

Mars 2022

# BULLETIN 1



## Rétrospective: les centrales nucléaires dans le monde en 2021

Page 14

## Un concept éprouvé revoit le jour

Page 6

## Nouvelle rubrique «Décryptage»: perception versus réalité

Page 19

## La technique de réacteur en provenance de Suisse

Page 33

# Table des matières

## Éditorial

---

Une formule éprouvée sous un nouvel habit 1

## Entretien avec...

---

Tchéquie: vers le chauffage à distance à partir de déchets nucléaires 2

## Informations de fond

---

Chine: la tranche de démonstration du réacteur à lit de boulets est connectée au réseau 6

Taxinomie de l'UE: l'octroi du label vert au nucléaire et au gaz enflamme le débat 11

Les centrales nucléaires dans le monde en 2021 14

## Décryptage

---

Le pouvoir des images mentales 19

## Brèves nucléaires

---

Suisse 21

À l'étranger 22

## La der nucléaire

---

L'énergie nucléaire, un élément de solution à la problématique du changement climatique? 27

## Couac!

---

Campagne de tweets du WWF: une bonne leçon, mais pour qui? 32

## Nouvelles internes

---

La start-up suisse Transmutex développe un nouveau réacteur à base de thorium 33

## Pour mémoire

---

36

Image du titre:

Enceinte de confinement de la tranche Vogtle 4, aux États-Unis (Photo: Georgia Power Company)

## Une formule éprouvée sous un nouvel habit



**Marie-France Aepli**

Rédactrice en chef du «Bulletin»

Le Bulletin de l'été dernier était accompagné d'un questionnaire de satisfaction destiné à recueillir les avis de nos lecteurs et lectrices à son propos. En tant que rédactrice en chef, je tiens à vous remercier chaleureusement de vos nombreuses réponses. Un grand merci également pour les éloges exprimés. Vous avez été plus de 90% à juger l'actualité des articles «bonne» à «très bonne», et plus de 80% à attribuer ces mêmes notes au choix des thèmes, à la langue et à la facilité de lecture. Les trois-quarts des personnes ayant participé à l'enquête qualifient le Bulletin d'informatif et presque autant sont d'avis qu'il couvre des sujets importants.

Mais trêve d'autocongratulation. Même si ces résultats nous réjouissent et nous confortent dans notre travail, il n'en demeure pas moins que des critiques ont aussi été formulées. Ainsi, seules 25% des personnes interrogées considèrent la conception visuelle et la mise en page du Bulletin comme «très bonnes». Il s'agit là d'un chiffre particulièrement bas au regard du reste de l'enquête. Et presque 30% souhaiteraient voir plus de graphiques et de photos dans le magazine. Cela tombe bien, car nous avons de toute manière prévu de remanier la mise en page et le code couleurs du Bulletin.

Vous tenez entre vos mains le résultat de cette refonte et avez sans aucun doute déjà remarqué un premier changement en ouvrant l'enveloppe: le Bulletin contient désormais des photos en couleurs, tant sur la page de couverture qu'à l'intérieur, ce qui le rend plus vivant et plus attrayant. Les technologies d'impression modernes étant à la fois performantes et de plus en plus économiques, il n'y a aujourd'hui plus guère de raisons de renoncer à la couleur. Nous avons également à cœur de répondre au souhait de voir davantage d'illustrations.

Au fil des pages, vous constaterez que le reste du magazine est aussi plus coloré. Nous entendons ainsi, d'une part, nous adapter au progrès technique et, d'autre part, donner au Bulletin un aspect plus contemporain afin d'élargir le cercle de nos lecteurs et lectrices. La nouvelle police de caractères devrait par ailleurs améliorer la lisibilité. Nous avons délibérément opté pour une présentation douce avec une utilisation plutôt sobre des couleurs.

Sur le fond, il n'y guère de changements: après tout, le Bulletin n'est pas un magazine de boulevard et même sous son nouvel habit, c'est par le sérieux de son contenu et non par des couleurs criardes qu'il entend marquer des points. La rubrique Forum, consacrée aux interviews, a été rebaptisée «Entretien avec...», et les nouvelles publiées sur notre site Internet sont désormais résumées non plus sous le titre de «Reflets de l'E-Bulletin», mais sous celui de «Brèves nucléaires». Un recueil d'articles de journaux étant dorénavant disponible en ligne via notre lettre d'information, la Revue de presse a été supprimée, et la rubrique «Décryptage», nouvellement créée, permet à nos auteurs de jeter un regard plein de bon sens et parfois de piquant sur la branche.

En espérant que ces nouveautés vous plairont, je vous souhaite une bonne lecture!

## Tchéquie: vers le chauffage à distance à partir de déchets nucléaires



### Prof. Radek Škoda

Le professeur Radek Škoda dirige le développement du Teplator

Photo: ZČU

En République tchèque, les grandes villes sont approvisionnées en chaleur par des installations de chauffage à distance. Bon nombre des centrales de chauffe actuellement en service fonctionnent encore au charbon et doivent donc être remplacées. Il est évident qu'un passage au gaz naturel ne résoudrait pas le problème des émissions de CO<sub>2</sub> de manière pérenne. Mais une solution se profile sous la forme d'un réacteur nucléaire d'un type nouveau, qui promet une empreinte écologique minimale. Le professeur Radek Škoda, chercheur dans le domaine du nucléaire, nous explique ce qui rend son «Teplator» si particulier.

### Comment fonctionne le Teplator?

Le Teplator est un réacteur nucléaire refroidi et modéré à l'eau lourde, comparable de par sa conception au Candu canadien (cf. encadré à la page 10). Des assemblages combustibles usés issus de réacteurs existants ou des assemblages combustibles à base d'uranium légèrement enrichi (Slightly Enriched Uranium, SEU) sont placés dans 55 canaux à basse pression ou pression atmosphérique à l'intérieur de la cuve à eau lourde (cf. graphique), qui est entourée d'un réflecteur en graphite. L'ensemble du réacteur tient dans un cube de six mètres de côté, et la surface totale de la centrale de chauffe est d'environ 2000 mètres carrés.

### Comment vous est venue l'idée d'utiliser les assemblages combustibles usés de réacteurs nucléaires pour chauffer de l'eau?

Aujourd'hui, rares sont les assemblages combustibles usés qui ont été utilisés jusqu'à la limite de combustion autorisée ou jusqu'à leur limite de conception. Ce combustible irradié contient donc encore une grande quantité d'énergie, que les réacteurs actuels ne peuvent pas utiliser. Et il y a des milliers d'assemblages combustibles

### Radek Škoda

Radek Škoda a obtenu son diplôme en physique expérimentale des particules à l'université de Bergen en 1998 et son doctorat en génie nucléaire à l'université ČVUT de Prague en 2002. Après avoir décroché un nouveau diplôme, en économie cette fois, il a travaillé dans le domaine de la «finance quantitative» pour des banques de Dublin et de Londres, avant de commencer à enseigner à la ČVUT et à la ZČU et d'intervenir comme professeur invité dans d'autres universités renommées. Radek Škoda a également été directeur du Nuclear Science Center à la Texas A&M University, où il a mené des expériences sur des réacteurs nucléaires. Auparavant, il a conseillé le gouvernement tchèque en matière de stratégie énergétique. Aujourd'hui, il dirige un groupe de recherche nucléaire en République tchèque et codirige l'Intercontinental Nuclear Institute.

de ce type à côté de chaque centrale nucléaire, que ce soit dans des piscines de refroidissement ou dans des dépôts intermédiaires. Pour l'instant, nous avons conçu le cœur du réacteur pour le combustible provenant des réacteurs VVER 440, mais nous pouvons facilement l'adapter aux assemblages combustibles provenant d'autres réacteurs à eau bouillante ou à eau sous pression. Le stock d'assemblages combustibles usés que nous pouvons utiliser pour notre réacteur est énorme: la quantité actuellement disponible en République tchèque, par exemple, suffit à chauffer toutes les grandes villes du pays pendant 30 ans. Chaque année, 280 autres assemblages combustibles provenant de réacteurs VVER 440 viennent s'y ajouter, alors qu'un Teplator de 150 MW n'a besoin que de 55 assemblages combustibles par an. Il va de soi que nous ne pouvons reprendre que des assemblages combustibles intacts dont l'utilisation préalable a été faite dans les règles de l'art.

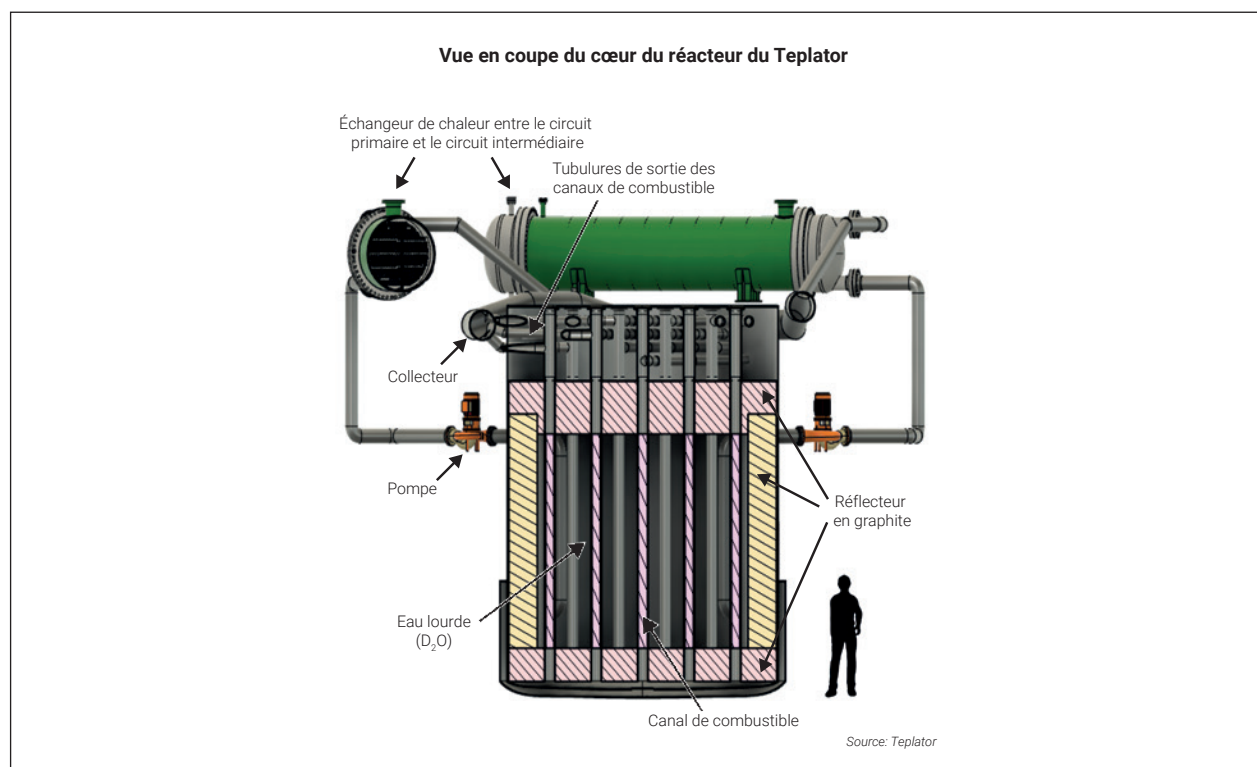
### Quel est le niveau de sûreté d'un tel réacteur?

Le Teplator est beaucoup plus sûr que les réacteurs à eau légère actuels dont il reprend le combustible: il fonc-

tionne avec un flux neutronique plus faible, une densité de puissance plus faible, une température de combustible plus basse et une pression d'eau plus faible. En outre, le cœur est plus volumineux en raison de la conception à eau lourde, et l'inventaire en eau plus important assure un meilleur comportement en régime transitoire.

### Quel est le domaine d'application prévu pour le Teplator?

Le principal domaine d'application est celui des villes de plus de 100'000 habitants qui disposent d'un réseau de chauffage à distance alimenté pour l'heure au charbon ou au gaz naturel. Il existe des dizaines de sites de ce type, principalement dans le nord, le centre et l'est de l'Europe. Nous visons également la fourniture de chaleur industrielle pour des applications comprises dans la plage de température du Teplator. Grâce à un circuit d'adsorption, le Teplator peut même constituer une solution de recharge aux systèmes de climatisation dans les grandes agglomérations déjà dotées de réseaux de froid à distance fonctionnant à l'eau, comme la ville de Doha ou celle de Koweït. →



## Le Teplator en bref

Le Teplator, réacteur nucléaire innovant, a été développé par des chercheurs de l'Institut d'informatique, de robotique et de cybernétique de l'Université tchèque de Prague (ČVUT) et de l'Université de Bohême occidentale (ZČU). Il produira de la chaleur mais pas d'électricité, de sorte que l'installation pourra être construite de manière plus simple et en utilisant moins de matériaux.

Comme dans le cas du réacteur à eau lourde canadien Candu, le rechargement du combustible se fait en marche. Le Teplator peut être alimenté par des assemblages combustibles usés issus de réacteurs nucléaires existants. Ces assemblages contiennent encore assez d'uranium 235 fissile pour couvrir une saison froide allant jusqu'à dix mois. Le Teplator produit donc de la chaleur à partir de déchets radioactifs de manière respectueuse du climat, sûre et qui plus est bon marché. Selon un calcul remontant à 2019, le prix de revient de la chaleur produite par le Teplator est inférieur à 4 euros par

gigajoule, ce qui correspond à moins de 1,5 centime par kilowattheure. La procédure d'autorisation et la recherche d'un site en République tchèque sont en cours. Dès qu'elles auront été menées à bien, la construction du premier Teplator pourra débuter.

Ce réacteur à eau lourde possède trois circuits séparés (cf. graphique à la page 5), qui ne sont reliés entre eux que par des échangeurs de chaleur (cf. graphique à la page 3). Le circuit primaire comporte trois boucles. Le circuit intermédiaire contient les réservoirs de stockage du chaud et du froid. Le troisième circuit est le réseau de chauffage à distance. Grâce à cette disposition des circuits, aucune substance radioactive ne peut s'échapper du Teplator vers le réseau de chauffage à distance. Ce réacteur innovant dispose en outre d'un système d'arrêt d'urgence permettant d'évacuer efficacement la chaleur résiduelle vers le de chaleur du circuit intermédiaire au travers des trois échangeurs de chaleur du circuit primaire.

### Selon vous, dans quelle mesure la population tchèque acceptera-t-elle de vivre à proximité d'un Teplator?

Jusqu'à présent, l'acceptation a été extraordinairement grande. Le fait que le Teplator fournisse de manière fiable une chaleur bon marché et exempte d'émission constitue un atout manifeste dans le contexte de la décarbonation. En outre, nous ne prévoyons pas de construire de tels réacteurs à l'intérieur des villes desservies, mais bien à l'écart, idéalement à une distance de 10 à 20 kilomètres, avec un raccordement du Teplator par pipeline, ce qui favorise l'acceptation par les populations concernées.

### Où en est le projet? Quand le premier réacteur sera-t-il mis en service?

L'idée du projet a germé en 2019, la physique du cœur du réacteur a été achevée l'an dernier, tout comme le dimensionnement de la conception. Les groupes de projet de

Pilsen et de Prague travaillent à présent sur la conception de base qui sera soumise à l'autorité de surveillance nucléaire. Si nous nous fondons sur un calendrier optimiste, avec un site déjà approuvé, un soutien total de l'État, l'absence d'obstacles juridiques et un financement optimal, il faut compter sept ans jusqu'à la mise en service.

### Comment le développement a-t-il été financé?

Nous avons eu quelques investisseurs privés pour le lancement du projet, et nous utilisons également des fonds institutionnels destinés à soutenir la recherche. Actuellement, nous discutons avec plusieurs investisseurs pour faire avancer le projet et nous nous employons à recruter les meilleurs ingénieurs nucléaires du pays.

