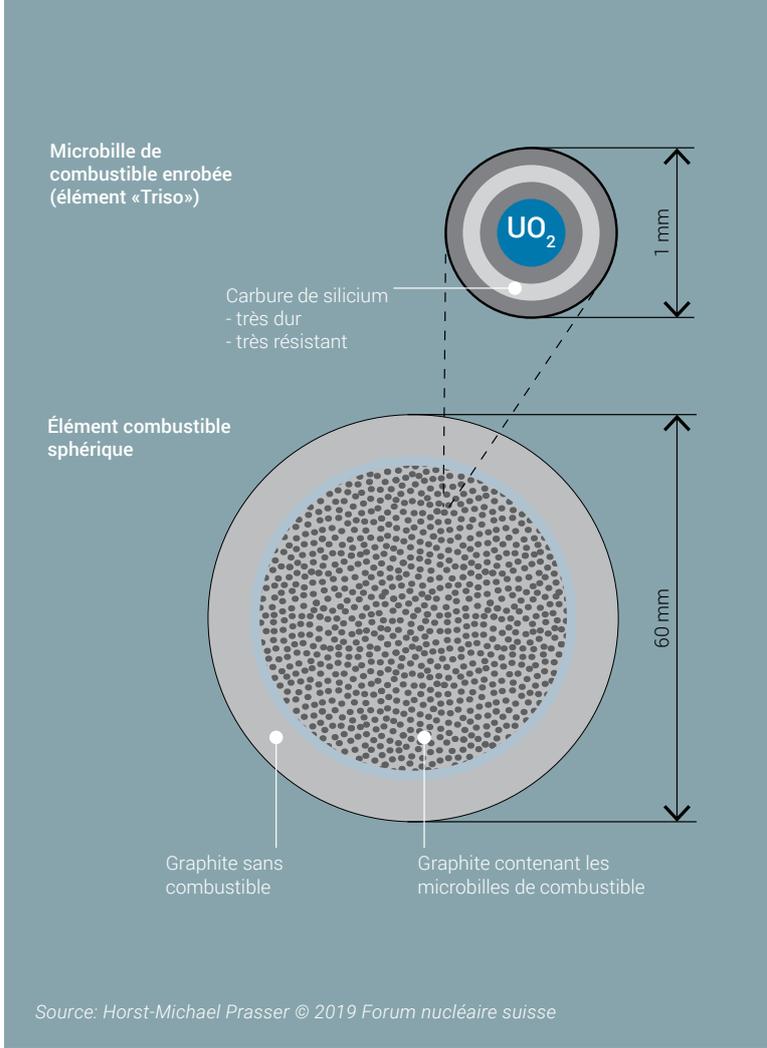
microbilles pourraient se casser. Une couche de protection en carbure de silicium, très résistante chimiquement, entoure les microbilles. Elle est elle-même ensuite entourée d'une couche composée d'un graphite spécial. Tout cela permet de maintenir confinés de manière fiable les produits de fission radioactifs.

### Compressés en une balle de tennis

Ces microbilles bien protégées sont ensuite mélangées à de la poudre de graphite et compressées jusqu'à devenir une sorte de sphère de la taille d'une balle de tennis. Elles sont ensuite enrobées dans une nouvelle couche de graphite exempte de combustible. Le graphite dans lequel sont placées les microbilles agit – en association avec le réflecteur fixé à la paroi du réacteur – comme un modérateur et permet de freiner les neutrons afin de provoquer les réactions de fissions nucléaires. Il en résulte un combustible nucléaire capable de rester intact également à des températures extrêmes. Le procédé à la base de la fabrication de ce combustible a été développé en Allemagne avant d'être repris par des ingénieurs chinois. Les expériences pratiques menées avec ce combustible dans les réacteurs expérimentaux en Allemagne et les tests effectués sur les sphères chinoises au centre de recherche néerlandais de Petten ont montré que si au moment de la fabrication et de l'exploitation, les directives de qualité sont respectées, ce combustible permet de protéger très efficacement contre la libération de matières radioactives, et ce aussi en cas d'accident grave. Cet emballage extrêmement solide présente cependant l'inconvénient que le retraitement en vue du recyclage du combustible est complexe, et que pour une quantité de matières radioactives identique, le volume des déchets est comparativement important.

### Flexible, modulaire, extensible

Le HTR-PM est un système modulaire pouvant au besoin comprendre plusieurs groupes de 200



Source: Horst-Michael Prasser © 2019 Forum nucléaire suisse

mégawatts (équivalent de deux tranches nucléaires), jusqu'à atteindre 600 mégawatts. Il s'agit ici de l'installation standard HTR-PM600, composée de six réacteurs (soit trois modules) pour un seul groupe turbo-alternateur. Deux installations de ce type fournissent au total une puissance comparable à la centrale de Leibstadt, la plus grande de Suisse. En-dehors de la Chine, seuls les États-Unis mènent actuellement des travaux sur les réacteurs à lit de boulets. La ministre de l'Énergie américaine soutient ainsi le développement du Xe-100 par X-energy, d'une puissance électrique de 35 mégawatts.

▼ Représentation du réacteur à double fluide. Source: Dual Fluid

### Une combinaison de plusieurs concepts

L'entreprise germano-canadienne Dual Fluid qualifie son réacteur de «centrale nucléaire de la cinquième génération». Le Dual Fluid, du même nom que l'entreprise, est breveté. Il s'agit d'un réacteur à neutrons rapides fonctionnant avec du combustible liquide et une boucle de refroidissement séparée au plomb liquide. La technologie combine ainsi les propriétés de sécurité passives du LFR et celles du MSR. Afin d'offrir une protection supplémentaire, des bouchons fusibles intégrés sont placés dans les

conduites: lorsque la température prévue est malgré tout dépassée, ces bouchons cèdent, ce qui permet l'évacuation du combustible. Celui-ci s'écoule alors vers le bas dans des conteneurs et la réaction en chaîne est immédiatement stoppée. Son faible encombrement permet au réacteur d'être placé en toute sécurité dans un bunker en béton souterrain. Plusieurs unités peuvent être combinées pour former une grosse centrale, ce qui fait que le Dual-Fluid peut être qualifié de petit réacteur modulaire (SMR).

[www.dual-fluid.com](http://www.dual-fluid.com)

