

Avril 2024

BULLETIN 1



Retour sur l'année nucléaire 2023

Page 12

Les EAU entrent dans le nucléaire selon le budget et le calendrier fixés

Page 22

Swissmem: davantage de renouvelables et une levée de l'interdiction de construire

Page 25

Le potentiel de l'IA du point de vue de l'AIEA

Page 32

Table des matières

Éditorial

Au plan international, l'avenir énergétique passe par l'atome 1

Entretien avec...

Les impacts de l'abandon de l'atome sur une PME suisse active dans le domaine nucléaire 2

Un ingénieur allemand à la retraite s'investit en faveur de Copenhagen Atomic 6

Informations de fond

Les centrales nucléaires dans le monde en 2023 12

La recherche sur la fusion en Allemagne 16

EAU: calendrier respecté pratiquement à la lettre 22

Décryptage

L'acte modificateur unique et l'initiative Stop au blackout ne sont pas antinomiques 25

Brèves nucléaires

En Suisse 28

À l'étranger 29

La der nucléaire

L'intelligence artificielle au service de l'énergie nucléaire 32

Couac!

«Wädenswil doit rayonner!» 35

Nouvelles internes

«Comprendre le nucléaire» est en ligne 36

La France et la Suisse, unies par leurs lignes électriques 37

Pour mémoire

40

Page de couverture:

La mise en service des deux réacteurs AP1000 Vogtle 3 et 4 permettra de créer 800 emplois à long terme et stimulera l'économie de la région.

(Photo: Georgia Power Company)

Au plan international, l'avenir énergétique passe par l'atome



Stefan Diepenbrock

Responsable de la communication au
Forum nucléaire suisse

Stefan Diepenbrock

«Le grand retour du nucléaire a débuté.» Telles sont les paroles que le «Blick» a choisi tout récemment de reproduire dans ses colonnes. Elles émanent de Fatih Birol, directeur de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), qui les a prononcées en marge du Forum économique mondial de Davos. Et, de fait, l'atome revient sur le devant de la scène dans le contexte de la recherche mondiale de solutions énergétiques durables. En Suisse, le débat politique a été relancé avec le dépôt de l'initiative «Stop au blackout» à la mi-février. Et les évolutions au plan international sont passionnantes. Dans cette édition du Bulletin, nous vous présentons ce qui se fait dans le monde en matière de construction de nouvelles installations nucléaires.

Nous nous sommes en outre entretenus avec John Kickhofel, fondateur et patron de l'entreprise suisse Apollo+, spécialisée dans le conseil en matière d'énergie nucléaire. L'éclairage qu'il donne sur certains projets internationaux et sur les impacts de l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires en Suisse offre une perspective intéressante tout en mettant en évidence les défis à relever.

L'engagement de l'entrepreneur allemand Wilfried Hahn, qui s'est passionné pour l'énergie nucléaire une fois arrivé à l'âge de la retraite, est tout aussi impressionnant. Grâce à son livre et à son appartenance au Conseil de surveillance de la start-up danoise Copenhagen Atomic, il insuffle un vent nouveau dans le débat sur l'énergie nucléaire. Le Forum nucléaire l'a accueilli à Olten pour un entretien approfondi.

L'Allemagne est certes sortie du nucléaire, mais elle entend investir plus d'un milliard d'euros dans la recherche sur la fusion d'ici fin 2028. Son objectif est de construire une centrale à fusion sur son territoire. Le pays pourrait ainsi donner un nouvel élan à sa longue tradition de recherche.

La Suisse s'apprête à nouveau à vivre un débat enflammé à propos de son approvisionnement énergétique de demain. En tant que représentant de l'association Swissmem, Jean-Philippe Kohl analyse la situation du point de vue de l'économie et conclut qu'il nous faut «à la fois un renforcement des énergies renouvelables et la levée de l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires».

Avant de vous souhaiter une lecture passionnante, il me reste à attirer votre attention sur un point: Rafael Mariano Grossi, directeur général de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), a accepté notre invitation de participer à notre assemblée générale, qui se tiendra le 22 mai 2024 à Zurich. Voilà une date que tous les membres du Forum nucléaire s'empresseront sûrement d'inscrire à leur agenda!

Bonne lecture donc, et à très bientôt!

Les impacts de l'abandon de l'atome sur une PME suisse active dans le domaine nucléaire



John Kickhofel

Fondateur et patron de la société suisse de conseil Apollo+

Nous nous sommes entretenus avec John Kickhofel, fondateur et patron d'Apollo+, une société de conseil basée à Zurich qui travaille pour l'industrie nucléaire suisse et internationale. Comment son entreprise s'en sort-elle dans le contexte politique actuel et quels enseignements pouvons-nous tirer de l'étranger? Voilà quelques-unes des questions que nous lui avons posées.

Pouvez-vous nous décrire brièvement les services qu'Apollo+ propose à l'industrie nucléaire suisse?

Nous apportons un soutien stratégique et opérationnel aux exploitants, aux autorités de réglementation et aux fournisseurs de l'industrie nucléaire. L'un de nos domaines de prédilection est le développement de solutions pour l'exploitation à long terme des centrales nucléaires et le soutien ciblé dans ce domaine. Il s'agit de gérer le vieillissement des installations, ce qui inclut une réflexion sur la durée de vie et l'acquisition de composants, ainsi que la planification, l'optimisation et la mise en œuvre de processus et de projets connexes. Grâce à notre expertise internationale, nous sommes en mesure d'élaborer des stratégies efficaces et de proposer les connaissances techniques et le personnel nécessaires.