### Le réacteur peut-il être exploité de manière rentable?

C'est le tout premier calcul que nous avons fait: en 2019, la chaleur produite par le Teplator était deux fois moins

chère que la chaleur produite par le gaz naturel; avec la flambée des prix du gaz naturel enregistrée depuis lors, l'écart s'est encore creusé.

### Quels ont été les défis à relever lors du développement? Et aujourd'hui, quelles sont les difficultés qui doivent encore être surmontées?

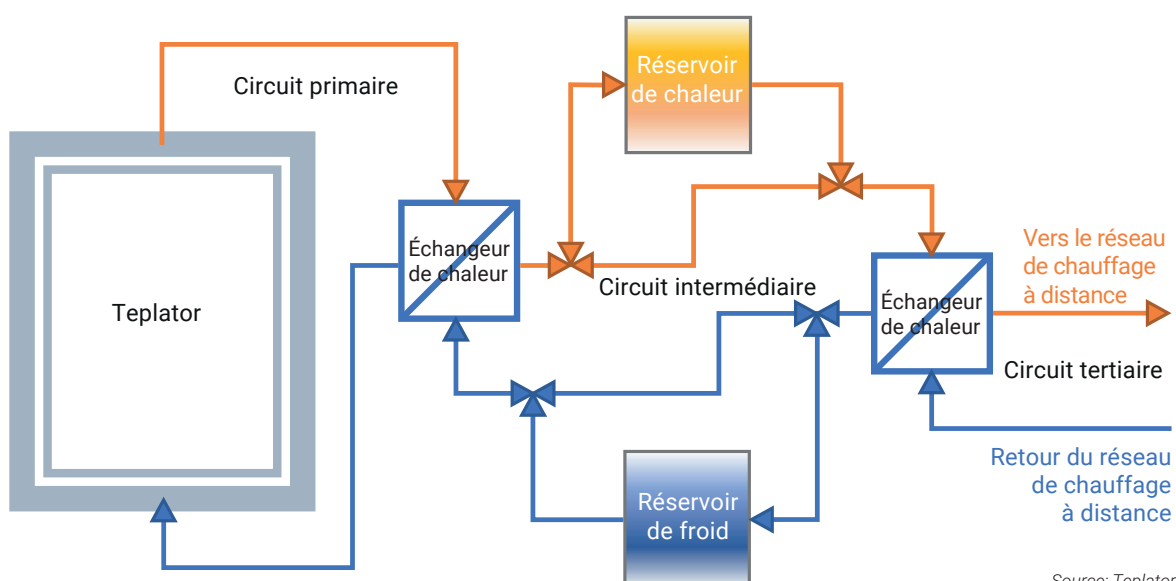
Lorsque l'on optimise un cœur constitué de combustible déjà irradié, les premiers calculs nécessitent une puissance de calcul gigantesque, si bien que notre groupe de neutronique a littéralement grillé plusieurs processeurs. Mais en ce qui concerne la construction mécanique, la plupart des composants sont assez standard. Pour le combustible, par exemple, on dispose d'une expérience de plusieurs décennies. De nombreux composants se rapportant à l'eau lourde peuvent être directement repris de la conception du Candu. L'installation servant à remplacer le combustible est de conception originale.

Pour nous, le plus gros désagrément a été la campagne de laminage sur les réseaux sociaux financée directement par un grand pays exportateur de gaz naturel. Mais tout ce fiel n'a fait que nous conforter dans l'idée que nous étions vraiment sur quelque chose de révolutionnaire.

### Le Teplator peut-il être utilisé partout dans le monde? Avez-vous des clients intéressés à l'étranger?

Nous avons eu des discussions avec au moins quatre pays. Toutes les centrales fossiles de chauffage à distance vont au-devant de temps difficiles en raison du renforcement des prescriptions sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Et les pays qui exploitent des centrales nucléaires disposent de milliers d'assemblages combustibles usés qui pourraient facilement être utilisés pour produire de la chaleur. (B.G./D.B.)

### Les trois circuits du réacteur à eau lourde Teplator



Source: Teplator

## Chine: la tranche de démonstration du réacteur à lit de boulets est connectée au réseau

Le 20 décembre 2021, la première centrale nucléaire équipée de réacteurs à lit de boulets a été mise en service en Chine. Cette conception de réacteur, testée en Allemagne il y a plus de cinquante ans déjà, présente un certain nombre de spécificités. Le professeur émérite Horst-Michael Prasser en explique les avantages et les inconvénients.

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 s'agit d'une tranche refroidie à l'hélium d'une puissance électrique de 100 MW. Sa technologie repose sur des travaux menés initialement en Allemagne et sur l'expérience en matière d'exploitation acquise dans ce pays (cf. encadré 2). L'université Tsinghua à Pékin, où le réacteur expérimental HTR-10 est exploité avec succès depuis 2003, a tiré parti de ce socle de connaissances pour poursuivre le développement du réacteur à lit de boulets.

### 1<sup>er</sup> atout: excellent confinement du combustible

Horst-Michael Prasser, qui a été professeur ordinaire dans la branche des systèmes d'énergie nucléaire à l'EPF de Zurich de 2006 à 2021 et directeur du laboratoire de thermohydraulique de l'Institut Paul Scherrer (PSI) de 2007 à 2017, explique comme suit les principales différences avec les réacteurs à eau légère (LWR) conventionnels: «Dans les réacteurs à lit de boulets, le combustible se trouve dans des microbilles d'environ 0,5 mm de diamètre, entourées d'une couche de carbure de silicium mince mais résistante et largement imperméable. Environ dix mille de ces microbilles dites «coated» (enrobées) sont encapsulées dans des sphères de graphite de la taille d'une boule de billard».

La couche de carbure de silicium remplace la gaine des crayons combustibles que l'on trouve dans les réacteurs à eau légère. Elle résiste à des températures bien plus élevées que le zirconium dont sont constituées ces gaines. «Les composants radioactifs du combustible, notamment les radioisotopes volatils des gaz rares krypton et xénon ainsi que l'iode 131 radioactif et les isotopes 137 et 134 du césium, particulièrement problématiques, qui ont contaminé de vastes portions de territoire dans le cas de Fukushima, sont confinés de manière fiable par la couche de carbure de silicium», explique le professeur Prasser.

### 2<sup>e</sup> atout: fonte du cœur impossible

Les sphères de combustible sont chargées dans la cuve du réacteur par le dessus, jusqu'à ce que la masse critique soit atteinte à la température de fonctionnement souhaitée (cf. graphique à la page 7). La combustion n'est pas compensée par le retrait continu d'absorbants de neutrons comme dans le cas des LWR, mais par l'apport constant de nouvelles sphères. On prélève en permanence des sphères par le dessous de la cuve, leur taux de combustion est mesuré et, selon le résultat, elles sont réintroduites dans la cuve par le haut ou retirées. Après quinze passages en moyenne, le taux de combustion prévu est atteint. «Il y a toujours dans le réacteur exactement la quantité de matière fissile nécessaire à une réaction en chaîne autoentretenu, pas plus», explique Horst-Michael Prasser. «En combinaison avec les fortes rétroactions négatives qui atténuent la réaction en chaîne lorsque la température augmente, cela amène une autre caractéristique de sûreté importante: même en cas de perte totale du refroidissement – par exemple en raison d'une panne du compresseur d'hélium ou si de l'hélium s'échappe du réacteur à cause d'une fuite – il n'y a pas, à la différence de ce qui peut se passer dans les réacteurs à eau légère, de surchauffe excessive du combustible ou de fonte du cœur».

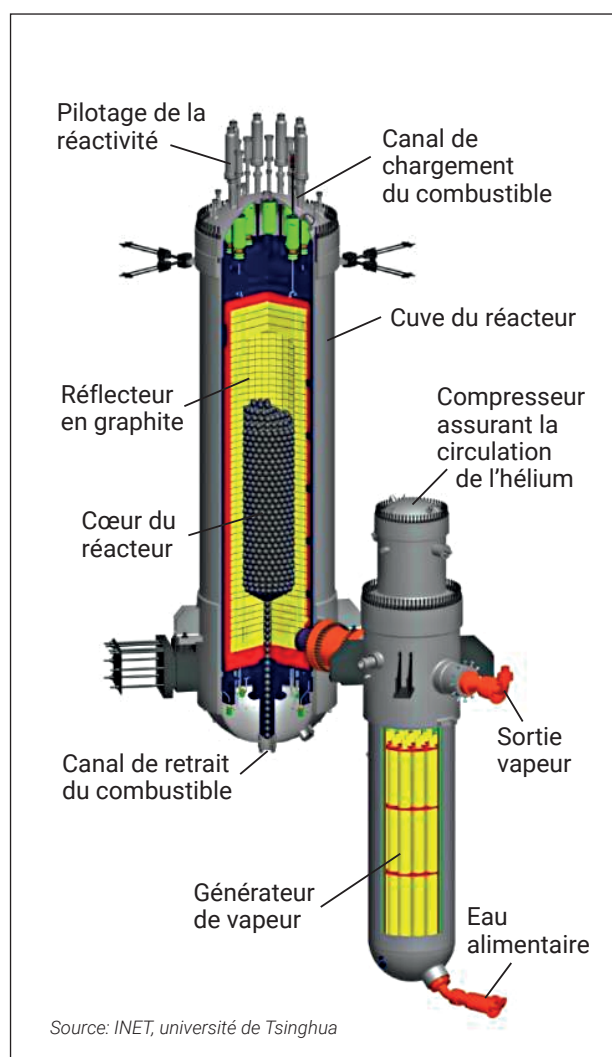
La raison en est qu'en cas de hausse de la température, la puissance du réacteur chute automatiquement, pour des raisons physiques – sans intervention des systèmes de protection ou des opérateurs – à un niveau auquel la chaleur qui se dégage encore peut être évacuée par la paroi du réacteur dans l'enceinte de confinement, même en l'absence d'arrêt provoqué par les barres de contrôle. «Le HTR-PM ne peut toutefois pas se passer complètement de système de refroidissement, car la chaleur supplémentaire doit être évacuée de la caverne du réacteur. Le système nécessaire fonctionne toutefois sans alimentation électrique de secours, c'est un système de sûreté passif.



Relevons encore que ce concept de refroidissement de secours ne peut fonctionner que parce que le cœur du réacteur a un grand volume par rapport à sa production de chaleur, donc une densité de puissance beaucoup plus faible que celle d'un LWR.»

### Très faible puissance, mais possibilités d'extension modulaires

«En d'autres termes, le réacteur proprement dit est intrinsèquement sûr en cas de perte du refroidissement», ré-



Le HTR-PM chinois et son générateur de vapeur en position basse. La température de l'hélium à la sortie du réacteur est de 750 °C, la température de la vapeur est de 570 °C.

sume le professeur Prasser. «Toutefois, sa puissance thermique doit être limitée à un ordre de grandeur de 200 à 300 MW, faute de quoi la température maximale dans le réacteur ne peut pas être maintenue en dessous de 1600 °C». À des températures plus élevées, l'iode et le césium pourraient traverser la couche de carbure de silicium, passer dans le circuit d'hélium et de là, dans des conditions défavorables, être relâchés dans l'environnement. «D'où la modularité des centrales nucléaires à réacteurs à lit de boulets: plusieurs réacteurs produisent de la chaleur pour une turbine commune. La température de sortie de la vapeur est d'environ 570 °C, ce qui a l'avantage de permettre l'utilisation d'une turbine à vapeur normale plutôt que de turbines optimisées pour la vapeur saturée comme dans le cas des réacteurs à eau légère.» La vapeur surchauffée porte le rendement de la centrale à plus de 40%.

### Des systèmes de sûreté restent nécessaires

Le réacteur à lit de boulets ne peut toutefois pas se passer entièrement de systèmes de sûreté, car il faut aussi maîtriser des scénarios d'accident autre que la perte de refroidissement évoquée plus haut. «Si, par exemple, de l'eau pénètre dans le cœur et comprime l'hélium, le graphite des sphères de combustible est susceptible de réagir avec la vapeur d'eau, produisant de l'hydrogène et du monoxyde de carbone. En outre, la pénétration d'eau rendrait le réacteur supercritique. C'est ce à quoi il faudrait s'attendre en cas de rupture d'un tube de chauffage du générateur de vapeur», explique le professeur Prasser. «En pareil cas, un dispositif de fermeture de l'arrivée d'eau s'enclencherait automatiquement. En outre, le générateur de vapeur du HTR-PM, contrairement à celui de l'AVR de Jülich (cf. encadré à la page 10), est situé en dessous du cœur du réacteur. La vapeur d'eau étant plus lourde que l'hélium, elle ne peut pénétrer que lentement dans la cuve du réacteur.»

Un autre scénario envisage une entrée d'air. En pareil cas, les structures en graphite et les sphères de combustible seraient endommagées en l'absence de contre-mesures. Le professeur Prasser précise qu'une entrée massive d'air serait tout au plus envisageable en cas de survenue d'un événement extrême très improbable, comme un mégaséisme. «L'avantage par rapport à d'autres types de réacteurs est néanmoins que de tels incidents n'évolueraient que très lentement, de sorte qu'il resterait beaucoup de temps pour appliquer les contre-mesures.»

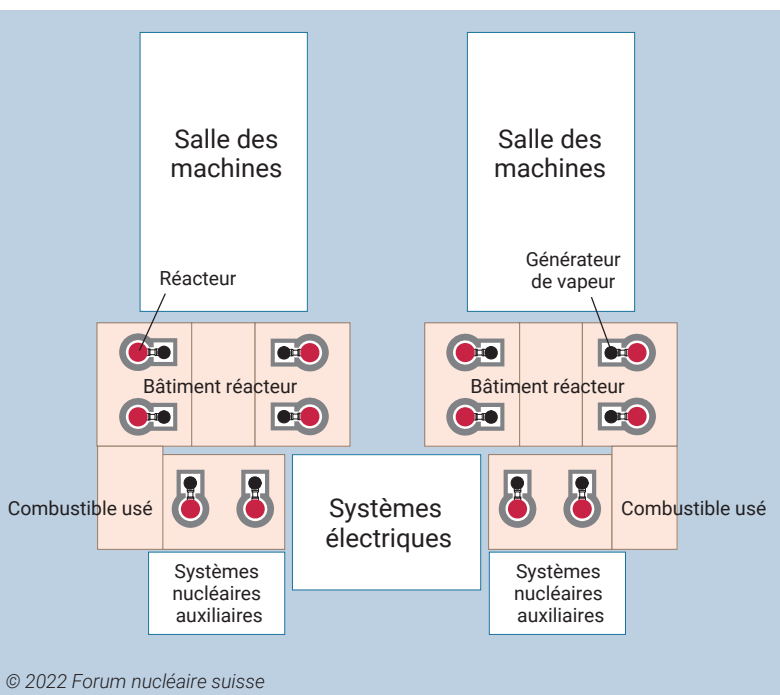
Atout supplémentaire: l'hélium en circulation dans le réacteur ne devient pas radioactif pendant le fonctionnement de ce dernier. En outre, il n'est pas toxique et ne peut ni brûler ni exploser. Au cas où le pire accident possible se produisait et que de l'hélium était relâché dans l'environnement, il pourrait certes entraîner avec lui des poussières radioactives et des traces de produits de fission volatils qui auraient diffusé à travers la couche de carbure de silicium des microbilles, mais cela n'aurait rien de comparable avec les rejets qui se sont produits à Fukushima», relève Horst-Michael Prasser.

### Une grande sûreté, mais peu de surgénération et aucune transmutation

De 2015 à 2019, le professeur Prasser a dirigé un projet financé par Swisselectric et Swissnuclear sur la technologie du réacteur à lit de boulets. Il a réussi à s'adjoindre le partenariat du développeur de ce type de réacteur, l'Institut des technologies nucléaires et des nouvelles énergies (INET) de l'Université de Tsinghua, à Pékin. L'un

des principaux objectifs du projet était le maintien du savoir-faire. De nombreux étudiants du programme de master en génie nucléaire des EPF de Zurich et Lausanne ont gagné leurs premiers galons scientifiques en apportant leur contribution à ce projet. «Nous avons en outre rempli notre mission de suivi de l'évolution des nouveaux concepts de réacteurs», ajoute Hans-Horst Prasser.

