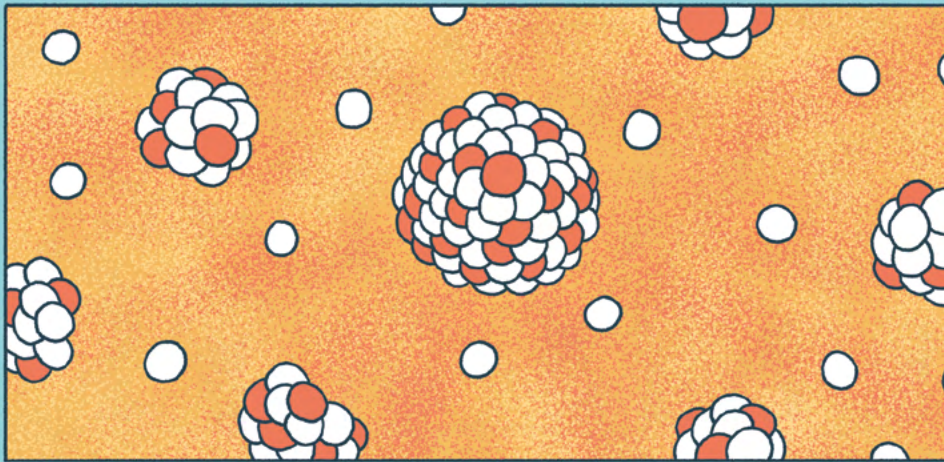


TOUT S'EXPLIQUE

PAR AUDE GANIER,
EN COLLABORATION AVEC
GUILLAUME CAMPIONI (CEA-ISAS)



MSR, convertisseur d'actinides ?

Ébauchée dans les années 1960, la technologie des réacteurs à sels fondus revient sur le devant de la scène nucléaire.

De nombreuses sociétés s'y intéressent, telles Orano ou Terrapower soutenue par Bill Gates, tandis que la Chine s'apprête à mettre en service un réacteur expérimental et annonce une commercialisation pour 2030. Au CEA, le réacteur à sels fondus MSR (*Molten Salt Reactor*) fait l'objet d'un projet pour en étudier la faisabilité et identifier les verrous techniques. Au-delà de la production d'énergie, le concept sélectionné vise la fermeture du cycle uranium-plutonium en y intégrant la transmutation des actinides mineurs (voir p. 29).

L'enjeu de la transmutation

Depuis la loi Bataille de 1991, le CEA a analysé la faisabilité de la transmutation en considérant différentes technologies de réacteurs. Ses études ont mis en évidence l'intérêt des réacteurs à neutrons rapides (RNR) lors d'essais

réalisés dans le réacteur Phénix. Elles ont également révélé des difficultés techniques et industrielles : dosimétrie accrue lors des opérations de fabrication du combustible ; augmentation de la puissance thermique des matières impactant cette fabrication par métallurgie des poudres ; conditions de réalisation des transports entre les usines du cycle et le réacteur.

La piste des MSR

Dès lors, le CEA explore la piste d'un réacteur à neutrons rapides à sels fondus. L'élément différenciant : le combustible liquide qui peut notamment rester en quasi-continu dans le cœur du réacteur. Par ailleurs, les opérations de traitement du combustible peuvent se dérouler en partie *in situ*, en chaîne blindée. Pour l'heure, la maturité technologique d'un MSR convertisseur d'actinides est basse et ses verrous importants, essentiellement dus à la méconnaissance de la chimie du sel chlorure et de la résistance des matériaux à la corrosion. C'est l'objectif d'un projet proposé par le CEA, Orano, EDF, Framatome et le CNRS en vue du soutien de la BPI.

ZOOM

2 familles de réacteurs

Il existe différentes filières de réacteur à fission nucléaire : neutrons thermiques, neutrons rapides, cogénérateur, incinérateur, etc. La plupart utilisent du combustible solide sous forme de pastilles d'oxyde (cas des réacteurs actuels et de ceux à neutrons rapides) ; d'autres, du combustible liquide sous forme de sels fondus. Tous contiennent de l'uranium et parfois du plutonium.