Nous sommes également actifs au plan mondial dans le domaine de la construction de centrales nucléaires, et en particulier de l'introduction de petits réacteurs modulaires (SMR), ce qui comporte différents aspects: technologies, chaînes d'approvisionnement, homologation et financement. L'achat et la livraison transfrontières de composants d'installations nucléaires font également partie de nos points forts. Dans ce contexte, nous veillons au respect des prescriptions réglementaires et à une gestion de projet efficace. Last but not least, nous sommes actifs dans des groupes de travail et des organisations interna-

tionales de la branche, au sein desquels nous soutenons souvent bénévolement les nouveaux développements. Il s'agit notamment des groupes de travail et des comités techniques de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et de la World Nuclear Association (WNA).

Vous avez étudié le génie nucléaire à l'EPF de Zurich. Les connaissances acquises dans ce cadre vous ont-elles été utiles lors de la création de votre entreprise? Le sont-elles pour vos activités actuelles?

J'ai fait partie de la première volée du programme conjoint de master en génie nucléaire des EPF de Lausanne et de Zurich, de sorte que j'ai ainsi pu bénéficier de l'excellent enseignement des professeurs Prasser et Chawla. Les connaissances acquises dans le cadre de ce master, puis dans celui de mon doctorat à l'université de Zurich, m'ont inspiré et appris à analyser et résoudre des problèmes de manière systématique, quel que soit leur degré d'abstraction et de complexité. Grâce à cette capacité d'analyse et à la compréhension des spécificités de l'industrie nucléaire, je me suis senti bien préparé pour créer ma propre entreprise dans ce secteur. Ce qui m'a aidé, ce ne sont pas «seulement» les connaissances techniques acquises aux EPF, mais aussi l'esprit d'entreprise et le désir constant d'évoluer et d'apprendre que j'ai pu y observer. Mais mon réseau joue aussi un rôle important:



John Kickhofel lors de l'exposé qu'il a donné en juin 2019 à l'«International Seminar of Nuclear Safety & Decommissioning Industry» à Gyeongju, Corée du Sud. D'autres représentants de la Suisse figuraient parmi les participants. (Photo: John Kickhofel)

de nombreux membres des instituts de recherche et des hautes écoles suisses sont pour moi non seulement des collègues, mais aussi des amis.

Les connaissances dans le domaine nucléaire transmises par les hautes écoles sont-elles applicables dans la pratique?

Pour construire, exploiter puis démanteler une centrale nucléaire, il faut pouvoir faire appel à différents métiers, talents et formations. À mon avis, nous disposons en Suisse d'un ensemble équilibré de programmes d'enseignement permettant d'assurer le soutien de l'industrie en termes de relève. Pour la plupart des professions nécessaires (ingénieurs en mécanique, ingénieurs électriciens, chimistes, physiciens, informaticiens, spécialistes en finances et RH, mécaniciens, électriciens), la formation est universelle et non axée spécifiquement sur les besoins de la branche nucléaire. La transition vers l'industrie de l'atome serait plus aisée pour ces professions si elles avaient plus d'opportunités de se familiariser avec les spécificités du fonctionnement d'une centrale nucléaire au quotidien. Même pour moi, qui suis pourtant ingénieur nucléaire, une telle expérience s'est avérée très bénéfique.

Pour faciliter la mise au courant des nouveaux arrivants dans la branche, la Société suisse des ingénieurs nucléaires (SOSIN) donne un séminaire de base extrê-

mement utile. Il serait néanmoins souhaitable que nos hautes écoles introduisent en parallèle des «Fondements de l'industrie nucléaire» accessibles en option aux étudiantes et étudiants intéressés.

Comment les hautes écoles suisses peuvent-elles soutenir la création d'entreprises? Peuvent-elles par exemple recourir à des spin-off, et cela se fait-il dans le domaine nucléaire?

Il existe de nombreux programmes d'innovation et de soutien en Suisse dans lesquels les hautes écoles jouent un rôle clé. Cependant, d'après mon expérience, la plupart de ces programmes suivent plutôt la tendance générale en soutenant les innovations et les start-up du secteur de l'énergie dite «renouvelable». Il serait grand temps d'inclure l'énergie nucléaire dans les programmes de soutien aux start-up et aux spin-off! Les hautes écoles pourraient envoyer un signal fort en reconnaissant que l'atome est l'une des sources d'énergie les plus durables et les plus respectueuses de l'environnement (voire celle qui l'est le plus).

Quels sont les défis à relever en Suisse pour créer sa propre entreprise dans le domaine nucléaire?

De mon point de vue, il y a des défis très spécifiques à relever pour créer une entreprise dans la branche nucléaire

John Kickhofel est le fondateur et le patron de l'entreprise de conseil suisse Apollo+. Il est également conseiller auprès de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) dans des domaines comme l'harmonisation des directives, prescriptions et normes relatives à la gestion de la chaîne d'approvisionnement des centrales nucléaires et des petits réacteurs modulaires (SMR). Docteur EPF en systèmes d'énergie nucléaire et titulaire d'un diplôme en droit nucléaire international, c'est un expert internationalement reconnu de la planification et de la gestion de projets nucléaires transfrontières allant de composants individuels pour l'exploitation à long terme à des centrales nucléaires complètes pour les pays qui souhaitent se lancer dans le nucléaire ou développer leurs capacités.



Le 3 octobre 2023 s'est tenu à Espoo, en Finlande, le «SMR Business Day 2023». S'y sont rencontrés les futurs acteurs du secteur des petits réacteurs modulaires, notamment des représentants de l'industrie et de communes intéressées par ce type d'installations. John Kickhofel a participé à la table ronde organisée à cette occasion et donné une présentation sur l'intégration de groupes d'intérêts dans les projets de centrales nucléaires et sur l'acceptation sociétale de l'atome.