Les thèmes abordés comprenaient les aspects sécuritaires, d'éventuels combustibles alternatifs (thorium, p. ex.), des scénarios de gestion des déchets et des estimations de coûts. Selon le professeur Prasser, le HTR-PM n'est pas à proprement parler un réacteur de génération IV, bien qu'il soit souvent considéré comme tel avec une certaine justification, car il n'utilise pas d'eau comme caloporteur: «Il n'est toutefois pas basé sur les neutrons rapides et ne peut donc pas couvrir l'ensemble du programme, de la surgénération à la transmutation. On peut certes utiliser du thorium 232, mais on peut aussi le faire avec un réacteur à eau lourde du type canadien Candu. De plus, comme la température de sortie de l'hélium est limitée à 750 °C pour des raisons de sûreté, il ne s'agit pas d'un véritable réacteur à haute température. Il ne permet pas de bien conduire un processus combiné de turbine à gaz et de turbine à vapeur ni de produire directement de l'hydrogène gazeux.» Un cycle basé sur l'acide sulfurique et l'iode comme catalyseurs, qui s'accommode de températures de processus relativement basses, est évoqué depuis longtemps comme candidat potentiel, mais nécessite tout de même au moins 800–900 °C selon les données chinoises. «Il sera certainement possible d'optimiser la température vers des valeurs plus élevées ultérieurement, lorsque l'on disposera de plus d'expérience en matière d'exploitation», espère le professeur Prasser.



© 2022 Forum nucléaire suisse

Agencement schématique d'une centrale nucléaire de 1200 MW, composée de deux HTR-PM600 standard. Dans chaque HTR-PM600, trois modules de deux tranches chacun, disposés en T, entraînent une turbine à vapeur commune qui délivre une puissance électrique maximale de 600 MW.

### Inconvénient: le volume des déchets

Les avantages des sphères de combustible sont par ailleurs contrebalancés par un inconvénient: «Par rapport à un LWR, le volume du combustible usé – donc des déchets de haute activité dans un pays qui pratique une gestion des déchets ne comportant pas de retraitement – est 30 à 50 fois plus important par kilowattheure produit», relève Horst-Michael Prasser. «Le fait que l'activité rapportée au volume soit plus faible ne change pas grand-chose.»

### Une installation standard de 600 MW<sub>el</sub>

Les deux HTR-PM mis en service fin 2021 sur le site de Shidao Bay ont chacun une puissance thermique de 250 MW et une puissance électrique nette de 100 MW. Qualifiées de projets de démonstration, ces deux tranches alimentent une turbine à vapeur commune. Elles sont conçues pour une durée d'exploitation de 40 ans.

L'objectif stratégique de la Chine est d'exploiter de manière ciblée les atouts du HTR-PM: sûreté intrinsèque élevée, grande efficacité énergétique, température de vapeur élevée, construction modulaire et grande liberté de choix du site (pas besoin d'eau de refroidissement). L'objectif principal est de produire de la chaleur industrielle et de remplacer les centrales à charbon actuelles qui fournissent à la fois de l'électricité et de la chaleur à distance à des villes avoisinantes. À terme, il est aussi question d'utiliser ce type de réacteur pour la production d'hydrogène.

La prochaine étape consistera à assembler les tranches de base en groupes allant jusqu'à 600 MW<sub>el</sub>, selon les besoins. L'installation standard HTR-PM600 en projet se compose de six réacteurs et d'un seul groupe turboalternateur. La conjonction de deux installations de ce type donne une puissance comparable à celle d'un grand LWR conventionnel (cf. graphique 2). Selon les indications fournies par la Chine, il est prévu d'exporter ce type de réacteur, par exemple dans les pays arides, où il pourrait être implanté loin des rivières et des rivages maritimes, ou utilisé pour le dessalement d'eau de mer.

Les sphères de combustible ont néanmoins l'avantage de pouvoir être entreposées relativement facilement dans un dépôt intermédiaire sec refroidi à l'air sur le site de la centrale. Dans un dépôt en profondeur, leur besoin

de place serait beaucoup trop important en raison de la forte teneur en graphite des sphères. Bien que la stabilité de la couche de carbure de silicium entourant les microbilles de combustible ainsi que l'enrobage de graphite des sphères constituent de très bonnes barrières, le professeur Prasser part du principe que l'on ne pourrait pas faire l'économie du confinement des déchets dans des conteneurs à parois épaisses adaptés au stockage en profondeur, une opération courante selon les normes actuelles.

### Une option pour la Suisse?

Le HTR-PM pourrait-il constituer une option pour la Suisse? Le professeur Prasser répond sans détour: «Dans les pays où le retraitement du combustible nucléaire usé est interdit par la loi, un volume élevé de déchets de haute activité constitue un problème. Il faudrait, à tout le moins, conditionner le combustible usé, car le HTR-PM n'a pas d'avenir en cas de stockage direct en profondeur. Il faudrait au moins récupérer le graphite entourant les microbilles. On pourrait envisager de le réutiliser pour la production de nouvelles sphères.»

Dans le cadre du projet de recherche évoqué plus haut, une procédure de fragmentation expérimentale, au moyen d'une technologie développée en Suisse, de vraies sphères de combustible usées, et donc de haute activité, a été définie. Le professeur Prasser juge toutefois extrêmement minces les chances de mettre sur pied une expérience dans ce domaine en Suisse, pour ne rien dire de la construction du type de réacteur en question. Pour tirer parti des avantages du HTR-PM, il faut «passer par la case politique», comme pour tout autre réacteur nucléaire. Une alternative au conditionnement des déchets en Suisse serait de renvoyer les sphères de combustible usées à leur fabricant. «À l'heure actuelle, les sphères contenant de l'uranium enrichi à environ 9% ne sont produites qu'en Chine», indique Horst-Michael Prasser. «Il en faut 420'000 pour un chargement du cœur et, chaque jour, 400 sphères atteignent le taux de combustion ciblé et doivent donc être remplacées par de nouvelles sphères.»

C'est la raison pour laquelle la cuve de réacteur du HTR-PM est quatre fois plus grande que celle d'un LWR: elle fait 25 m de haut sur 5,7 m de diamètre. Si le HTR-PM

### À l'origine: l'Allemagne

C'est en Allemagne que les premiers prototypes de réacteurs à lit de boulets ont été construits. Baptisé AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor), le tout premier d'entre eux était refroidi à l'hélium et offrait une puissance électrique de 13 mégawatts. Il a été mis en service en 1967 au centre de recherche de Jülich, près de Cologne. Globalement très réussi, l'AVR présentait néanmoins quelques solutions technologiques peu abouties, dont un générateur de vapeur placé au-dessus du cœur du réacteur, avec à la clé le risque qu'en cas de rupture d'un tube de chauffage, la vapeur descende dans le cœur du réacteur puisqu'elle est plus lourde que l'hélium qui y circule. L'AVR a été arrêté en 1988 dans le sillage de l'accident de Tchernobyl.

En 1971, la construction d'un réacteur au thorium à haute température refroidi à l'hélium (THTR) d'une puissance électrique de 300 mégawatts a été lancée. L'installation a été pour la première fois connectée au réseau en 1985, à Hamm-Uentrop, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Mais elle se révéla trop grosse et trop complexe, et de nombreux problèmes techniques firent leur apparition. Ainsi, en raison de ce qui s'avéra être un défaut de construction, les barres de contrôle s'abaissaient directement dans le paquet de sphères de combustible, ce qui provoqua le blocage de certaines d'entre elles. Des coûts d'exploitation élevés et le contexte politique défavorable au nucléaire en Allemagne ont fait le reste, si bien que le THTR fut arrêté définitivement en 1988.

Les connaissances et l'expérience acquises par l'Allemagne au travers de ces prototypes ont ensuite été reprises par la Chine et l'Afrique du Sud. Contrairement à la Chine, qui a prudemment misé sur un générateur de vapeur et une turbine à vapeur, l'Afrique du Sud prévoyait, pour son «Pebble Bed Modular Reactor» (PBMR), que le caloporteur hélium actionne directement une turbine à gaz. Ce projet a été provisoirement arrêté en 2010.

est considéré comme un «petit réacteur modulaire», c'est donc en raison de sa puissance, non de sa taille. En revanche, les sphères sont plus faciles à fabriquer que les crayons combustibles d'un LWR. «Pour une utilisation en Suisse, il faudrait que la question de l'approvisionnement et de la gestion des déchets soit résolue», souligne le professeur Prasser. «Sinon, nous serions dépendants de la Chine à ces deux égards. Au vu du cadre légal et des conditions politiques actuelles, un réacteur à lit de boulets a peu de chances de voir le jour en Suisse, même dans l'hypothèse où l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires était levée», conclut-il.

Selon l'Université de Tsinghua, le prix de revient de l'électricité produite par le premier HTR-PM (first of a kind, FOAK) devrait être 15 à 20% plus élevé que celui d'un réacteur à eau sous pression de même puissance. Pour la première installation HTR-PM600 standard, le prix de revient devrait descendre à 75% et à moins de 40% lorsque la production commerciale en série sera lancée. Le principal avantage des réacteurs à lit de boulets serait leur meilleure adéquation aux sites éloignés de la mer et relativement proches des agglomérations. (M.S./D.B.)

### Bibliographie complémentaire (sources chinoises)

- Zhang Zuoy et al. (2019): Development Strategy of High Temperature Gas Cooled Reactor in China. In: Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, Vol. 21, Issue 1, pp 12–19.  
DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.01.003
- Zhang Ping et al. (2019): Nuclear Hydrogen Production Based on High Temperature Gas Cooled Reactor in China. In: Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, Vol. 21, Issue 1, pp 20–28.  
DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.01.004

# Taxinomie de l'UE: l'octroi du label vert au nucléaire et au gaz enflamme le débat

En décidant de qualifier de durable – à certaines conditions – l'énergie issue de l'atome et du gaz naturel, la Commission européenne a donné un signal important en matière de politique énergétique et climatique. En adoptant l'acte délégué correspondant, elle a néanmoins déclenché un vif débat autour de ces deux formes d'énergie dans de nombreux pays d'Europe.

La Commission européenne a tenu parole: elle avait annoncé pour 2021 le projet d'acte délégué complémentaire relatif aux objectifs climatiques de la taxinomie, et elle l'a envoyé aux États membres de l'UE le 31 décembre 2021, peu avant minuit. Cet acte délégué qualifie de durable, à certaines conditions, la production d'électricité à partir de l'atome et du gaz naturel. Le 2 février 2022, après un débat public intense, la Commission a adopté l'acte délégué en question avec quelques modifications mineures mais sans changement fondamental. Dans le cadre de ce processus, elle a précisé les critères en vertu desquels l'énergie nucléaire peut être considérée comme durable.

À l'occasion de la publication des règles relatives à la taxinomie, Mairead McGuinness, commissaire européenne aux services financiers, a déclaré: «L'UE est déterminée à atteindre la neutralité climatique d'ici à 2050 et nous devons employer tous les outils à notre disposition pour y parvenir. Pour atteindre nos objectifs climatiques, il est essentiel d'accroître les investissements privés dans la transition. Aujourd'hui, nous fixons des conditions strictes pour aider à mobiliser des fonds afin de soutenir cette transition et abandonner des sources d'énergie plus néfastes telles que le charbon. Et nous renforçons la transparence du marché afin que les investisseurs soient en mesure de repérer facilement les activités gazières et nucléaires lors de toutes leurs décisions d'investissement». La commissaire européenne a souligné que le choix du bouquet énergétique reste une prérogative nationale et qu'il appartient à chaque État de décider des sources d'énergie sur lesquelles il entend miser.

Dans l'ensemble, la Commission a suivi les recommandations de ses conseillers scientifiques. Sa décision n'a donc rien de surprenant, même si de nombreuses réactions publiques et politiques laissent penser le contraire. En octobre de l'année dernière, la présidente de la Commission européenne Ursula von der Leyen avait déjà annoncé que

pour le «Green Deal» ou «pacte vert» européen, l'UE misait sur l'énergie nucléaire en raison de sa stabilité, et sur le gaz en raison de sa capacité à servir de technologie de transition, et que la taxinomie serait conçue en conséquence. Et dès le milieu de l'année dernière, le Centre commun de recherche de la Commission européenne (Joint Research Center – JCR) est parvenu à la conclusion que l'énergie nucléaire n'est pas plus nocive pour la santé humaine et pour l'environnement que n'importe quelle autre technologie de production d'énergie considérée comme durable. En plus des États membres de l'UE, deux groupes d'experts en finance durable ont été consultés à propos du projet de taxinomie publié fin décembre. →

## Qu'est-ce que la taxinomie de l'UE?

«La taxinomie de l'UE vise à intensifier les flux financiers en faveur d'activités durables dans l'ensemble de l'Union européenne. Pour que l'Europe puisse atteindre la neutralité climatique d'ici à 2050, il est essentiel de permettre aux investisseurs de réorienter leurs investissements vers des technologies et des entreprises plus durables. La taxinomie de l'UE est un outil basé sur des données scientifiques, qui vise à offrir de la transparence aux entreprises et aux investisseurs. Elle crée un langage commun, sur lequel les investisseurs pourront se fonder pour investir dans des projets et des activités économiques ayant une incidence positive notable sur le climat et l'environnement. Elle impose en outre des obligations d'information aux entreprises et aux acteurs des marchés financiers.» (Commission européenne, communiqué de presse du 2 février 2022)

### Acte délégué

Les actes délégués sont des actes non législatifs adoptés par la Commission européenne qui servent à modifier ou à compléter les éléments non essentiels de la législation. La Commission doit avoir été habilitée au préalable à les adopter par le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne, et elle consulte des experts des États membres avant de les édicter. Le Parlement européen ou le Conseil de l'Union européenne peuvent révoquer la délégation de pouvoir accordée à la Commission. Par ailleurs, un acte délégué adopté par la Commission ne peut entrer en vigueur que si le Conseil ou le Parlement n'opposent aucune objection, dans le délai défini par l'acte de base, qui est généralement de deux mois. (Source: d'après EUR-Lex)

### Exigences imposées à l'énergie nucléaire

Les exigences que la taxinomie impose actuellement à l'atome sont strictes:

- Les investissements dans de nouvelles centrales nucléaires ne sont considérés comme durables que si les installations correspondent à l'état le plus récent de la technique et donc aux normes de sûreté les plus élevées.
- Les permis de construire pour les nouvelles centrales nucléaires devraient être délivrés au plus tard en 2045.
- L'obstacle le plus important est sans aucun doute l'obligation de présenter un plan détaillé pour que, d'ici 2050, une installation de stockage pour les déchets de haute activité soit opérationnelle. La Commission a précisé les exigences en matière de gestion des déchets nucléaires en indiquant que les États membres doivent présenter en complément un plan documenté sur la manière dont cette installation sera financée et dont les contrôles seront assurés après sa fermeture. Dans l'état actuel des choses, seules la Finlande et la

Suède seraient vraisemblablement en mesure de satisfaire à cette exigence. En la matière, Foratom, l'association de l'industrie nucléaire en Europe, avait proposé de lier le délai imparti pour la mise en service d'un dépôt à la date de l'existence du besoin.