Sûreté : un arbre des défaillances réduit

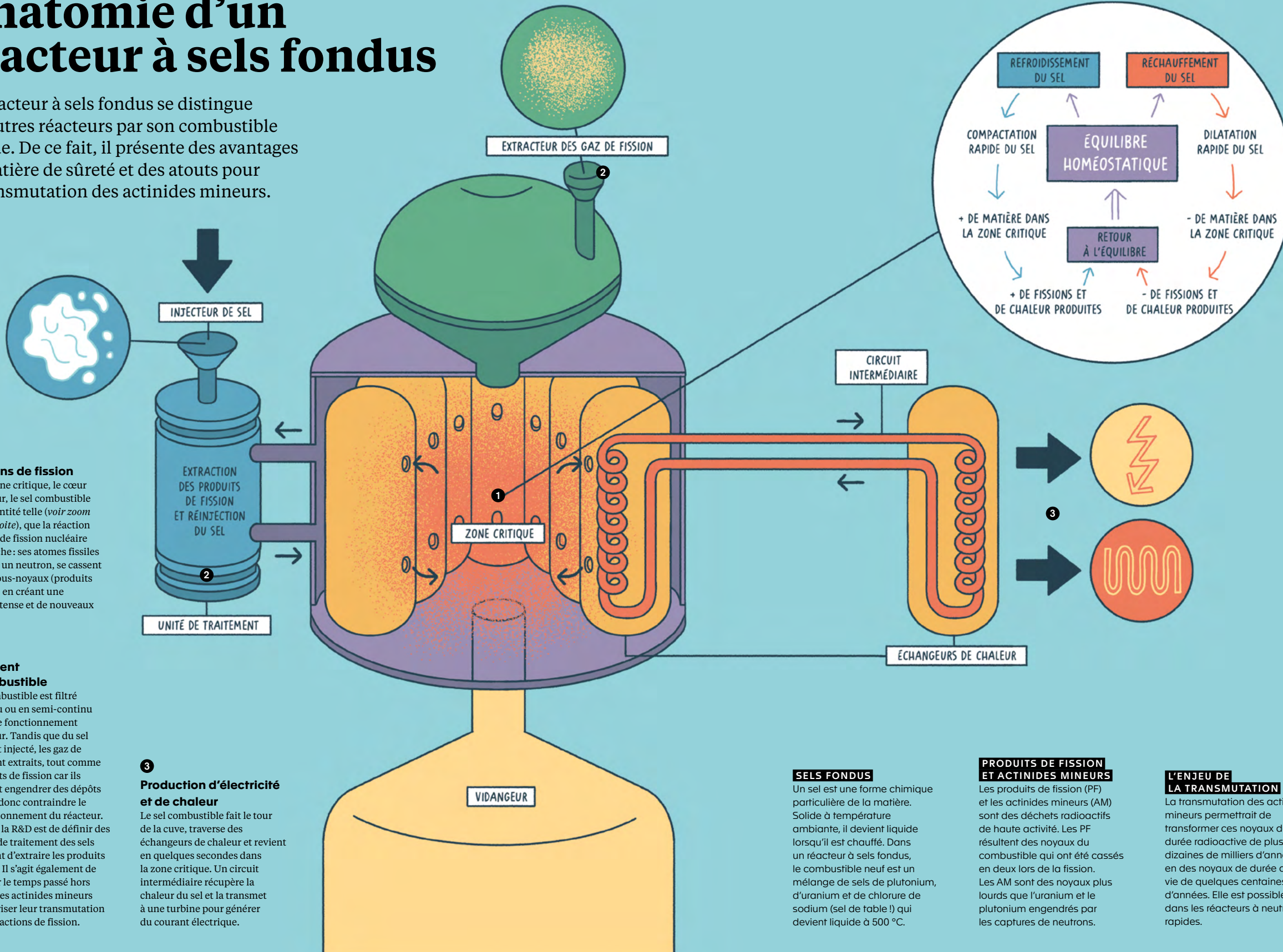
Un arbre des défaillances est une représentation des grandes caractéristiques d'un système (en l'état, un réacteur nucléaire) pouvant générer des incidents, voire des accidents. Chaque caractéristique (par exemple, la forte pression) requiert des systèmes de surveillance et de contrôle (branches de l'arbre). Or, ces derniers peuvent être défaillants. Des parades sont prévues par des sous-systèmes, ce qui complexifie le réacteur. Un des intérêts d'un réacteur à sels fondus est que son arbre des défaillances est réduit. Ses principaux avantages pour la sûreté sont :

- Équilibre homéostatique du combustible liquide : la stabilité intrinsèque du système ne nécessite pas de barres de commande a priori pour être piloté.
- Évacuation de la puissance résiduelle grâce à des systèmes de vidange et de refroidissement passif.
- Pas de forte pression : le système fonctionne à pression atmosphérique.
- Pas de réaction chimique explosive avec le sel.