(Photo: John Kickhofel)

en Suisse. D'une part, il existe toujours un sentiment antinucléaire assez fort dans l'opinion publique et le monde politique, même si une certaine ouverture d'esprit semble se faire jour depuis peu, en particulier envers de nouvelles technologies comme les SMR. D'autre part, la Suisse possède une longue tradition dans le domaine nucléaire et elle compte bon nombre d'entreprises et de spécialistes au bénéfice d'une longue expérience en la matière. Il existe donc une base solide; ce qui manque peut-être, c'est la vision et la volonté de faire évoluer la branche et d'en maintenir la compétitivité au plan mondial. Je suis frappé par le fait que, malgré tous ces défis, de nombreux jeunes sont intéressés par l'industrie nucléaire et souhaitent y travailler. C'est un signe positif pour l'avenir. Reste qu'un changement de paradigme est nécessaire: il faut prendre conscience que l'énergie nucléaire peut devenir un élément essentiel de la transition énergétique – et qu'il est plus que souhaitable qu'elle le fasse.

L'absence d'accord-cadre avec l'UE et l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires en Suisse compliquent-elles votre activité?

Ce n'est rien de le dire! L'interdiction de construire de nouvelles centrales nuit gravement à l'industrie nucléaire suisse dans son ensemble, car elle prive de perspectives les étudiants, les spécialistes et les personnes souhaitant bifurquer vers ce domaine. Il s'agit à mon avis d'un problème général qui ne touche pas seulement notre organisation. Nous ne sommes d'ailleurs pas les plus à plaindre puisque nous pouvons travailler à l'international. Je m'inquiète surtout pour nos installations, qui doivent relever le défi du «changement de génération» et qui ont des difficultés à attirer de nouveaux fournisseurs et à recruter de jeunes professionnels. Pour les personnes intéressées par un poste dans l'industrie nucléaire, il est nettement plus attrayant de travailler dans un pays qui s'emploie activement à maintenir son secteur nucléaire, voire à le développer. Le tableau est le même pour les fournisseurs: ils souffrent également, et de plus en plus, du manque de ressources, de sorte qu'ils allouent celles encore disponibles aux projets propres à leur assurer du travail pendant plusieurs décennies.

Votre entreprise peut-elle bénéficier de la recherche suisse dans le domaine nucléaire?

Apollo+ bénéficie de la solide réputation et des nombreuses réalisations et compétences de la recherche suisse. Nous sommes fiers d'avoir fourni des prestations pour le PSI et nous nous efforçons en permanence de créer des liens entre l'EPF de Zurich, l'EPF de Lausanne et le PSI d'une part, et des projets et partenaires internationaux de l'autre. Pour nous, les acteurs de la recherche nucléaire suisse sont des partenaires précieux et des sources d'inspiration.

Y a-t-il une coopération mutuelle et un transfert de connaissances entre Apollo+ et les instituts de recherche et hautes écoles suisses?

Jusqu'à présent, nos projets étaient axés sur l'exportation du savoir-faire et des développements suisses, ce qui impliquait notamment la réalisation de missions pour le PSI dans d'autres pays. Nous serions heureux de poursuivre ce travail afin de préserver les connaissances inestimables des instituts de recherche et hautes écoles suisses, et de soutenir ces dernières dans leurs efforts visant à diffuser plus largement ce savoir au sein des

installations nucléaires par le biais d'un programme de formation, afin qu'il puisse être mis en œuvre au quotidien. Permettez-moi de reprendre les propos de Vanessa Wood, vice-présidente du transfert de connaissances et des relations avec les entreprises à l'EPFZ: «Nous avons besoin d'une communication bidirectionnelle avec nos partenaires industriels [...] afin d'étendre la collaboration en matière de recherche avec l'industrie, les agences gouvernementales, et les organisations à but non lucratif». Chez Apollo+, nous aimerions être de tels partenaires industriels et serions heureux, si besoin, de bâtir des ponts vers d'autres acteurs clés du secteur. Je souhaiterais qu'il y ait une collaboration plus étroite entre les instituts de recherche suisses et l'industrie en général.

Comment percevez-vous la collaboration entre les milieux scientifiques et économiques dans d'autres pays?

En 2023, j'ai participé à la «Conférence internationale – l'énergie nucléaire pour la nouvelle Europe» en Slovénie, et j'ai été impressionné par l'éventail des participants et l'ouverture avec laquelle ils communiquaient entre eux. Il ne s'agissait pas simplement d'une plateforme desti-

née à permettre aux collaborateurs des exploitants de rencontrer leurs principaux fournisseurs ainsi que les représentants du gouvernement et des autorités de réglementation: des étudiants en master et des doctorants décidés à travailler dans le nucléaire ou intéressés par ce domaine d'activité étaient aussi présents. Tout cela dans un pays qui exploite en tout et pour tout un seul réacteur nucléaire! J'aimerais qu'une telle plateforme de communication existe également en Suisse, afin de promouvoir la collaboration, d'attirer les talents et de démontrer l'engagement et la transparence envers la branche.

Dans quels domaines un soutien pourrait-il éventuellement être bénéfique à Apollo+?

Là encore, un engagement clair de notre gouvernement à continuer, à l'avenir également, de considérer l'énergie nucléaire comme faisant partie intégrante du mix énergétique nous serait bénéfique, tout comme au reste de la branche. De plus, nous sommes toujours reconnaissants pour tout soutien en matière de collecte, transfert et communication vers la Suisse de connaissances, bonnes pratiques, innovations et nouveaux développements en provenance de l'étranger. (D.B.)