- Du point de vue suisse, il est en outre problématique que seuls les investissements dans les installations nucléaires des États membres de l'UE soient considérés comme durables. En tant que membre de Foratom, le Forum nucléaire suisse s'est prononcé en faveur de l'extension de ce critère aux pays tiers, pour autant que ceux-ci remplissent des normes de sûreté équivalentes.
- À partir de 2025, les projets nucléaires existants et nouveaux devront utiliser des combustibles résistants aux accidents (Accident-Tolerant Fuels) certifiés et approuvés par l'autorité de sûreté nationale. Yves Desbazeille, directeur général de Foratom, a déclaré à ce sujet: «Les combustibles résistants aux accidents sont encore en phase de test et ne seront donc pas disponibles commercialement d'ici 2025, ce qui rend impossible le respect de ce critère.»

Parmi les États membres, la France et de nombreux pays de l'Europe de l'Est se sont prononcés en faveur de l'inclusion de l'énergie nucléaire dans la taxinomie, en arguant de la nécessité du recours à l'atome pour décarboner leurs systèmes énergétiques et atteindre les objectifs climatiques.

Ce sont en particulier l'Allemagne, l'Autriche, l'Espagne et le Luxembourg qui se sont opposés avec véhémence à l'inclusion de l'énergie nucléaire dans la taxinomie. Alors que le gouvernement autrichien a annoncé son intention de porter plainte contre le règlement sur la taxinomie dans son ensemble, la critique de l'Allemagne porte uniquement sur l'énergie nucléaire, et non sur les dispositions relatives au gaz. «Pour le gouvernement fédéral, le gaz fossile utilisé comme combustible dans des centrales à gaz ultramodernes et efficaces constitue, pour une période de transition limitée – jusqu'au passage à un secteur de l'énergie basé sur les énergies renouvelables – une passerelle permettant de sortir rapidement du charbon, réalisant ainsi des économies de CO<sub>2</sub> à court terme, et d'accompagner la montée en puissance des énergies renouvelables», peut-on lire dans la

prise de position du gouvernement allemand. Dans son projet final, la Commission européenne a encore abaissé les obstacles aux investissements gaziers considérés comme durables dans le sens de la prise de position de l'Allemagne.

### Prochaines étapes

Le Parlement européen et le Conseil de l'UE ont maintenant quatre mois pour examiner l'acte délégué et émettre des objections. Ils ne peuvent toutefois approuver ou rejeter l'acte que dans son ensemble. Un rejet par

le Conseil requiert la majorité qualifiée renforcée, soit 20 États membres représentant au moins 65% de la population de l'Union européenne. Un rejet par le Parlement européen requiert la majorité absolue de 353 voix. Les obstacles à une non-acceptation sont donc importants, si bien que l'on peut partir du principe que la taxinomie entrera en vigueur sous sa forme actuelle et que l'énergie nucléaire sera considérée comme durable en tant que technologie de transition. (S.D./D.B., d'après des communiqués de presse de la Commission européenne et de Foratom parus le 2 février 2022)



Selon Mairead McGuinness, commissaire européenne aux services financiers, la classification fournie par la taxinomie constitue un guide pour les investisseurs privés. (Photo: Union européenne, 2022)

## Les centrales nucléaires dans le monde en 2021

L'an dernier, l'essentiel des activités liées à la production nucléaire d'électricité s'est déroulé en Asie. La Chine a lancé cinq projets de construction et mis en service trois réacteurs. Les Émirats arabes unis (EAU), l'Inde et le Pakistan ont chacun synchronisé une tranche avec le réseau, l'Inde mettant en outre en chantier deux tranches. La Russie et la Turquie ont chacune coulé le premier béton d'une tranche. À l'inverse, dix tranches ont été arrêtées définitivement, dont trois en Allemagne pour des raisons politiques. À fin 2021, le parc nucléaire civil mondial comptait un total de 436 réacteurs répartis dans 33 pays, et la puissance installée nette s'inscrivait à 388'600 MW (contre 392'600 MW en 2020).

En 2021, six nouvelles tranches – trois en Chine, une en Inde, une au Pakistan et une aux EAU – ont été connectées au réseau pour la première fois. Elles représentent une puissance totale de près de 5200 MW. Il s'agit, dans l'ordre de leur première synchronisation avec le réseau, de Kakrapar 3 en Inde, de Karachi 2 au Pakistan, de Tianwan 6 et Hongyanhe 5 en Chine, de Barakah 2 aux EAU et de Shidao-Bay 1 en Chine.

Shidao-Bay 1, dans la province chinoise de Shandong, est le premier réacteur haute température à lit de boulets (HTR-PM) au monde (cf. page 6). Son combustible se compose de petites billes d'uranium revêtues, qui sont frittées dans des billes de graphite de 6 cm de diamètre environ et contiennent chacune 7 grammes d'uranium enrichi à 8,5%. L'hélium, chauffé dans le réacteur à 750 °C, est utilisé comme caloporteur. Le rendement thermique est de 40%. L'installation de démonstration est conçue de telle sorte que deux modules de réacteur entraînent une turbine à vapeur, ce qui permet de disposer d'une puissance électrique de 200 MW. Du fait de son niveau de puissance et de sa conception modulaire, le HTR-PM est considéré comme un SMR (petit réacteur modulaire). Il est conçu pour une durée d'exploitation de 40 ans. La Chine estime que le HTR-PM600, une version élargie du HTR-PM qui disposera de six modules de réacteur et d'une turbine à vapeur d'une puissance de 650 MW, sera commercialisé après 2030.

Les tranches Tianwan 6 et Hongyanhe 5 sont toutes deux de conception indigène. Selon le système d'information Pris (Power Reactor Information System) de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), il

s'agit de réacteurs de type CNP-1000 (Tianwan 6) et ACPR1000 (Hongyanhe 5). Le circuit de refroidissement du CNP-1000, qui dispose de trois boucles, est développé par China National Nuclear Corporation (CNNC). L'ACPR-1000 est basé sur les réacteurs à eau sous pression français. Tous les droits appartiennent à China General Nuclear Power Group (CGN).

Au Pakistan, Karachi 2 est la première tranche du type chinois Hualong One mise en service en dehors de Chine. Ce réacteur comporte 177 assemblages combustibles, est entouré de deux enceintes de confinement et équipé de systèmes de sûreté actifs et passifs. Il possède un cycle du combustible de 18 mois et est conçu pour fonctionner pendant 60 ans. Karachi 3, la deuxième tranche Hualong-One du Pakistan, sera vraisemblablement connectée au réseau dans le courant de l'année 2022.

En Inde, Kakrapar 3, premier réacteur à eau lourde sous pression de conception indigène, est une tranche de troisième génération issue de séries antérieures de 202 MW et 540 MW basées sur le Candu. Sa puissance est de 700 MW. Ce PHWR-700 a été développé par le Bhabha Atomic Research Centre. La quasi-totalité de ses composants est fabriquée par des entreprises indiennes.

Aux EAE, la tranche Barakah 2, qui a fourni pour la première fois de l'électricité au réseau local à la mi-septembre, est conçue pour une durée d'exploitation de 60 ans. À terme, quatre réacteurs du type sud-coréen APR-1400 devraient être exploités sur le site de Barakah, à proximité de Ruwais, dans la région d'Al Dhafra, à Abu Dhabi.



### Puissance totale: les États-Unis en tête du classement

À fin 2021, la Chine comptait 52 tranches nucléaires en service, représentant en tout une puissance d'environ 49'700 MW. En termes de puissance totale, elle se classe donc en troisième position, derrière la France (56 tranches, 61'400 MW) et les États-Unis (93 tranches, 95'532 MW).

### Neuf ouvertures officielles de chantier

En 2021, le premier béton a été coulé pour neuf tranches. La Russie et la Turquie ont chacune lancé la construction d'une tranche, l'Inde de deux, et la Chine de cinq.

L'ouverture de chantier opérée en Russie concerne le Brest-OD-300, un surgénérateur refroidi au plomb de conception indigène. Ce réacteur de démonstration de génération IV fait partie du Pilot Demonstration Energy Complex (PDEC), qui comprend également une usine de fabrication de combustible à base de mononucléure d'uranium-plutonium et une installation de retraitement. Le cycle du combustible devrait ainsi être fermé. Le premier béton du Brest-OD-300 a été coulé le 8 juin 2021 sur le site du Siberian Chemical Combine (SCC), à Seversk, dans la région de Tomsk (sud-ouest de la Sibérie).

En Turquie, le premier béton de la tranche 3 de la centrale nucléaire d'Akkuyu a été coulé le 10 mars 2021. Le



Le projet «Percée» comprend non seulement le développement de réacteurs innovants comme le Brest-OD-300, mais aussi la fabrication de combustible à base de mononucléure d'uranium-plutonium.

(Photo: Tvel)



Quatre tranches nucléaires du type APR-1400 devraient à terme être exploitées sur le site de Barakah, à proximité de Ruwais, dans la région d'Al Dhafra, à Abu Dhabi. Barakah 1 est déjà en service commercial (depuis avril 2021), Barakah 2 a produit pour la première fois de l'électricité à la mi-septembre 2021, la construction de Barakah 3 est terminée, et Barakah 4 est achevée à 91%.

(Photo: Emirates Nuclear Energy Corporation)

projet repose sur un accord interétatique signé par la Russie et la Turquie en 2010. Quatre réacteurs de type VVER-1200, d'une puissance totale de 4800 MW, sont prévus sur le site d'Akkuyu, dans la province de Mersin, sur le littoral méditerranéen. La tranche 1 est en construction depuis avril 2018 et doit entrer en service en 2023, la tranche 2 est en chantier depuis avril 2020. Le Nuclear Regulatory Board, c'est-à-dire l'autorité de sûreté nucléaire turque, a délivré le permis de construire de la tranche 4 en octobre 2021.

En Inde, Kudankulam 5 et 6, deux tranches du type russe VVER-1000 dotées d'un générateur de vapeur de type AES-92, font partie de la phase 3 de la construction de la centrale nucléaire de Kudankulam, aussi connue sous la désignation KKNPP. Leur premier béton a été coulé en juin et en décembre 2021, respectivement. Le site se trouve dans l'État du Tamil Nadu à la pointe sud de l'Inde. Selon Nuclear Power Corporation of India Ltd. (NPCIL), la construction de Kudankulam 5 durera 66 mois, et celle de Kudankulam 6, 75 mois. Les deux tranches devraient donc être opérationnelles à l'horizon



Le secteur nucléaire crée de nouveaux emplois.  
(Photo: Georgia Power Company)

zon 2027. Kudankulam 1 et 2 – qui constituaient la phase 1 du projet – sont raccordées au réseau depuis 2013 et 2016. La construction de Kudankulam 3 et 4 – la phase 2 – a commencé en juin et en octobre 2017 respectivement, et est achevée à 50% environ, selon NPCIL.

Comme les années précédentes, c'est la Chine qui a ouvert le plus grand nombre de chantiers. Début septembre 2020, le Conseil d'État chinois avait autorisé la construction de deux tranches Hualong One à Changjiang, sur la côte nord de la province de Hainan. Le premier béton a été coulé fin mars 2021 pour Changjiang 3 et neuf mois plus tard pour Changjiang 4. Ces deux tranches constituent la phase II de la construction de la centrale nucléaire. Changjiang 1 et 2, les deux réacteurs CNP-600 de la phase I, sont en service depuis 2015 et 2016. Ils couvrent environ un tiers des besoins en électricité de la province de Hainan.

En juin 2018, le président russe Vladimir Poutine avait signé un accord régissant la collaboration entre la Chine et la Russie pour les décennies à venir. Cet accord prévoit notamment la construction des tranches avancées Tianwan 7 et 8, du type VVER-1200, dans la province chinoise de Jiangsu, et des tranches Xudabao 3 et 4 dans la province du Liaoning. Ces quatre tranches devraient entrer en service entre 2026 et 2028. Le 19 mai 2021, le premier béton de la tranche nucléaire Tianwan 7 a été coulé, marquant ainsi le début officiel de la phase de construction. Quant à la tranche Xudabao 3, elle est en construction depuis le 28 juillet.

Enfin, la construction d'une autre tranche Hualong One – Sanaocun 2 – a été lancée le 30 décembre. Sanaocun 1 est déjà en construction depuis un an. Le site se trouve sur la côte sud-est du district de Cangnan (Wenzhou), dans la province chinoise du Zhejiang.

### Dix mises à l'arrêt définitif

En Allemagne, trois des six tranches que compte encore le pays ont été arrêtées prématurément à fin décembre 2021: il s'agit des tranches à eau sous pression de Brokdorf et Grohnde ainsi que de la tranche à eau bouillante Gundremmingen-C. En 2010, le gouvernement de la chancelière Angela Merkel avait décidé de prolonger la durée d'exploitation des 17 tranches nucléaires du pays jusqu'en 2036 au plus tard. Dans les mois suivant le tremblement de terre et le tsunami qui ont touché le Japon en mars 2011, entraînant l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi, il a toutefois fait volte-face, décidant de sortir complètement du nucléaire à fin 2022 au plus tard. En juillet 2021, Angela Merkel a défendu cette décision, tout en reconnaissant qu'elle compliquait la réduction à court terme des émissions de gaz à effet de serre du pays.

La Grande-Bretagne a retiré du réseau trois tranches AGR. Les deux tranches que compte Dungeness-B (mises en service en 1983 et 1985) dans le sud-est du comté de Kent ont été arrêtées le 7 juin, tandis que la tranche Hunterston-B1 (mise en service en 1976 dans le North Ayrshire en Écosse) l'a été le 26 novembre. Fin 2021, dix tranches nucléaires (9 AGR et 1 PWR) étaient donc en service en Grande-Bretagne. Deux tranches EPR sont en construction sur le site d'Hinkley-Point C, depuis 2018 et 2019 respectivement.



Représentation possible du site de Changjiang au terme des phases I et II. (Photo: China Huaneng)

En Russie, la tranche Kursk 1, du type RBMK-1000, a été arrêtée définitivement après 45 ans d'exploitation. «Depuis le 19 décembre 1976, début de son fonctionnement, la tranche nucléaire Kursk 1 a produit plus de 251 milliards de kilowattheures d'électricité. En se basant sur la consommation actuelle, cela permettrait de couvrir la consommation énergétique de la région de Kursk durant 30 ans», a déclaré le directeur adjoint de la centrale nucléaire, Alexander Uvakin. L'installation a fonctionné de manière fiable et sûre. Pour la remplacer, deux réacteurs VVER-TOI de 1150 MW chacun, Koursk-II 1 et Koursk-II 2, sont en construction. Il s'agit d'un type de centrale standardisé, optimisé à la fois sur le plan technique et économique, qui se base sur l'AES-2006/V-392M.

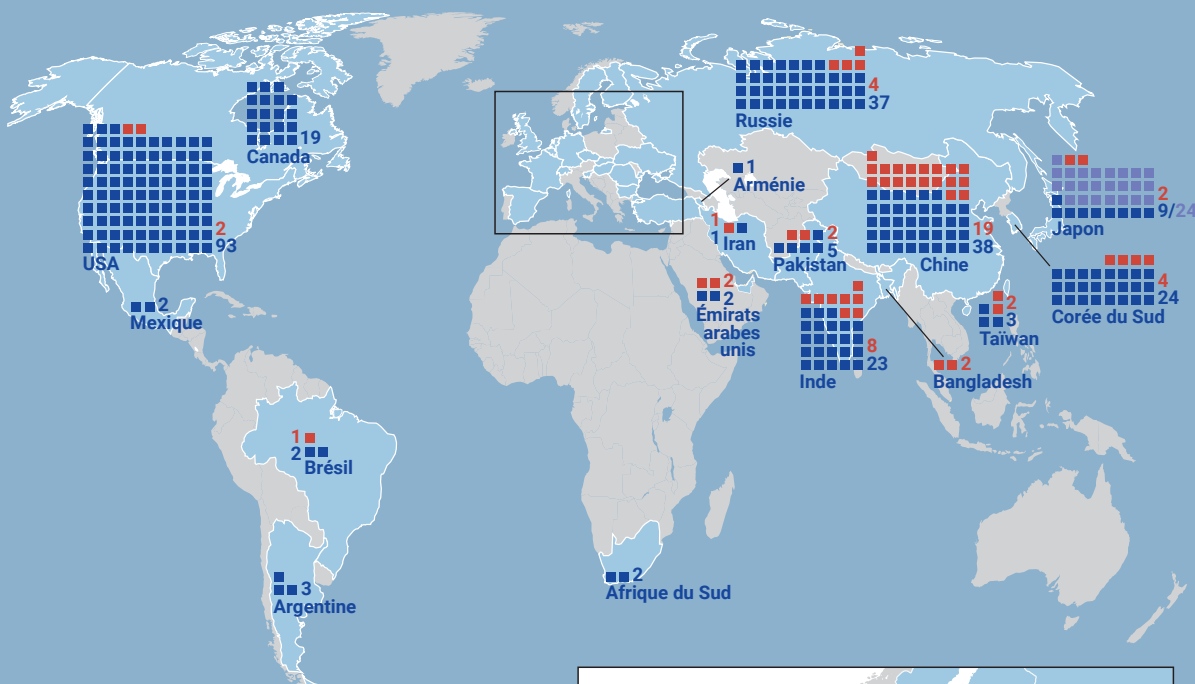
Le Pakistan a arrêté définitivement sa tranche la plus ancienne, Karachi 1 (PWRH, 90 MW). Elle avait été mise en service en 1971.