Anatomie d'un réacteur à sels fondus

Un réacteur à sels fondus se distingue des autres réacteurs par son combustible liquide. De ce fait, il présente des avantages en matière de sûreté et des atouts pour la transmutation des actinides mineurs.



1 Réactions de fission
 Dans la zone critique, le cœur du réacteur, le sel combustible est en quantité telle (voir zoom page de droite), que la réaction en chaîne de fission nucléaire se déclenche : ses atomes fissiles absorbent un neutron, se cassent en deux sous-noyaux (produits de fission) en créant une chaleur intense et de nouveaux neutrons.

2 Traitement du combustible
 Le sel combustible est filtré en continu ou en semi-continu pendant le fonctionnement du réacteur. Tandis que du sel « neuf » est injecté, les gaz de fission sont extraits, tout comme les produits de fission car ils pourraient engendrer des dépôts solides et donc contraindre le bon fonctionnement du réacteur. L'enjeu de la R&D est de définir des procédés de traitement des sels permettant d'extraire les produits de fission. Il s'agit également de minimiser le temps passé hors du cœur des actinides mineurs pour favoriser leur transmutation lors des réactions de fission.

3 Production d'électricité et de chaleur
 Le sel combustible fait le tour de la cuve, traverse des échangeurs de chaleur et revient en quelques secondes dans la zone critique. Un circuit intermédiaire récupère la chaleur du sel et la transmet à une turbine pour générer du courant électrique.

SELS FONDUS
 Un sel est une forme chimique particulière de la matière. Solide à température ambiante, il devient liquide lorsqu'il est chauffé. Dans un réacteur à sels fondus, le combustible neuf est un mélange de sels de plutonium, d'uranium et de chlorure de sodium (sel de table !) qui devient liquide à 500 °C.

PRODUITS DE FISSION ET ACTINIDES MINEURS
 Les produits de fission (PF) et les actinides mineurs (AM) sont des déchets radioactifs de haute activité. Les PF résultent des noyaux du combustible qui ont été cassés en deux lors de la fission. Les AM sont des noyaux plus lourds que l'uranium et le plutonium engendrés par les captures de neutrons.

L'ENJEU DE LA TRANSMUTATION
 La transmutation des actinides mineurs permettrait de transformer ces noyaux de durée radioactive de plusieurs dizaines de milliers d'années en des noyaux de durée de vie de quelques centaines d'années. Elle est possible dans les réacteurs à neutrons rapides.

ZOOM Homéostasie du combustible, un bonus pour la sûreté
 Un réacteur à sels fondus est un système homéostatique c'est-à-dire qu'il s'autorégule. Lorsque la température du sel combustible augmente, il se dilate et une partie sort de la zone critique qui en contient donc moins. De fait, le nombre de réactions diminue, ainsi que la chaleur de fission nucléaire produite. Inversement, si la température baisse, le sel se contracte et revient au centre, ce qui augmente le nombre de fissions et la température. Cet ajustement naturel permet l'équilibre entre le nombre de fissions et la quantité de matière dans la zone critique. Gage de stabilité, il s'effectue à une vitesse très rapide, de l'ordre de la microseconde.

RÉACTEUR À NEUTRONS RAPIDES
 Les réacteurs à neutrons rapides permettent de créer des atomes fissiles à partir d'atomes fertiles (devenant fissiles par absorption d'un neutron) : ils peuvent donc produire du plutonium à partir d'uranium appauvri. Le bilan est tel qu'ils peuvent produire autant de matière fissile qu'ils en consomment. Avec un stock de 350 000 tonnes d'uranium appauvri, la France dispose ainsi d'une capacité de production de 40 siècles d'électricité.