En Suisse, la recherche nucléaire manque de moyens

Depuis l'accident de réacteur de Fukushima de 2011, l'Office fédéral de l'énergie n'a plus lancé le moindre programme d'encouragement du nucléaire. Au moment de la votation sur la sortie du nucléaire, les autorités fédérales avaient souligné que la recherche nucléaire continuerait d'être soutenue et qu'il n'y aurait pas d'interdiction technologique. Or, dans son rapport «Switzerland 2023 – Energy Policy Review», l'Agence internationale de l'énergie (AIE) démontre que les moyens alloués à la recherche nucléaire stagnent: «En 2020, quelque 10% des dépenses publiques de recherche, développement et innovation étaient consacrées au nucléaire. En chiffres absolus, les dépenses en question sont stables depuis une décennie, mais en baisse par rapport à la décennie précédente». À la suite de la décision d'abandonner l'atome, davantage de fonds ont été consacrés à la recherche

sur d'autres technologies visant à atteindre le zéro émission nette. À l'Institut Paul Scherrer (PSI), les fonds alloués à la recherche nucléaire ont également diminué très fortement. Dans son rapport, l'AIE invite le Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) à prendre des mesures pour maintenir les compétences dans le domaine nucléaire. Du point de vue de la branche, l'adoption de telles mesures est essentielle pour que les centrales nucléaires suisses puissent continuer à long terme à fournir de l'électricité bon marché, et ainsi à assurer la sécurité d'approvisionnement du pays. En cas d'aggravation du manque de moyens financiers touchant la recherche nucléaire suisse, notre pays risque de se faire distancer par la recherche internationale et de perdre sa marge de manœuvre en matière de nouveaux développements pour l'avenir.

Un ingénieur allemand à la retraite s'investit en faveur de Copenhagen Atomic



Wilfried Hahn

Ingénieur industriel, chef d'entreprise à la retraite et membre du Conseil de surveillance de Copenhagen Atomic

La société danoise Copenhagen Atomic développe un réacteur au thorium à sels liquides (réacteur à sels fondus) pouvant être alimenté par des déchets nucléaires. Wilfried Hahn, chef d'entreprise à la retraite, siège dans son Conseil de surveillance depuis 2021. Il nous donne un aperçu des travaux en cours et nous explique les raisons de son engagement.

Pourquoi vous investissez-vous en faveur de l'énergie nucléaire en général et de Copenhagen Atomic en particulier?

Nous ne pouvons pas vivre sans énergie. Ne serait-ce que parce que l'économie ne fonctionnerait pas. C'est une réalité dont nous ne sommes habituellement pas conscients, tant il nous semble naturel de soutirer jour après jour du courant à la prise électrique. Or, en Allemagne, les énergies renouvelables ne suffiront pas à couvrir les besoins. C'est pourquoi je m'investis pour l'énergie nucléaire. J'espère contribuer à assurer la sécurité énergétique de demain grâce à l'opportunité exceptionnelle qui m'est donnée de jouer un rôle actif chez Copenhagen Atomic. Mon engagement pour cette entreprise remonte à 2020, année où Thomas Jam Pedersen, son co-fondateur, m'a présenté son concept innovant de réacteur. J'ai alors investi dans Copenhagen Atomic par le biais de la plateforme de crowdfunding estonienne Funderbeam, et me suis familiarisé pendant plusieurs mois, en autodidacte, avec la technologie mise en œuvre par l'entreprise.

Quel est votre rôle au sein de Copenhagen Atomic?

En ma qualité de membre du Conseil de surveillance, je suis chargé de superviser la direction. Nous recevons des bilans et avons une séance tous les deux mois afin

de discuter et d'avaliser les principaux projets. Je me rends à chaque fois sur place à Copenhague, et y reste deux ou trois jours. Cela me permet de me mettre dans l'ambiance, de faire le tour de la production, de discuter avec les gens et d'établir une relation de confiance. Les fondateurs sont majoritaires, si bien que je ne pourrais rien changer d'important à moi tout seul – mais j'apporte ma longue expérience de chef d'entreprise. Je fais tout cela bénévolement et paie moi-même mes billets d'avion.

Quelle est la philosophie de Copenhagen Atomic?

En tant que start-up, Copenhagen Atomic n'avait, surtout à ses débuts, pas beaucoup d'argent. L'entreprise a donc essayé de tout développer et de tout fabriquer par elle-même. C'est encore le cas aujourd'hui, et cela va des sels à l'électronique en passant par la pompe. Notre réacteur n'est de loin pas aussi volumineux qu'un réacteur à eau légère, que l'on ne construit qu'une seule fois et pour longtemps. De ce fait, notre approche de son développement technique est très différente. Nous construisons nos prototypes à un stade précoce, les testons et en tirons les enseignements qui s'imposent. Jusqu'à présent, nous avons fabriqué trois prototypes, et en construisons encore deux à trois autres au cours des deux prochaines années. Nous espérons ainsi

accélérer l'homologation et la mise sur le marché du Copenhagen Atomics Waste Burner. L'idée est d'arriver aussi vite que possible à produire au moins un réacteur par jour dans notre usine grâce à la fabrication en série et en tirant parti de notre courbe d'apprentissage rapide.

Ce qui a de la valeur dans le Copenhagen Atomics Waste Burner, ce sont les sels fondus contenant le combustible dissout ainsi que l'eau lourde (D_2O) utilisée comme modérateur. L'idée est de construire un réacteur qui, en fonctionnant, produira suffisamment de combustible pour lui-même et pour l'initialisation d'un autre réacteur du même type (voir l'encadré de la page 11). Il est prévu que les sels fondus et le modérateur restent notre propriété. Nous fournirons l'installation à nos clients exclusivement selon le modèle «Build-own-operate». En d'autres termes, nous vendrons l'électricité et la chaleur produites, cette dernière pouvant atteindre 560 °C. Avec son noyau breveté, baptisé «Onion Core» par référence à sa forme et à sa structure, notre concept de réacteur modéré à l'eau lourde permettra de produire beaucoup d'énergie à partir d'une petite quantité de sels combustibles. Le réacteur mécanique lui-même est un consommable qui ne nécessite aucun entretien. Sa durée de vie sera certainement de cinq ans, après quoi les sels fondus et le modérateur seront transférés dans un nouveau réacteur auquel sera ajouté du thorium. L'ancien réacteur sera stocké sur place en vue de son évacuation ultérieure.

Quand pensez-vous pouvoir commencer la production en série?