Le 30 avril 2021, les États-Unis ont eux aussi arrêté définitivement une tranche, Indian-Point 3, à Buchanan,

dans l'État de New York, conformément à un accord conclu en janvier 2017 par Entergy Corporation et l'État de New York. Indian-Point 3 aura délivré de l'électricité durant environ 60 ans. Son combustible a été remplacé pour la dernière fois en avril 2019, avant qu'elle soit remise en service et produise 1041 MW d'électricité de manière ininterrompue, jusqu'à son arrêt définitif. Cette durée d'exploitation de 751 jours est un record mondial pour un réacteur commercial à eau légère. Le record précédent – 739 jours – était détenu depuis 2006 par la tranche LaSalle 1.

Quant aux centrales nucléaires de Byron et Dresden, dans l'Illinois, elles étaient sur le point de fermer en 2021. L'État de l'Illinois a toutefois adopté une modification de la loi sur les énergies propres prévoyant un soutien à hauteur de 694 millions de dollars pour le secteur nucléaire, en difficulté économique. L'exploitant Exelon Generation a alors annoncé qu'il investirait plus de 300 millions de dollars dans les deux installations au cours des cinq prochaines années. (M.A./D.B.) →

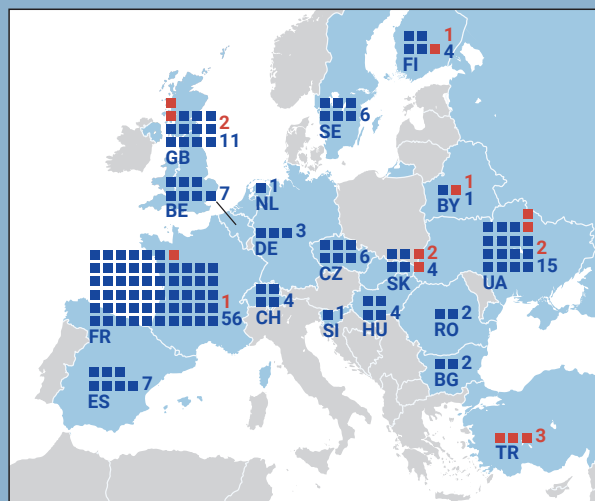
### Les centrales nucléaires dans le monde



État au 31 décembre 2021

■ Centrales nucléaires en service:	436
■ Dont actuellement à l'arrêt:	24
Puissance totale:	env. 388'600 MW
■ Centrales nucléaires en construction:	57
Puissance totale:	env. 60'100 MW

© 2022 Forum nucléaire suisse



## Le pouvoir des images mentales



**Rainer Meier**

Conseiller senior en gestion  
de réputation

Les faits sont les faits. De ce point de vue, rien n'a changé le 31 décembre 2021. Les centrales atomiques ne sont ni plus ni moins vertes, durables et respectueuses du climat qu'avant.

Et pourtant, le fait que la Commission européenne a estimé que les centrales nucléaires remplissent – sous certaines conditions – les critères de durabilité de la taxinomie a fait bouger énormément de choses, y compris en Suisse, déclenchant entre autres une tempête d'indignation chez les détracteurs de l'atome.

Les centrales nucléaires sont-elles durables? Si l'on dresse un bilan factuel des plus de 50 ans durant lesquels l'énergie nucléaire a été utilisée en Suisse, il apparaît que l'atome possède de solides atouts en termes de développement durable: densité énergétique élevée, faible besoin de ressources par kilowattheure pour la construction et l'exploitation de centrales, fait que l'existence d'une centrale nucléaire préserve la nature de la construction de nombreuses autres centrales électriques, et protection du climat. Au cours des 50 dernières années, les deux tranches de Beznau ont permis à elles seules d'éviter l'émission de plus de 300 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Les centrales atomiques sont bonnes pour le climat.

Voilà pour les faits. Mais il y a aussi des questions, celle des risques inhérents à l'énergie nucléaire et celle de la gestion des déchets. La manière dont on perçoit l'énergie nucléaire et son caractère durable dépend de l'importance que l'on donne à chacun de ces éléments. Nous sommes influencés par notre savoir, nos expériences, nos émotions et, surtout, par les images mentales qu'évoque en nous l'énergie nucléaire.

En matière de protection du climat également, nos perceptions dépendent de nos images mentales. Nous considérons aujourd'hui Greta Thunberg et les grévistes du climat – ou peut-être Al Gore pour les plus âgés d'entre nous – comme les moteurs du mouvement climatique, parce qu'ils ont créé en nous des images chargées d'émotion. Mais la protection du climat a-t-elle été inventée au début du 21<sup>e</sup> siècle? Bien sûr que non! Lorsque, dans les années 60, la branche suisse de l'énergie a voulu, croissance économique oblige, satisfaire la soif d'énergie du pays en construisant des centrales électriques fossiles, le monde politique est intervenu, avec à sa tête l'ancien conseiller fédéral socialiste Willy Spühler, qui a obtenu – pour des raisons de protection du climat – qu'on renonce aux centrales fossiles et érige à leur place les deux tranches de l'île de Beznau.

Lorsque je les confronte à cette réalité sur Twitter, les politiciens de gauche et les Verts se dérobent, honteux. Mais Willy Spühler était-il un rêveur? Une personnalité détournée du droit chemin par le «lobby nucléaire»? Ou a-t-il simplement tiré la conclusion logique de deux faits dont il avait pris conscience, à savoir, premièrement, que la protection du climat doit constituer une préoccupation majeure pour chacun d'entre nous, et, deuxièmement, que le nucléaire est la seule technologie qui, du fait de sa densité énergétique élevée, est en mesure de produire de grandes quantités d'électricité par tous les temps sans émettre de CO<sub>2</sub>. Si l'on souhaite se faire une idée plus précise des faits et des relations entre eux, il suffit de consulter le livre de Bill Gates «Climat: comment éviter un désastre. Les solutions actuelles, les innovations nécessaires». L'étude de cet ouvrage devrait être érigée au rang de matière obligatoire dans les écoles, tout comme les discours séditieux de Greta Thunberg.

Tout au long de ces 50 dernières années, l'énergie nucléaire n'a jamais pu se résumer à la seule production d'électricité. Dès les années 70, elle a cristallisé les antagonismes du changement politique et social. Contre l'establishment, pour les petites gens. Contre les lobbies et les multinationales, contre la mondialisation et le gigantisme, pour tout ce qui est familier, villageois, petit. Contre la foi aveugle en la technologie, pour l'attachement à la nature. Contre le masculin, pour le féminin.

Ces antagonismes ont eu plus d'impact que n'importe quelle spécification technique sur la perception de

l'énergie nucléaire. Prenons l'exemple de la radioactivité: il est indéniable qu'elle fait partie de la nature et que nous en sommes entourés. Mais les perceptions sont tout autres: c'est la méchante technologie qui a créé la radioactivité, laquelle menace de nous tuer tous. Et la conséquence de ces perceptions est que nous introduisons des valeurs limites absurdes. Par ailleurs, nous avons une peur bleue des déchets radioactifs, qui ne se désintègrent que très lentement, alors que les déchets chimiques, qui ne se désintègrent pas du tout, semblent beaucoup plus acceptables...

Prenons les risques liés aux centrales atomiques, matérialisés par les catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima. Les faits sont clairs, documentés par l'ONU et ses organisations-filles. Pourtant, un ancien conseiller national continue de colporter l'affirmation clairement fautive selon laquelle Tchernobyl aurait fait «un million de victimes». Et en 2021, à l'occasion de la commémoration de l'accident de Fukushima, des forums verts ont parlé des «18'000 morts du nucléaire». Or, les faits sont là: l'énergie nucléaire a fait beaucoup moins de morts dans le monde que, par exemple, la production fossile d'électricité. Il n'en demeure pas moins que la perception des risques reste axée sur des affirmations fallacieuses comme celles-là.

Nos perceptions sont fortement conditionnées par les images iconiques que nous avons en tête. Jusqu'en mars 2011, les dangers du nucléaire étaient symbolisés par le champignon atomique d'Hiroshima: dans l'imaginaire collectif, l'explosion d'une centrale nucléaire déclenchait des torrents de feu et de radiations qui semaient la mort et la destruction dans des pays entiers. Une vision déformée, mais saisissante.

Depuis Fukushima, le rôle du champignon atomique a été repris par le film de la «centrale nucléaire qui explose», visionné des millions de fois dans le monde entier. Vous me direz qu'il s'agissait d'une explosion d'hydrogène, qu'aucune centrale nucléaire n'a explosé, et que ce qu'on voit sur la vidéo n'est pas ce qui s'est passé de plus grave à Fukushima. Oubliez cet argument. Les perceptions ont depuis longtemps supplanté la réalité.

Rien n'a plus de pouvoir que nos images mentales. Les arguments logiques n'ont quasiment aucune prise sur

elles. Car ces images iconiques sont associées à des émotions fortes. Et nous les condensons en un «savoir» qui nous semble indiscutable. Si quelqu'un présente des faits remettant en cause ce «savoir», il s'agit forcément d'«intox». Ce qui ne doit pas exister ne peut pas exister.

La manière dont le nucléaire est perçu dans l'opinion publique détermine si un pays utilisera cette énergie à l'avenir ou non. Si aujourd'hui, face au risque de pénurie d'électricité en hiver, on recommence à parler des avantages des centrales nucléaires, ce qui va m'intéresser, ce ne sont pas les normes de sûreté étendues de la génération actuelle, c'est-à-dire la réalité, mais les perceptions de mes concitoyennes et concitoyens. Il ne fait aucun doute qu'elles ont évolué vers une plus grande acceptation au cours de ces dernières années. La problématique du climat, les prix élevés de l'électricité, les inconvénients et les incertitudes du tournant énergétique ont incité de nombreuses personnes à réviser leur opinion sur le nucléaire.

Mais croire que l'on peut désormais gagner le public à la cause de l'atome en se fendant d'un exposé sur la physique des réacteurs dans une université populaire, c'est se fourvoyer, faute d'avoir compris que ce qui motive les gens, ce sont les représentations mentales qu'ils ont des risques. Et c'est précisément là que réside la clé de l'évolution des perceptions. Il faut parler des risques liés à l'énergie atomique et de la manière dont on s'y prend pour les prévenir et les maîtriser, c'est-à-dire décrire les solutions existantes et celles en cours de développement. À mon avis, il reste beaucoup à faire en la matière.

Le fait que j'utilise le terme de centrale atomique dans cet article vous a-t-il agacé? Cela ne m'étonne pas, car il n'est pas tout à fait correct. Mais les gens le comprennent, et ils l'utilisent. Quand on veut parler aux gens, il faut le faire avec leurs mots. (D.B.)

**Rainer Meier** (63 ans) a été responsable de la communication chez Axpo de 2006 à 2021. Il est aujourd'hui conseiller senior en gestion de réputation.

*Les auteurs invités nous donnent leur avis. Il ne s'agit pas nécessairement de celui du Forum nucléaire suisse.*

## Suisse

La Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra) a terminé les **travaux de forage à Rheinau**. Les premiers résultats indiquent que la roche est dense également dans les perturbations étudiées.



Les forages à Rheinau ont fourni des indications majeures sur la sécurité d'un dépôt en couches géologiques profondes dans le nord de la Suisse. (Photo: Nagra)

En 2021, les centrales nucléaires suisses ont produit **18,6 millions de mégawattheures** (MWh) nets d'électricité (2020: 23,1 mio. de MWh). Ce recul s'explique par les projets de modernisation importants dans la centrale nucléaire de Leibstadt. En dépit de cela, les installations nucléaires suisses ont fourni en 2021 près d'un quart de l'électricité consommée en Suisse.

Les **prescriptions légales** de sécurité ont été respectées en 2021 lors de l'exploitation des installations nucléaires suisses. C'est la conclusion à laquelle parvient l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) dans un premier bilan de l'année de surveillance écoulée.

La Conférence des présidents de partis du PLR Suisse a adopté une résolution relative à la sécurité de l'approvisionnement électrique, qui demande notamment **la fin de l'interdiction de nouvelles constructions nucléaires**.

L'élimination des débris hautement radioactifs dans la centrale nucléaire japonaise de Fukushima-Daiichi est exigeante. Des chercheurs de l'Institut Paul-Scherrer (PSI) ont étudié du matériel de simulation avec la **Source de Lumière Suisse synchrotron** (SLS).

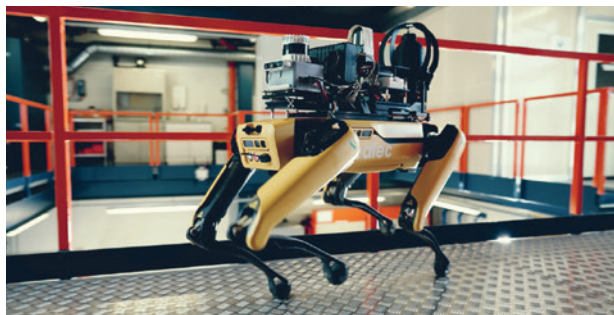
Le PLR du canton d'Argovie demande une planification de l'approvisionnement électrique du futur, qui soit **ouverte à toutes les technologies**.



«Nous devons empêcher une pénurie d'électricité par tous les moyens. Parmi les différents leviers figurent la prolongation des durées de fonctionnement des centrales nucléaires et la prise en compte de l'ensemble des technologies disponibles. Les interdictions technologiques doivent être suspendues», estime Sabina Freiermuth, présidente du parti PLR d'Argovie. (Photo: Sabina Freiermuth)

La start-up genevoise Transmutex développe un nouveau type de réacteur nucléaire qui permettra de fournir un courant abordable et pauvre en carbone. L'entreprise entend également désamorcer les problématiques actuelles rencontrées par l'énergie nucléaire et liées à la sécurité, aux déchets à longue durée de vie et à la prolifération nucléaire. Pour ce faire, elle mise sur un **réacteur au thorium** combiné à un accélérateur de particules.

La centrale nucléaire de Leibstadt teste un **robot** qui soutient les collaborateurs dans leur travail quotidien. Le quadripède télécommandé effectue des rondes dans les zones où le rayonnement est élevé et établit des cartes radiographiques.



Des techniques dernier cri au service de la radioprotection: le robot Spot se rend dans les zones présentant un débit de dose élevé. (Photo: Xpso)

## À l'étranger

La production d'électricité issue du nucléaire a augmenté de **3,5%** en 2021, et a quasiment atteint le niveau de 2019. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime qu'elle augmentera d'1% par an entre 2022 et 2024. La croissance concernera en premier lieu la région Asie-Pacifique.

D'après les termes employés par son chef, Friedrich Merz, les partis frères CDU et CSU, abrégés en «**Union**», veulent aborder les nouvelles possibilités d'utilisation de l'énergie nucléaire en Allemagne «sans parti pris».



Le chef de la CDU, Friedrich Merz, demande un débat sans parti pris également pour la fusion nucléaire et les nouvelles technologies nucléaires. (Photo: Friedrich Merz)

Le président français **Emmanuel Macron** souhaite construire six nouvelles tranches, avec une option pour en construire huit autres.

Un sondage réalisé en janvier 2022 à la demande de la start-up Fermi Energia montre que 68% des **Estoniens** sont favorables à l'utilisation d'une centrale nucléaire de la nouvelle génération pour garantir la sécurité de l'approvisionnement électrique du pays.

L'autorité belge de sûreté nucléaire a délivré le permis de prolongation de l'autorisation d'exploitation de **deux des sept tranches nucléaires belges** et le gouvernement devra prendre une décision définitive à ce sujet au premier trimestre 2022.

Westinghouse a signé plusieurs déclarations d'intention portant sur sa collaboration avec des entreprises polonaises. Le projet visé porte sur la construction de six tranches **AP1000 en Pologne**.

En 2025, l'organisation finlandaise de gestion des déchets, Posiva Oy, mettra en service le premier **dépôt en couches géologiques profondes** destiné au combustible usé dans le monde. Avant cela, elle devra démontrer dans le cadre d'un fonctionnement test qu'elle est capable de procéder au conditionnement des déchets en milieu industriel, puis de les stocker à 400 mètres sous terre.



Une galerie du dépôt profond finlandais d'Onkalo. À compter de 2025, des assemblages combustibles usés seront stockés de manière durable et sûre à 400 mètres de profondeur. (Photo: Posiva)

Le gouvernement suédois a donné son feu vert à la construction du premier **dépôt en couches géologiques profondes** destiné au combustible usé à Forsmark, et d'une **installation d'encapsulation** à Oskarshamn.



Photomontage du dépôt profond de Forsmark. Le système de tunnels s'étend sur une longueur totale de 60 kilomètres. Le dépôt profond possède une superficie de trois à quatre km<sup>2</sup> sous terre. Il se trouve à une profondeur de 500 mètres. (Photo: SKB)



Le gouvernement suédois a autorisé la demande déposée par la société de gestion des déchets Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) concernant **l'extension du dépôt en couches géologiques profondes destiné aux déchets faiblement et moyennement radioactifs** de Forsmark – le SFR.



L'extension en projet (en bleu) du SFR comprend six nouvelles cavernes. (Photo: SKB)

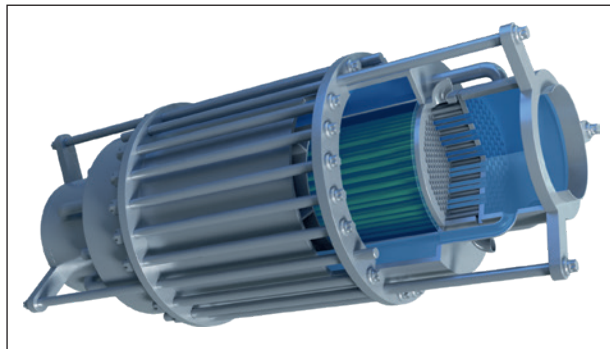
L'Agence internationale de l'énergie (AIE) encourage le **Canada** à planifier l'utilisation de petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactors, SMR) pour la fin de la décennie. Le pays doit suivre la dynamique de sa feuille de route sur les SMR.

Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) a homologué une nouvelle méthode d'**impression 3D** de composants hautement résistants destinés aux réacteurs nucléaires.



Un nouveau procédé d'impression 3D de composants de réacteurs nucléaires, développé par l'Oak Ridge National Laboratory du Département américain de l'énergie, a été homologué par Ultra Safe Nuclear Corporation. (Photo: Carlos Jones / ORNL, DOE)

L'entreprise Dual Fluid a demandé à l'Université technique de Dresde de réaliser une analyse de stabilité de son réacteur. La chaire Hydrogène et Technique nucléaire **calcule le déploiement de la puissance** à l'intérieur du réacteur.



Le cœur du réacteur à double fluide. (Photo: Dual Fluid)

La Grande-Bretagne envisage de soutenir la construction de la centrale nucléaire en projet **Sizewell C**, dans le comté de Suffolk, à hauteur de 100 millions de livres (CHF 122 mio.).

La stratégie nationale de sortie du charbon et de restructuration des régions charbonnières, adoptée par le gouvernement **slovene**, prévoit que la Slovénie sortira du charbon au plus tard en 2033. →



Représentation du site de Krško. La Slovénie souhaite sortir du charbon d'ici à 2033. «Nous avons donc lancé rapidement la construction de la tranche 2», a déclaré le ministre des Infrastructures, Jernej Vrtovec. (Photo: GEN Group)

Des scientifiques de l'institut russe de Botchvar ont développé un **procédé efficace de décontamination d'appareils de laboratoire**, qui doit permettre de réduire la quantité des déchets radioactifs ainsi que la radioactivité résiduelle de ces derniers.



Des scientifiques de l'Institut Botchvar. (Photo: Tvel)

Selon l'autorité britannique de sûreté nucléaire (ONR) et l'autorité environnementale britannique (EA), la **conception britannique du type chinois Hualong One** est adaptée pour la Grande-Bretagne.



Représentation du UK HPR1000, homologué en Grande-Bretagne, qui pourrait être construit à Bradwell. (Photo: General Nuclear System)

TerraPower Isotopes fournira à l'entreprise australienne Radiopharm Theranostics le radioisotope **actinium 225** (Ac-225), utilisé dans les essais pharmaceutiques pour les thérapies alpha ciblées.

L'autorité de sûreté nucléaire slovaque a rejeté le recours déposé par l'organisation de protection de l'environnement autrichienne Global 2000 et a publié le projet d'autorisation d'exploitation de la tranche **Mochovce 3**.



Prise de vue aérienne de la centrale nucléaire slovaque de Mochovce. (Photo: Slovenské elektrárne)

La Nuclear Power Plants Authority (NPPA) a remis à l'autorité de sûreté nucléaire égyptienne (ENRRA) le dossier d'autorisation de la construction des tranches **El-Dabaa 3 et 4**.



Les bâtiments auxiliaires sont déjà en construction sur le site d'El Dabaa, en Égypte. (Photo: ENRRA)

Dans une lettre ouverte, 79 scientifiques, académiciens et entrepreneurs ont demandé au gouverneur de Californie, Gavin Newsom, de maintenir la centrale de **Diablo Canyon** en service. Le groupe rappelle l'importance du courant pauvre en CO<sub>2</sub> injecté par l'installation sur le réseau de l'État fédéral.

Le premier béton de la seconde tranche Hualong-One sur les six prévues sur le site de **Sanaocun**, au sud de Shanghai, dans l'est de la Chine, a été coulé. Une autre tranche du type Hualong One – **Changjiang 4** – dans la province insulaire de Hainan, sur la côte sud-est, est également en construction depuis fin de 2021.



Les travaux de construction de la tranche Sanaocun 2, du type Hualong-One, ont été lancés officiellement. (Photo: CGN)

Des ouvriers ont coulé le premier béton de la tranche nucléaire **Tianwan 8** dans la province chinoise du Jiangsu. La troisième tranche de la génération russe III+ avancée est ainsi officiellement en construction en Chine.

Le nouveau brise-glace atomique russe de la classe LK-60 – **Sibir** – a été mis en service.



Le brise-glace nucléaire Sibir permettra de dégager le passage du Nord-Est durant toute l'année. (Photo: Baltiskii Zavod)

La tranche nucléaire du type Hualong One **Fuqing 6** dans la province du Fujian, dans le sud-est du pays, a été connectée au réseau électrique national le 1<sup>er</sup> janvier 2022.



Fuqing 6 produira 10 millions de MWh électriques par an. (Photo: CNNC)

La mise en service de l'EPR **Flamanville 3**, en France, est à nouveau reportée. D'après Électricité de France (EDF), la nouvelle modification du calendrier et des plans de financement est due aux conditions rendues plus difficiles en raison de la pandémie.



Le premier chargement en combustible de la tranche Flamanville 3 a été repoussé au 2<sup>e</sup> trimestre 2023. (Photo: EDF / Alexis Morin)

L'**Ukraine** souhaite augmenter la production d'uranium nationale afin de couvrir le besoin en combustible de ses centrales nucléaires après 2026. Au total, 330 millions de francs suisses seront investis dans le développement d'installations d'exploitation et de retraitement de l'uranium dans le cadre d'un programme national sur cinq ans. →

La centrale nucléaire d'**Hunterston-B**, dans le North Ayrshire, en Écosse, est désormais arrêtée dans son intégralité depuis la mise hors service de Hunterston-B2. Hunterston-B1 avait été mise à l'arrêt le 26 novembre 2021.



La centrale nucléaire d'Hunterston-B a été arrêtée après près de 46 années de fonctionnement. (Photo: EDF Energy)

Le ministère brésilien de l'Exploitation minière et de l'Énergie (MME) et Electric Energy Research Center (Cepel) ont signé un accord de coopération portant sur la recherche de sites dans le cadre de projets de construction de nouvelles centrales nucléaires au **Brésil**.



Le Brésil prévoit de construire de nouvelles centrales nucléaires d'ici à 2050. Le ministère de l'Exploitation minière et de l'Énergie finance la recherche de nouveaux sites à hauteur de 7 millions de réals brésiliens (CHF 1,2 mio.). La photo montre le site d'Angra. (Photo: Eletronuclear)

Framatome et Exelon Generation ont signé une déclaration d'intention portant sur leur collaboration dans le cadre de la production de **cobalt 60** (Co-60) à des fins médicales et industrielles.

En **Allemagne**, les réacteurs à eau sous pression Brokdorf et Grohnde ainsi que le réacteur à eau bouillante Gundremmingen-C ont été définitivement déconnectés du réseau dans le cadre de la politique de sortie du nucléaire menée par le pays.



Allemagne: Gundremmingen-C ainsi que deux autres tranches allemandes ont été définitivement arrêtées fin 2021. (Photo: RWE)

D'après l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), un essai pilote de la **Sterile Insect Technique** mené dans un quartier de la capitale cubaine, La Havane, a permis de réduire le nombre de moustiques jusqu'à 90% en 2020. (M.A./C.B./D.B.)



Les femelles du moustique *Aedes aegypti* sont des vecteurs de la dengue. Les campagnes de stérilisation des insectes, telles que celles qui sont mises en place à la Havane et à Cuba, reposent sur la stérilisation des mâles pour contrôler la population d'insectes. (Photo: The Institute of Tropical Medicine Antwerp)

Pour une version plus détaillée des articles de cette rubrique et pour des informations sur les autres questions qui font l'actualité de la branche et de la politique nucléaires aux plans national et international, rendez-vous sur [www.forumnucleaire.ch](http://www.forumnucleaire.ch).

# L'énergie nucléaire, un élément de solution à la problématique du changement climatique?



**Dr. Gernot Wagner**  
Économiste du climat

**En investissant dans la prochaine génération de centrales nucléaires, le monde pourrait se doter d'un important instrument de réduction de ses émissions de dioxyde de carbone.**

Le climat de la planète continue de se réchauffer, si bien que plus de 50 nations se sont engagées à atteindre le «zéro émission nette» d'ici le milieu du siècle. Au cours des prochaines décennies, elles devront donc réduire radicalement les quantités de gaz à effet de serre qu'elles génèrent, tout en éliminant de l'atmosphère l'équivalent de ce que nous émettons encore. Les centrales électriques au charbon sont sur le déclin, et les sources d'énergie propres comme le solaire et l'éolien en pleine croissance. Aux États-Unis, la production d'énergie à partir de sources renouvelables, hydroélectricité et géothermie incluses, a dépassé le charbon en 2020 et occupe désormais la deuxième place derrière le gaz.

Dans cette montée en puissance des énergies sobres en carbone, l'atome constitue une exception notable, puisqu'il est pratiquement au point mort depuis des décennies. La plupart des réacteurs actuellement en service ont été construits dans les années 1970, et bon nombre d'entre eux sont mis à l'arrêt définitif, aussi bien aux États-Unis qu'en Europe. Aujourd'hui, la production des 440 tranches nucléaires en service dans le monde couvre 10% de la consommation totale d'électricité, contre plus de 15% en 2005. Ce recul est dû à l'expansion rapide des capacités mondiales de production, une expansion dont le nucléaire a, en grande partie, été exclu. Si les réacteurs vieillissants ne sont pas remplacés par de nouvelles installations, l'énergie nucléaire est vouée à disparaître des pays occidentaux, comme l'a fait la production de charbon.

## **L'atome constitue une source d'énergie relativement stable**

Bien que sa sûreté suscite depuis longtemps des inquiétudes, l'énergie nucléaire est susceptible de jouer un rôle de poids dans la décarbonation. Une récente étude commandée par l'Environmental Defense Fund et la Clean Air Task Force a conclu que, pour tenir sa promesse d'atteindre le zéro émission nette d'ici 2045, l'État de Californie a besoin d'une électricité qui soit non seulement «propre», mais aussi «solide», c'est-à-dire «qui ne dépende pas des conditions météorologiques». Il en va de même dans le monde entier, et l'atome constitue une source d'énergie relativement stable.

Les centrales nucléaires ne dépendent pas d'un approvisionnement constant en charbon ou en gaz, matières premières dont les marchés peuvent subir des perturbations propres à entraîner des flambées des prix de l'électricité, comme cet hiver en Europe. Elles ne sont pas non plus dépendantes des conditions météorologiques. Le solaire et l'éolien ont un grand potentiel, mais pour assurer un approvisionnement fiable, ils ont besoin de batteries avancées et d'une gestion de réseau hi-tech afin d'équilibrer fluctuations de production et pics de consommation. Cet exercice d'équilibriste est plus facile et moins coûteux avec le type d'énergie qu'offre l'atome.

Les émissions de CO<sub>2</sub> de l'énergie nucléaire sont comparables à celles du solaire et de l'éolien, surtout si l'on prend

en compte le cycle de vie complet des installations. Le solaire et l'éolien produisent tous deux de l'électricité totalement exempte de CO<sub>2</sub> une fois les installations en service, mais ils nécessitent au préalable un investissement important en carbone. Les panneaux solaires dépendent de métaux qui doivent être extraits, et une éolienne contient en moyenne quelque 200 tonnes d'acier, voire plus. Il sera un jour possible de produire cet acier sans émettre de CO<sub>2</sub>, mais ce n'est pour l'heure pas le cas.

Le plus grand défi écologique de l'énergie nucléaire est celui des déchets qu'elle génère, lesquels nécessitent un stockage sûr pendant des milliers, voire des dizaines de milliers d'années. Mais il n'y en a pas beaucoup: l'ensemble des déchets nucléaires produits aux États-Unis depuis les années 1950 s'élève à environ 85'000 tonnes

de matériaux. Ce chiffre doit être mis en balance avec les dizaines de milliards de tonnes de dioxyde de carbone qui auraient été émises si la même quantité d'électricité avait été produite à partir de combustibles fossiles.

Selon les estimations du ministère américain de l'Énergie, si l'on entassait l'ensemble des déchets nucléaires du pays sur un seul terrain de football, ils atteindraient une hauteur de 9 mètres. En comparaison, le dioxyde de carbone, un gaz incolore et inodore, est généralement rejeté dans l'atmosphère, d'où il impacte le climat de la planète entière.

L'empreinte physique des centrales nucléaires est faible au regard de celle des barrages, des mines à ciel ouvert



Le 12 octobre 2021, Emmanuel Macron présente un vaste plan d'investissement intitulé «France 2030». Aux yeux du président français, l'énergie nucléaire est une chance – pour la France, pour l'Europe et pour le climat. (Photo: copie d'écran du point de presse diffusé sur YouTube)

ou des parcs solaires. L'énergie nucléaire pourrait même présenter de grands avantages, en termes d'émissions de gaz à effet de serre, par rapport à la bioénergie, qui peut émettre beaucoup de CO<sub>2</sub> pour produire du carburant à partir de matières organiques, et à la force hydraulique, qui peut générer des tonnes de CO<sub>2</sub> au travers de la construction des grands barrages et libérer de grandes quantités de méthane au travers de la décomposition des matières végétales présentes dans les lacs d'accumulation.