Notre premier réacteur commercial devrait être opérationnel en 2028, sans toutefois permettre de produire de l'électricité au prix cible de deux centimes d'euro par kilowattheure. Nous pensons atteindre ce prix vers 2030–2032, une fois que la production en série aura été lancée. Nous serons alors moins chers que nos concurrents. Avec ses 11'000 mètres carrés, notre bâtiment d'entreprise nous permettra de construire des réacteurs pendant les deux ou trois premières années. Il nous faudra ensuite trouver un autre bâtiment pour la production de masse. Pour nous, la prochaine étape sera l'expérience de criticité, qui est prévue pour 2025, mais ne pourra malheureusement pas se faire au Danemark.

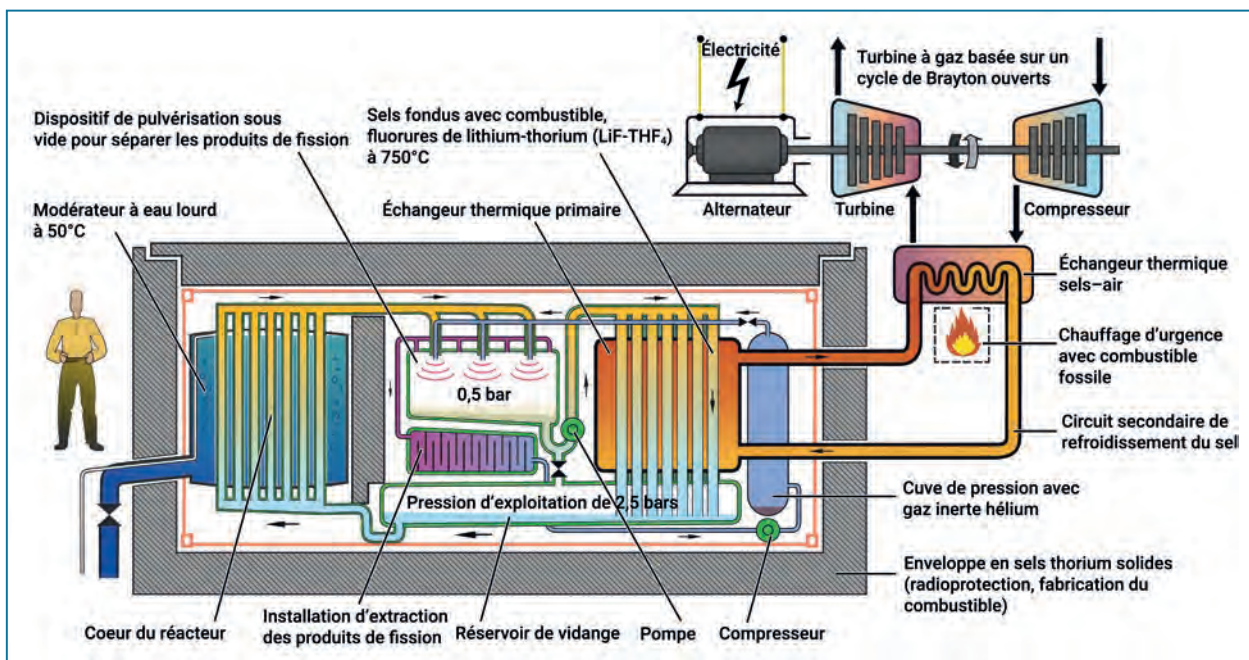


Copenhagen Atomics a baptisé «Onion Core» le cœur breveté de son réacteur par référence à sa forme et à sa structure.

(Photo: Copenhagen Atomics)

Pouvez-vous nous en dire plus sur l'expérience de criticité du réacteur?

L'expérience de criticité doit durer environ un mois. Elle se fera avec un réacteur ayant presque la taille originale, mais une puissance de seulement 1 MW et non de 100 MW comme prévu à terme. Elle permettra de vérifier si les simulations correspondent à la réalité. Copenhagen Atomics entend ainsi démontrer que son concept fonctionne, ce qui sera, entre autres, important pour la manière dont l'entreprise sera perçue par le public, puisqu'une entrée en bourse est prévue. →



Représentation schématique du Copenhague Atomics Waste Burner, un réacteur à sels fondus dont la partie nucléaire a les dimensions d'un conteneur maritime standard. (Photo: Copenhague Atomics)

Il n'est pas exclu que nous réalisons plusieurs expériences dans différents pays. Nous sommes en discussion avec dix pays, dont des pays d'Europe comme l'Angleterre, la Pologne, la Suède et la Turquie. Nous ferons notre choix selon des critères préétablis tels que le délai d'obtention des autorisations nécessaires à une expérience de criticité et les coûts.

Copenhague Atomics estime que le Waste Burner est très sûr ...

Effectivement. Notre réacteur est à sûreté passive et présente toute une série de caractéristiques de sûreté. La puissance du réacteur diminue automatiquement si les sels fondus contenant le combustible se dilatent sous l'effet d'une forte hausse de température. Quoi qu'il se passe dans le réacteur, le sel fondu ne se transforme jamais en gaz (voir les données relatives aux températures dans l'encadré de la page 11). De plus, le sel fondu peut être évacué avec le combustible dans un récupérateur, où il se refroidit et se solidifie, ce qui stoppe la réaction en chaîne. Si la pompe cesse de fonctionner, le sel fondu tombe automatiquement dans le récupérateur. Par ailleurs, le système n'est pas sous pression et il ne peut pas y avoir d'explosion d'hydrogène.

À haute température, les sels fondus posent des exigences élevées aux matériaux en raison de la corrosion. Avez-vous réussi à maîtriser ce problème?

Afin d'éviter la corrosion, nous utilisons un sel extrêmement pur dont nous avons retiré toute humidité. Nous le fabriquons nous-mêmes et le testons de manière approfondie. Pour les tests statiques sur le sel, nous disposons de plus de 20 installations fabriquées en interne, appelées circuits à sels fondus (molten salt loops). Nous y plaçons les pièces et le sel, et les y maintenons à haute température. L'un de nos tests consiste à mettre des pièces usinées en contact avec du sel liquide à 600°C pendant 2000 heures. Les plaques métalliques ayant ainsi été exposées à notre sel présentent une corrosion minimale. Selon nos calculs, il y a au maximum 0,1 millimètre de corrosion après cinq ans. Compte tenu de l'expérience pratique (130 ans d'expérience cumulée) que nous avons acquise grâce aux tests, nous pouvons affirmer que notre réacteur et sa cuve tiendront au moins cinq ans.