### **Les gouvernements du monde entier commencent à voir l'énergie nucléaire d'un autre œil**

Au vu de ces avantages, les gouvernements du monde entier ont commencé à voir l'énergie nucléaire d'un autre œil. Aux États-Unis, le paquet de 1200 milliards de dollars en faveur des infrastructures signé par le président Joe Biden en novembre 2021 comprend 6 milliards de dollars de subventions destinées à maintenir les centrales nucléaires existantes en service plus longtemps. En outre, 2,5 milliards de dollars sont prévus pour la recherche et développement de nouvelles technologies nucléaires.

En France, dans le cadre d'un effort massif de «réindustrialisation», le gouvernement consacrera 1,13 milliard de dollars à la recherche et au développement de l'énergie nucléaire jusqu'en 2030. L'accent sera mis sur le développement d'une nouvelle génération de petits réacteurs modulaires (SMR) afin de remplacer une partie du parc actuel de réacteurs, qui fournit environ 70% de l'électricité du pays.

Aux Pays-Bas, le nouveau gouvernement de coalition considère l'énergie nucléaire comme un «complément» à l'énergie solaire, éolienne et géothermique dans le mix énergétique bas carbone du pays. Les Néerlandais sont en train de prolonger la durée d'exploitation d'une centrale nucléaire et prévoient de construire deux nouveaux réacteurs, allouant 566 millions de dollars à cet objectif. Et pas plus tard qu'au début du mois de février, l'Union européenne a proposé, dans une démarche controversée, de classer l'énergie nucléaire parmi les sources d'énergie «vertes» pouvant bénéficier de conditions de financement plus favorables, «afin de faciliter la transition vers un avenir basé principalement sur les énergies renouvelables».

La Chine, en revanche, a l'intention de construire plus de 150 nouveaux réacteurs au cours des 15 prochaines années. D'ici cinq ans, elle ravira aux États-Unis leur place de premier producteur mondial d'énergie nucléaire.

Il n'en demeure pas moins que l'énergie nucléaire n'est pas la meilleure réponse partout. Ainsi, l'Islande s'est mise à produire de l'électricité à faible teneur en carbone bien avant que le changement climatique ne devienne un problème et que les énergies solaire et éolienne ne deviennent bon marché. À une certaine époque, le pays importait du charbon pour produire de l'électricité, avant de développer sa production hydroélectrique à partir des années 1950. Aujourd'hui, l'Islande tire les trois quarts de son électricité de la force hydraulique et un quart de la géothermie.

### **Le cas de l'Allemagne: les lourdes conséquences de la remise en question de l'atome**

D'autres pays ont explicitement rejeté l'énergie nucléaire, en en payant parfois le prix fort sur les plans économique et climatique. L'Autriche tire 60% de son électricité de centrales hydroélectriques situées le long du Danube et dans les Alpes, et elle est bien intégrée dans le réseau électrique européen, qui tire une partie de sa stabilité des centrales nucléaires situées juste derrière la frontière. Le pays a construit son unique réacteur nucléaire dans les années 1970. Mais en 1978, lors d'un référendum âprement disputé, les Autrichiens ont voté contre la mise en service de la centrale. À la place, l'Autriche a construit une centrale à charbon qui, pendant plus de trois décennies, a été l'un des plus gros émetteurs de dioxyde de carbone du pays et une source majeure de pollution atmosphérique. Elle a été reconvertie au gaz en 2019.

L'exemple le plus lourd de conséquences de la remise en cause de l'énergie nucléaire est celui de l'Allemagne, le bastion industriel de l'Europe. Avant 2011, l'énergie nucléaire représentait environ 25% de la production d'électricité allemande. Le pays n'avait pas construit de nouveau réacteur depuis la fin des années 1980, à cause de l'accident de Tchernobyl (Union soviétique) survenu en 1986, mais prévoyait d'exploiter la plupart de ses réacteurs jusque dans les années 2030.

Puis a eu lieu le 11 mars 2011 l'accident nucléaire de Fukushima, déclenché par le plus fort séisme jamais en-

registré au Japon. Contrairement à Tchernobyl, qui a entraîné des pertes humaines considérables et des problèmes de santé à long terme – y compris chez les enfants exposés à la radioactivité in utero dans une zone s'étendant jusqu'à la Suède – cet accident n'a provoqué aucun décès et « n'a pas affecté la santé des habitants de Fukushima » du fait de l'exposition aux radiations, selon un rapport établi par l'ONU en 2021. En 2018, un ancien travailleur de la centrale de Fukushima est décédé d'un cancer qui aurait pu être lié aux radiations, mais aucun lien de ce type n'a été établi pour les habitants des communautés environnantes, même à proximité des réacteurs.

Après l'accident, la décision du Japon de fermer ses centrales nucléaires et de laisser tourner ses centrales au charbon a entraîné une augmentation de la consommation de combustibles fossiles et une pollution de l'air qui peut être statistiquement associée à des milliers de décès. Ces décès contrastent fortement avec le bon bilan de sûreté des réacteurs occidentaux, qui, du fait de leur conception et de la réglementation qui s'y applique, sont bien plus sûrs que les anciens réacteurs soviétiques comme celui de Tchernobyl.

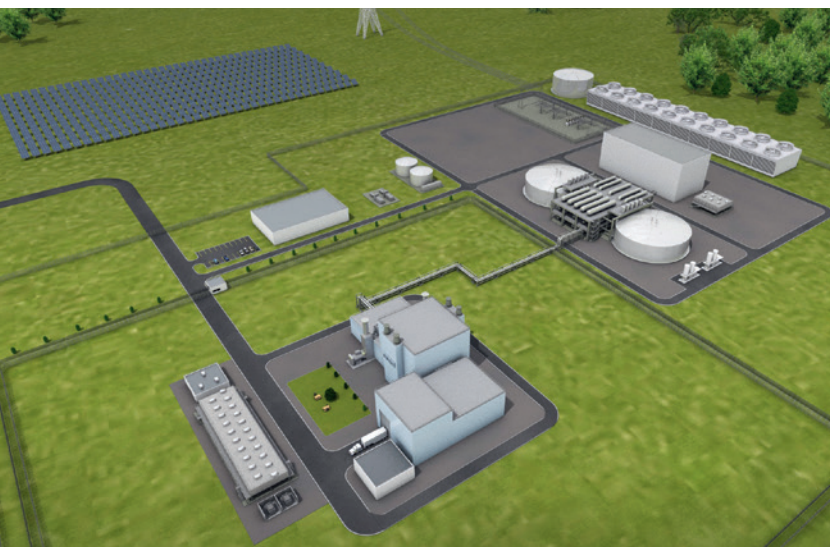
Après Fukushima, les États-Unis ont réaffirmé leur engagement en faveur de l'énergie nucléaire, tandis que l'Allemagne a immédiatement fermé près de la moitié de ses capacités nucléaires et accéléré son abandon total de l'atome. En 2020, l'Allemagne ne tirait plus que 10% de son électricité du nucléaire, contre 25% avant Fukushima. Les trois derniers réacteurs du pays doivent être fermés cette année. En conséquence, l'Allemagne émet plus de huit tonnes de CO<sub>2</sub> par habitant, contre moins de cinq tonnes pour la France, qui dispose d'un grand parc nucléaire.

Dans le cadre de son ambitieux tournant énergétique, le nouveau gouvernement allemand a avancé de 2038 à 2030 la date prévue pour la sortie du charbon. Reste que l'abandon prématuré de l'énergie nucléaire décidé après Fukushima et la dépendance au charbon résultante ont entraîné l'émission de centaines de millions de tonnes de dioxyde de carbone et des milliers de décès dus à la pollution atmosphérique locale.

Si l'énergie nucléaire stagne en Occident, c'est aussi en raison de ses coûts élevés, en partie liés aux mesures de sûreté. Alors que le solaire et l'éolien sont de moins en moins chers, l'énergie nucléaire devient de plus en plus coûteuse. Les États-Unis ne construisent actuellement que deux nouveaux réacteurs, tous deux à proximité de la ville d'Augusta (Géorgie), pour un coût total de plus de 28 milliards de dollars, soit environ le double des prévisions initiales. La France ne construit actuellement qu'un seul réacteur, qui devrait être raccordé au réseau cette année; il aura coûté 21,5 milliards de dollars, au lieu des 3,9 milliards initialement prévus, et a une décennie de retard sur le calendrier. En Grande-Bretagne, deux réacteurs sont en cours de construction pour un coût total de 30 milliards de dollars, ce qui éclipse largement les 516 millions de dollars investis par le pays dans la recherche et développement de petits réacteurs modulaires.

### L'énergie nucléaire comporte des risques, tout comme le réchauffement de la planète

Les SMR et autres technologies nouvelles sont le grand espoir de l'industrie nucléaire. L'un des axes de recherche est l'utilisation de nouvelles matières fissiles, comme le thorium, qui est plus abondant que l'uranium, produit



Représentation graphique du réacteur rapide refroidi au sodium de TerraPower en projet sur le site de Kemmerer dans le Wyoming. Le démonstrateur pourrait entrer en service à l'horizon 2028. (Photo: TerraPower)



moins de déchets et n'a pas d'applications militaires directes. D'autres technologies visent à utiliser les déchets nucléaires existants comme combustible. L'abandon des grands réacteurs au profit des SMR pourrait, dans un premier temps, augmenter le coût unitaire de l'énergie produite. Mais cela offrirait des modèles de financement auxquels les grands réacteurs n'ont pas accès, ce qui permettrait de réduire les coûts puisque ces nouveaux réacteurs suivent une conception uniforme plutôt qu'individuelle. La construction d'un grand nombre de petits réacteurs permet également un apprentissage par la pratique, un modèle que la Chine poursuit activement à l'intérieur du pays et à l'étranger dans le cadre du gigantesque projet d'infrastructure «Nouvelle route de la soie».

Aucune de ces nouvelles technologies ne sera d'emblée compétitive sur le plan économique. Certaines technologies encore expérimentales, comme les réacteurs au thorium de la Chine, pourraient toutefois s'avérer payantes. Et TerraPower, une entreprise fondée par Bill Gates qui travaille depuis plus d'une décennie sur des réacteurs au sodium, a lancé une technologie à base de sel fondu qui pourrait faire une réelle différence si elle fonctionne. Il faut essayer. Comme le solaire et l'éolien, l'énergie nucléaire pourrait, avec un soutien financier adéquat, gravir la courbe d'apprentissage et faire glisser la courbe des coûts vers le bas.

Le soutien public à la recherche sur l'énergie nucléaire n'est pas un substitut au développement rapide du solaire et de l'éolien. Subventionner la recherche de nouvelles technologies nucléaires, c'est un peu comme investir dans les technologies visant à capter le CO<sub>2</sub> dans les cheminées ou directement dans l'air: cela ne nous dispense pas de réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Pour atteindre les objectifs ambitieux du zéro émission nette, il nous faut agir sur chacun de ces axes. Le monde ne peut se permettre ni d'ignorer les possibilités offertes par les nouvelles technologies nucléaires ni de fermer prématurément des centrales nucléaires qui fonctionnent de manière parfaitement sûre.

L'énergie nucléaire comporte des risques. Mais le réchauffement climatique aussi. Le coût de l'énergie nucléaire est certes élevé aujourd'hui, mais cela ne signifie pas forcément qu'il le sera encore dans quelques décennies, lorsque le monde sera sur le point d'alimenter ses réseaux exclusivement avec des technologies bas carbone. Pour des raisons de sécurité énergétique et de changement climatique, les gouvernements occidentaux, chinois et autres devraient continuer à investir dans la recherche et développement nucléaires. (D.B.)

Ce texte a été publié le 8 janvier 2022 dans l'édition imprimée du «Wall Street Journal», à la rubrique «L'essai du samedi». Il l'est ici en traduction française et sous une forme légèrement raccourcie. Les titres intermédiaires sont de la rédaction. Reproduction avec l'aimable autorisation de l'auteur.

Né en Autriche, **Gernot Wagner** a obtenu son doctorat en économie et sciences politiques à Harvard. Actuellement en congé de la New York University, il enseigne l'économie du climat à la Columbia Business School, tient la chronique «Risky Climate» de Bloomberg Green et est l'auteur de «Geoengineering: The Gamble» (Polity Press, 2021)  
gwagner.com

Gernot Wagner est aussi notre partenaire de discussion sur le podcast NucTalk: [www.nuklearforum.ch/de/podcast/nuctalk-11](http://www.nuklearforum.ch/de/podcast/nuctalk-11)

*Les auteurs invités nous donnent leur avis. Il ne s'agit pas nécessairement de celui du Forum nucléaire suisse.*

## Campagne de tweets du WWF: une bonne leçon, mais pour qui?

Le WWF (anciennement World Wildlife Fund, aujourd'hui World Wide Fund For Nature) est contre le nucléaire. L'opposition d'une des plus grandes organisations de protection de l'environnement à l'une des sources d'énergie les plus respectueuses de la nature est en soi un tel paradoxe, pour ne pas dire une telle aberration, que nous pourrions presque clore cette chronique sur ce constat.

Mais cette chronique, nous avons décidé de la consacrer à une action concrète du WWF Allemagne. À l'instar de la quasi-totalité des soi-disant défenseurs de l'environnement que compte l'Allemagne et des trois-quarts de son gouvernement fédéral, le WWF s'est montré scandalisé par l'inclusion du nucléaire dans la taxinomie verte de l'UE, celle des investissements durables. À noter toutefois que contrairement à la grande majorité du monde politique allemand, l'ONG a au moins eu le mérite d'être cohérente en s'opposant aussi au label vert attribué au gaz naturel.

Pour protester contre cette inclusion, le WWF Allemagne a invité ses followers à lancer un raz-de-marée de tweets. Il s'agissait d'apposer son nom sur un message

prédéfini ou librement formulé portant le hashtag #PasVert, message qui était ensuite posté automatiquement sur le profil «Action WWF» de Twitter. Malheureusement pour le WWF, cette campagne de tweets à vocation anti-nucléaire a été «ternie» par de nombreuses déclarations en faveur de l'atome, du moins pendant quelques heures, jusqu'à ce que les responsables mettent fin à l'opération et procèdent à ce qui semble bien avoir été une censure des messages jugés indésirables. Nous n'avons en tout cas pas retrouvé les tweets ci-dessous le lendemain. Au fait: notre préféré est celui de Jürgen Trittin, membre du parti écologiste Alliance 90/Les Verts et qui fut ministre fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire d'octobre 1998 à novembre 2005. (M.R./D.B.)



Quelques-uns des tweets pronucléaires postés dans le cadre de la campagne du WWF. (Photo: copies d'écran de Twitter)

## La start-up suisse Transmutex développe un nouveau réacteur à base de thorium

La controverse sur la question de savoir s'il faut recommencer à construire des centrales nucléaires bat son plein dans les médias suisses. L'une des critiques les plus fréquemment formulées à l'encontre de ces installations est que les déchets résultant de leur exploitation restent radioactifs pendant des centaines de milliers d'années. Lors de la première Rencontre du Forum de 2022, Franklin Servan-Schreiber, CEO et cofondateur de la start-up genevoise Transmutex SA, a présenté un concept de réacteur permettant de transmuter ces déchets.

«L'énergie nucléaire est de retour sur la scène politique suisse!» C'est par ces mots que Hans-Ulrich Bigler, président du Forum nucléaire suisse, a ouvert la première Rencontre du Forum de 2022, retransmise en direct sur YouTube depuis Aarau. Les journaux regorgent d'articles sur le nucléaire, en lien aussi bien avec la Suisse qu'avec l'étranger, a relevé le président, avant d'évoquer la renaissance de l'atome annoncée en février par Emmanuel Macron pour la France. De l'avis du président français, l'esprit d'entreprise et l'innovation dans le domaine du nucléaire contribueront de manière décisive à la décarbonation.

M. Bigler a ensuite passé la parole à Franklin Servan-Schreiber, CEO et cofondateur de Transmutex, une start-up genevoise qui développe un concept de réacteur innovant et durable visant à minimiser la radioactivité des déchets nucléaires grâce à la transmutation et à utiliser des déchets radioactifs comme combustible. «Les composants les plus dangereux des déchets, ceux à la vie la plus longue, seront transformés en déchets à vie courte sous l'effet d'un bombardement de neutrons, ce qui réduira de beaucoup le volume des déchets devant tout de même être stockés en profondeur, et ramènera à 500 ans la durée de ce stockage», a expliqué M. Servan-Schreiber. «Nous utiliserons la chaleur générée par la fission nucléaire dans le réacteur pour produire de l'électricité.»

### Le réacteur de Transmutex offrira un niveau de sûreté élevé

Pour pouvoir transmuter les déchets, le TMX-START (Subcritical Transmutation Accelerated Reactor using Thorium) de Transmutex combine un réacteur au thorium refroidi au métal liquide et un accélérateur de particules. Comme combustible primaire, il utilise du thorium en lieu et place d'uranium, car le thorium est disponible

en abondance sur la terre et a un cycle qui présente l'avantage d'empêcher la prolifération nucléaire. La fission du thorium à un état sous-critique requiert des neutrons provenant d'un accélérateur de particules.

«Sous-critique» signifie que le TMX-START n'est pas en mesure de générer à lui seul une réaction en chaîne autoentretenue. Pour maintenir la réaction en chaîne, il a besoin de neutrons issus d'un accélérateur de particules afin que le processus d'enrichissement du thorium 232 en uranium 233 puisse se faire et que l'uranium 233 puisse ensuite être fissionné en libérant de l'énergie. C'est ce qui rend le réacteur si sûr, explique M. Servan-Schreiber: «En cas d'interruption du flux neutronique, le réacteur s'arrête dans les deux millisecondes qui suivent. Il s'agit là d'une propriété essentielle, puisqu'elle garantit la sûreté intrinsèque du réacteur.» Le refroidissement au métal liquide permet en outre d'évacuer efficacement la puissance résiduelle. Un accident nucléaire avec explosion d'hydrogène tel que celui survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, dont le réacteur était refroidi à l'eau, n'est donc pas possible.

### Un réacteur de démonstration dans 10 ans déjà

Le CEO se montre confiant: «Nous aurons un prototype opérationnel dans une dizaine d'années». Pour réaliser cette prouesse, l'entreprise soigne ses contacts avec des entreprises leaders dans les domaines de la recherche et de la production industrielle. Et elle s'abstient de vouloir réinventer la roue. «Les principaux éléments et les principales technologies nécessaires à la construction du prototype sont déjà disponibles, de sorte que nous pouvons nous concentrer sur l'assemblage des composants et les tests», explique M. Servan-Schreiber, avec quelques exemples de collaborations à l'appui: «Nous construirons

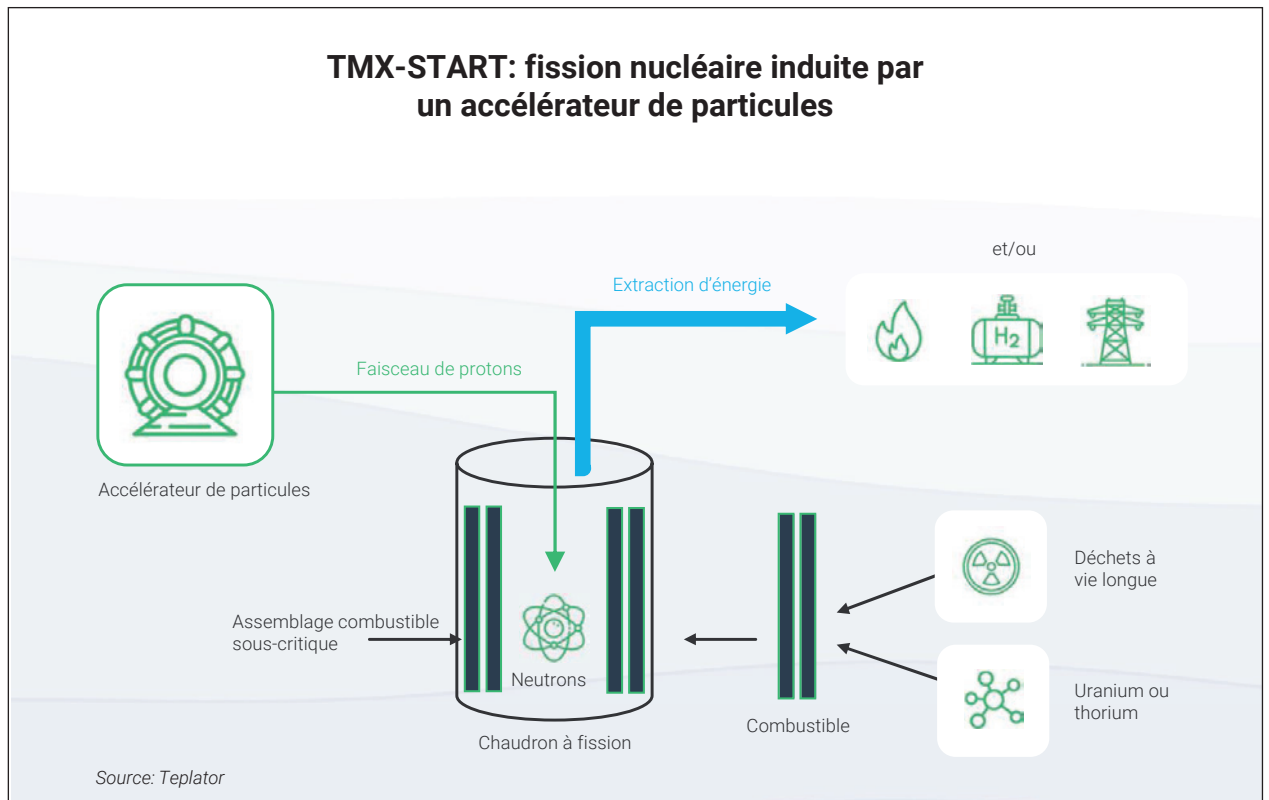


Schéma simplifié du mode de fonctionnement du réacteur au thorium piloté par accélérateur de particules de Transmutex. L'installation produira non seulement de la chaleur, de l'hydrogène et de l'électricité, mais permettra aussi de transmuter des déchets radioactifs.

l'accélérateur de particules avec l'Institut Paul Scherrer (PSI), en faisant appel au savoir-faire du CERN. Nous nous appuyerons également sur la longue expérience d'un fabricant de réacteurs renommé, qui nous fournira le réacteur au thorium sous licence», ajoute-t-il, en laissant entendre que des négociations sont déjà en cours.

Il annonce en outre avec fierté que «grâce à une collaboration avec le centre de recherche nucléaire tchèque Centrum výzkumu Řež (CVŘ), nous sommes l'une des rares start-up à avoir accès à un réacteur en service pour effectuer des tests». La start-up collaborera également avec l'Argonne National Laboratory américain pour le traitement et la gestion des résidus de la transmutation.

### Le financement reste à assurer

M. Servan-Schreiber a brièvement abordé la question du financement des entreprises Clean-Tech en Suisse, se

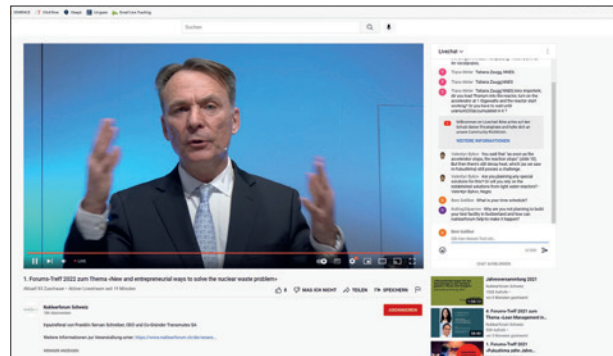
montrant confiant dans la possibilité d'obtenir les fonds nécessaires à son projet. La start-up genevoise n'ayant encore réuni que 8 millions de francs, alors que le coût du développement et de la construction du prototype est estimé à 1,4 milliard de francs, l'énergique CEO a encore devant lui bien du travail et de nombreux entretiens avec des investisseurs potentiels. Quant au prix de revient de l'électricité produite au moyen d'un réacteur à transmutation, il l'estime à moins de 65 francs par MWh. L'ordre de grandeur est donc le même que pour l'électricité produite par les centrales nucléaires conventionnelles actuellement en service.

### Forte participation

Lors de la séance de questions-réponses, M. Servan-Schreiber a notamment été interrogé sur les conséquences pour son entreprise de l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires en vigueur

en Suisse et sur le site pressenti pour le réacteur de démonstration. Dans sa réponse, le CEO s'est montré diplomate, indiquant que malgré cette interdiction, les tests et la recherche nucléaires restent possibles et qu'il serait heureux de pouvoir en faire le plus possible en Suisse. S'agissant du site du réacteur de démonstration, une collaboration a été lancée avec la France.

À l'issue de la manifestation, Lukas Aebi, secrétaire général du Forum nucléaire suisse, s'est réjoui «du vif intérêt suscité par cette première Rencontre de l'année, suivie en ligne par près d'une centaine de personnes», et a donné un aperçu des prochains thèmes qui seront abordés dans le cadre de cette série de conférences. (B.G./D.B.)



Lors de la première Rencontre du Forum 2022, Franklin Servan-Schreiber, CEO et co-fondateur de la start-up genevoise Transmutex SA, a présenté son concept de réacteur au thorium. (Photo: copie d'écran de la présentation diffusée en direct sur YouTube)

## Comment l'idée a germé

Implantée dans la région de Genève, la start-up Transmutex a été fondée en 2019 par Federico Carminati, Jean-Pierre Revol et Franklin Servan-Schreiber. Le premier est un expert en physique des particules, et en informatique scientifique et quantique; le second un mathématicien et physicien ayant œuvré dans plusieurs expériences de pointe, notamment au CERN; et le troisième un entrepreneur.

Il y a plus de 20 ans, le professeur Carlo Rubbia – Prix Nobel de Physique et ancien directeur du CERN – a mené des recherches intensives sur un réacteur nucléaire combiné avec un accélérateur de particules, reprenant par là une idée américaine préexistante. C'est lui qui a conduit au CERN les premières expériences au monde sur un réacteur piloté par accélérateur de particules, en vue de trouver une solution aux déchets de haute activité à vie longue. En 1995, dans le cadre de l'expérience «First Energy Amplifier Test (Feat)», il a réussi à obtenir un gain d'énergie net et, en 1997, dans le cadre de l'expérience «Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing (Tarc)», il a démontré que les déchets radioactifs peuvent être transmutés.

Federico Carminati, alors jeune collaborateur du CERN, a fait partie de l'équipe de Carlo Rubbia de 1994 à 1998 et participé au développement du réacteur. Jean-Pierre Revol a lui aussi mené des recherches aux côtés de Carlo Rubbia durant de nombreuses années. Hélas, comme le souligne F. Carminati, il n'y avait à l'époque pas encore de prise de conscience généralisée du changement climatique, et la recherche de solutions alternatives au stockage des déchets nucléaires n'était pas une priorité. En conséquence, le projet de réacteur a alors été relégué aux oubliettes.

Lors d'une visite du CERN en 2018, Franklin Servan-Schreiber – qui, bien avant de lancer Transmutex, a fait de la protection de l'environnement son cheval de bataille, luttant notamment contre la pollution des océans par le plastique – s'est renseigné sur les possibilités de produire une énergie à faible teneur en carbone pour assurer la protection du climat. C'est ainsi que les projets de réacteur de l'époque ont été ressortis des tiroirs et que l'aventure Transmutex a commencé.

### Assemblée annuelle 2022

L'assemblée annuelle du Forum nucléaire suisse se tiendra le mardi **10 mai**, au format hybride. Elle sera consacrée au thème «Un approvisionnement électrique sûr – fait, souhait, ou illusion?». Christoph Mäder, président d'Economiesuisse, Peter Hettich, professeur de droit public des affaires, y c. droit de la construction, droit de la planification et droit de l'environnement à l'Université de Saint-Gall, et Roger Nordmann, conseiller national, présenteront des exposés. Un podium de discussion suivra.

### Cours d'approfondissement du Forum nucléaire suisse

Thème: la promotion de la relève  
Jeudi **29 novembre** au Trafo de Baden.



Photo: Le Forum nucléaire suisse

### 12<sup>e</sup> épisode du podcast «NucTalk»

Dans le douzième épisode de NucTalk, Fabio Fracas, de Transmutex, nous explique ce qui les motive lui et ses collègues, nous présente la technologie qu'ils développent et nous dit pourquoi avoir l'esprit d'entrepreneur et vouloir faire le bien dans le monde ne sont pas en contradiction. N'hésitez plus, abonnez-vous à notre podcast! (Uniquement en allemand)

[www.nuklearforum.ch/de/podcast](http://www.nuklearforum.ch/de/podcast)

### Fachverband für Strahlenschutz

53<sup>e</sup> conférence annuelle

**Du 26 au 30 septembre**, au Bodenseeforum, à Constance  
[www.fs-ev.org](http://www.fs-ev.org)

### Le Forum nucléaire et sa «Fanpage»

Retrouvez des informations sur le nucléaire, des faits et chiffres mais aussi des contenus insolites sur notre nouvelle page Facebook. Que vous soyez simplement fan ou abonné, nous vous attendons pour dialoguer! (Uniquement en allemand)

[www.facebook.com/NuklearforumSchweiz](https://www.facebook.com/NuklearforumSchweiz)



Photo: Le Forum nucléaire suisse

### 14<sup>e</sup> séminaire de base de la SOSIN

La Société suisse des ingénieurs nucléaires (SOSIN) prévoit d'organiser **du 4 au 6 octobre 2022** à Macolin son séminaire de base sur l'énergie nucléaire. Il comportera plusieurs modules (physique, politique et environnement, histoire, énergie, combustible, sûreté, radioactivité et accidents) ainsi qu'une visite de la centrale nucléaire de Gösgen.

[www.kernfachleute.ch](http://www.kernfachleute.ch)



Photo: SOSIN

## **Impressum**

### **Rédaction:**

Marie-France Aepli (M.A., rédactrice en chef); Lukas Aebi (L.A.);  
Stefan Diëpenbrock (S.D.); Aileen von den Driesch (A.D.);  
Benedikt Galliker (B.G.); Matthias Rey (M.Re.); Michael Schorer (M.S.)

### **Traduction:**

Claire Baechel (C.B.); Dominique Berthet (D.B.)

### **Editeurs:**

Hans-Ulrich Bigler, président  
Lukas Aebi, secrétaire général

Forum nucléaire suisse  
Frohburgstrasse 20, 4600 Olten

Tél. +41 31 560 36 50  
info@nuklearforum.ch  
www.forumnucleaire.ch ou www.ebulletin.ch

Le «Bulletin Forum nucléaire suisse» est l'organe officiel du Forum nucléaire suisse et de la Société suisse des ingénieurs nucléaires (SOSIN). Il paraît 4 fois par an.

Copyright 2022 by Forum nucléaire suisse ISSN 1661-1470 –  
Titre clé: Bulletin (Forum nucléaire suisse) – Titre abrégé  
selon la norme ISO 4) – Bulletin (Forum nucléaire suisse).

La reproduction des articles est libre sous réserve  
d'indication de la source. Prière d'envoyer un justificatif.