À noter que nous commercialisons nos circuits à sels fondus pour gagner un peu d'argent et bénéficier des

retours d'information de nos clients. Nous effectuons en outre des essais en collaboration avec l'université de Liverpool.

Nous avons également testé de manière approfondie la pompe – que nous avons développée nous-mêmes – et elle résiste sans problème aux températures élevées propres à l'exploitation.

Bon nombre de développeurs de SMR se lancent dans des coopérations. Qu'en est-il de Copenhagen Atomic's?

Nous faisons le plus de choses possibles par nous-mêmes afin de conserver notre indépendance. De plus, la prudence est de mise au vu de la concurrence féroce qui règne sur le marché. Notre force réside dans la partie nucléaire, sur laquelle nous axons tous nos efforts. Pour le générateur de vapeur, la turbine et les installations de distribution d'électricité, nous aurons donc besoin d'une coopération – mais, dans ce domaine, il existe des four-

nisseurs comme Siemens ou General Electric. Par ailleurs, nous avons des liens étroits avec l'entreprise danoise Topsoe, qui va acheter notre énergie pour produire de l'ammoniac en Indonésie. Nous pourrions imaginer que d'autres branches, comme l'industrie de l'acier ou de l'aluminium, puissent aussi être intéressées par notre produit.

Le renchérissement pose des problèmes à de nombreux projets. Qu'en est-il pour Copenhagen Atomic's? Et où en est l'homologation par les autorités de sûreté?

Nous produisons nous-mêmes le sel, qui joue un rôle central dans notre réacteur. Le thorium est encore relativement facile à obtenir et nous avons nos sources. S'agissant de l'uranium, les besoins augmentent, ce qui se traduit naturellement par une hausse des prix en bourse. Nous pouvons toutefois faire face sans problème au prix élevé de l'uranium, car notre concept est très efficace. De plus, notre réacteur ne nécessite pas



Copenhagen Atomic's fabrique des circuits à sels fondus pour ses propres tests de matériaux, mais aussi pour les vendre et générer ainsi des revenus. (Photo: Copenhagen Atomic's)



Une centrale nucléaire de Copenhagen Atomics peut se composer de plusieurs réacteurs: selon la puissance à délivrer, le nombre souhaité de conteneurs maritimes, encapsulant chacun un réacteur et son blindage, est réuni dans une halle. (Photo: Copenhagen Atomics)

de quantités énormes de matériaux. Il tient dans un conteneur maritime fabriqué avec de l'acier bon marché et comportant une enceinte de sécurité d'un demi-mètre d'épaisseur, également en acier. Il ne requiert pas d'aciers spéciaux hors de prix ni de murs en béton de plusieurs mètres d'épaisseur.

Quels sont, selon vous, les plus grands défis et obstacles que Copenhagen Atomics est susceptible de rencontrer sur la voie menant à la mise sur le marché de son réacteur?

Le plus grand défi est l'homologation du réacteur et l'obtention des autorisations nécessaires à cet effet. Actuellement, l'homologation aux États-Unis est très compliquée et peut prendre des années. Mais les choses commencent à bouger. En Europe aussi, ce sera le plus gros obstacle. Peut-être que nous pourrions d'abord pénétrer le marché indonésien et y produire de l'ammoniac, puis venir en Europe. Nous aurions besoin d'une homologation pour que cela ait un sens. Nous voulons créer une entreprise dans chaque pays qui nous semble offrir des perspectives raisonnables, et mener à bien toute la procédure d'autorisation nous-mêmes, afin d'en tirer des enseignements pour les futures procédures du même type. (D.B.)

Wilfried Hahn, ingénieur industriel de Schönach en Forêt Noire, a dirigé pendant plus de 40 ans l'entreprise Wiha Werkzeuge GmbH, qu'il a reçue de son père puis transmise à son fils. À 73 ans, ce membre du Forum nucléaire peut dès lors se consacrer pleinement à ses passions, et notamment à la thématique de l'atome. Il est l'auteur du livre «Kernenergie jetzt?! Warum uns die Energiewende Wohlstand und Frieden kostet» [Du nucléaire maintenant?! Pourquoi le tournant énergétique nous coûte la prospérité et la paix] (ISBN: 978-3-98617-059-2).

Notre Podcast NucTalk (en allemand) vous en dira plus au sujet de M. Hahn et de Copenhagen Atomics.



Wilfried Hahn, membre du Conseil de surveillance de Copenhagen Atomics, avec son livre «Kernenergie jetzt?! Warum uns die Energiewende Wohlstand und Frieden kostet» aux côtés de Lukas Aebi, secrétaire général du Forum nucléaire suisse.

(Photo: Forum nucléaire suisse)

Quel combustible pour le Copenhagen Atomic Waste Burner?

Les réacteurs à eau légère de génération III/III+ utilisent du combustible à l'uranium solide ayant une teneur en uranium 235 fissile de 4 à 5%. Durant le fonctionnement du réacteur, cette teneur tombe à moins de 1%, ce qui nécessite le remplacement de l'assemblage combustible. Ainsi, dans ces réacteurs-là, seuls quelques pour cent de l'uranium présent dans le combustible sont utilisés pour la production d'énergie. Et la fission nucléaire classique génère, outre les produits de fission, du plutonium et de petites quantités d'autres transuraniens à vie longue.

Le réacteur à sels fondus de Copenhagen Atomic appartient à la génération IV et utilise le thorium comme combustible, dissout dans notre sel FLiNaK, de composition chimique LiF-NaF-KF, qui passe à l'état liquide à 454 °C et à l'état gazeux à 1570 °C. La température de fonctionnement du réacteur est de 600 à 700 °C. Le sel est corrosif tant qu'il est humide, si bien qu'il faut extraire l'humidité qu'il contient avant de l'utiliser.

Le thorium est bien plus abondant dans le sol que l'uranium: il y a environ 500 fois plus de thorium 232 que d'uranium 235 dans le monde. Le thorium 232 est converti en uranium 233, fissile, par des neutrons thermiques. La plus grande partie du thorium peut ainsi être transformée en énergie. En l'absence d'uranium 238, il n'y a pas de production de plutonium et de transuraniens à vie longue, ce qui explique que les déchets de haute activité des réacteurs à eau légère doivent être stockés aussi longtemps. Un autre atout du Waste Burner est que son combustible peut – comme c'est généralement le cas des assemblages combustibles à l'uranium – être utilisé pendant plus de cinq ans sans être remplacé.

Pour lancer le réacteur et amorcer la transformation du thorium 232 en uranium 233 fissile, il faut un combustible de démarrage qui émette suffisamment de neutrons. Le réacteur de Copenhagen Atomic est un Waste Burner, c'est-à-dire qu'il peut recycler les déchets radioactifs des réacteurs à eau légère. Pour ce faire, les différents composants du combustible uranium usé de ces réacteurs doivent au préalable être séparés. Les quelque 4% de plutonium et de transuraniens qu'il contient sont des éléments à vie longue qui peuvent être utilisés dans le Waste Burner comme combustible de démarrage et «brûlés», c'est-à-dire transformés en éléments à vie nettement plus courte tout en fournissant de l'énergie. Les déchets radioactifs issus d'un réacteur au thorium émettent donc de la radioactivité pendant beaucoup moins longtemps que ceux d'un réacteur conventionnel: les produits de fission ne doivent être stockés de manière sûre que pendant une durée de 300 à 500 ans. Copenhagen Atomic prévoit de retirer au fur et à mesure les produits de fission absorbés de neutrons du mélange sels fondus-combustible afin d'obtenir un meilleur rendement neutronique.

Comme alternative au plutonium et aux transuraniens, Copenhagen Atomic peut également lancer son réacteur avec un combustible de démarrage enrichi à 5% en uranium 235. L'uranium 238 est transformé en plutonium 239, fissile et, simultanément, le thorium 232 est transformé en uranium 233, lui aussi fissile. D'autres concepts fonctionnent en partie avec des enrichissements de 20% en uranium 235, ce qui en Europe implique des exigences beaucoup plus élevées en termes d'autorisations.

Les centrales nucléaires dans le monde en 2023

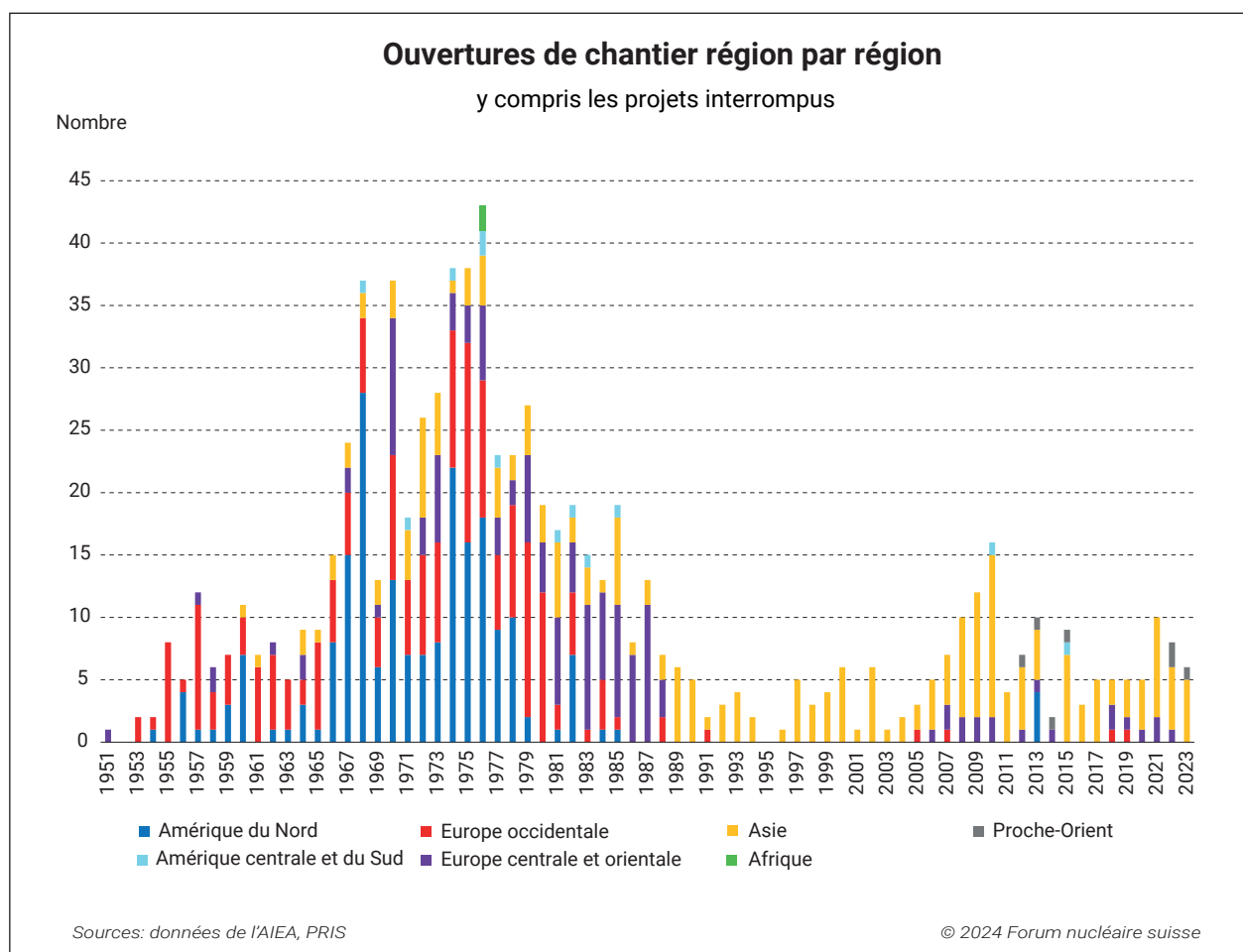
L'an dernier, c'est la Chine qui a été le pays le plus actif en matière de développement de ses capacités nucléaires: elle a lancé cinq projets de construction et mis en service un réacteur. La Biélorussie, les États-Unis et la Slovaquie ont chacun synchronisé pour la première fois une tranche avec le réseau, alors que l'Allemagne a arrêté définitivement ses trois derniers réacteurs. La Belgique, pour sa part, en a fermé un, tout comme Taïwan. L'Égypte a lancé la construction de sa troisième tranche. Le Japon a reconnecté au réseau deux des réacteurs arrêtés à la suite de l'accident nucléaire de Fukushima, si bien que douze de ses 33 installations sont maintenant en service. Au 31 décembre 2023, le parc nucléaire civil mondial comptait ainsi 438 réacteurs répartis dans 32 pays, et sa puissance nette avait légèrement diminué pour s'inscrire à 392'700 MW (contre 393 600 MW à fin 2022).

En 2023, cinq tranches nucléaires ont été synchronisées pour la première fois avec le réseau électrique: Belarus 2 (Biélorussie, 13 mai), Fangchenggang 3 (Chine, 10 janvier), Mochovce 3 (Slovaquie, 31 janvier), Shin-Hanul 2

(Corée du Sud, 21 décembre), Vogtle 3 (États-Unis, 31 juillet). Relevons que Fangchenggang 3 est le premier Hualong-One de Chine occidentale. S'agissant de Mochovce 3, sa construction avait été lancée au milieu



Sur le site de Vogtle, la tranche 3 est connectée au réseau depuis le 1^{er} avril 2023. Ce réacteur de type AP1000 est la première tranche nucléaire mise en service aux États-Unis depuis 2016. (Photo: Georgia Power)



Dans les années 1960 et 1970, la construction de centrales nucléaires a connu un essor fulgurant en Europe occidentale et en Amérique du Nord (voir le graphique de la page 13). La France a ainsi construit et raccordé au réseau pas moins de 52 réacteurs nucléaires entre 1975 et 1990. Dans les années 1980, c'est avant tout en Europe centrale et orientale que l'on a bâti des centrales nucléaires. L'accident de Tchernobyl survenu en 1986 a entraîné un recul significatif des ouvertures de chantier. Dans les premières années qui ont suivi, c'est surtout en Asie (Chine, Corée du Sud, Inde ...) que des projets de construction ont été lancés. En 2008 et 2009, la construction de centrales nucléaires a repris, y compris en Russie, et elle s'est poursuivie après l'accident nucléaire de Fukushima survenu en 2011.

des années 1980, puis interrompue au début des années 1990, faute d'argent, pour ensuite reprendre il y a une bonne dizaine d'années. C'est une tranche du type russe VVER-440/V213 qui a été modernisée: de nombreuses améliorations sécuritaires y ont été apportées, dont une plus grande protection contre les chutes d'avions intentionnelles, et des mesures ont été prises dans le domaine de la gestion des situations d'urgence sur la base des enseignements tirés de Fukushima. Quant à Shin-Hanul 2 (anciennement Shin-Ulchin 2), il s'agit d'un réacteur à eau sous pression avancé du type indigène

APR-1400, qui vise notamment à assurer une meilleure couverture des besoins d'électricité sud-coréens en hiver. Enfin, Vogtle 3 est le premier réacteur de troisième génération avancée construit aux États-Unis. Il s'agit d'une tranche AP1000 qui produira de l'électricité propre pendant 60 à 80 ans.

À fin 2023, les États-Unis étaient toujours le pays comptant le plus de tranches nucléaires en service (93), suivis par la France (56), la Chine (55) et la Russie (37).



Ouvertures de chantier: cinq en Chine ...

Comme cela avait déjà été le cas en 2022, la Chine a coulé le premier béton de cinq tranches nucléaires en 2023: quatre CAP1000, sur les sites de Haiyang, Lianjiang, Sanmen et Xudabao, et un Hualong-One sur celui de Lufeng. Le CAP1000 est une conception chinoise dérivée de l'AP1000 américain. La tranche Lianjiang 1 devrait être achevée et mise en service en 2028. Ce réacteur est conçu pour pouvoir fonctionner durant 60 ans. Selon State Power Investment Corporation (SPIC), il s'agit du premier projet nucléaire chinois utilisant de l'eau de mer pour le refroidissement du circuit secondaire. Autre innovation: Lianjiang 1 sera dotée d'une tour de refroidissement de très grandes dimensions nouvellement développée, qui doit permettre à terme de réduire encore l'impact environnemental des projets nucléaires. Quant à la tranche Haiyang 4, elle devrait, toujours selon SPIC, entrer en service en 2027. Pour la construction de Sanmen 4, China National Nuclear Corporation (CNNC) s'appuie principalement sur de la main-d'œuvre indigène. L'entreprise chiffre à près de 70% le taux de localisation du projet. L'industrie nucléaire n'est pas la seule à tirer profit de cette situation, des branches connexes comme la métallurgie, l'électromécanique et l'usinage en font autant. Enfin, la construction du Hualong-One Xudabao 1 a officiellement débuté à la mi-novembre 2023, ce qui en fait le dernier projet de centrale nucléaire lancé l'année dernière en Chine.

... et une en Égypte

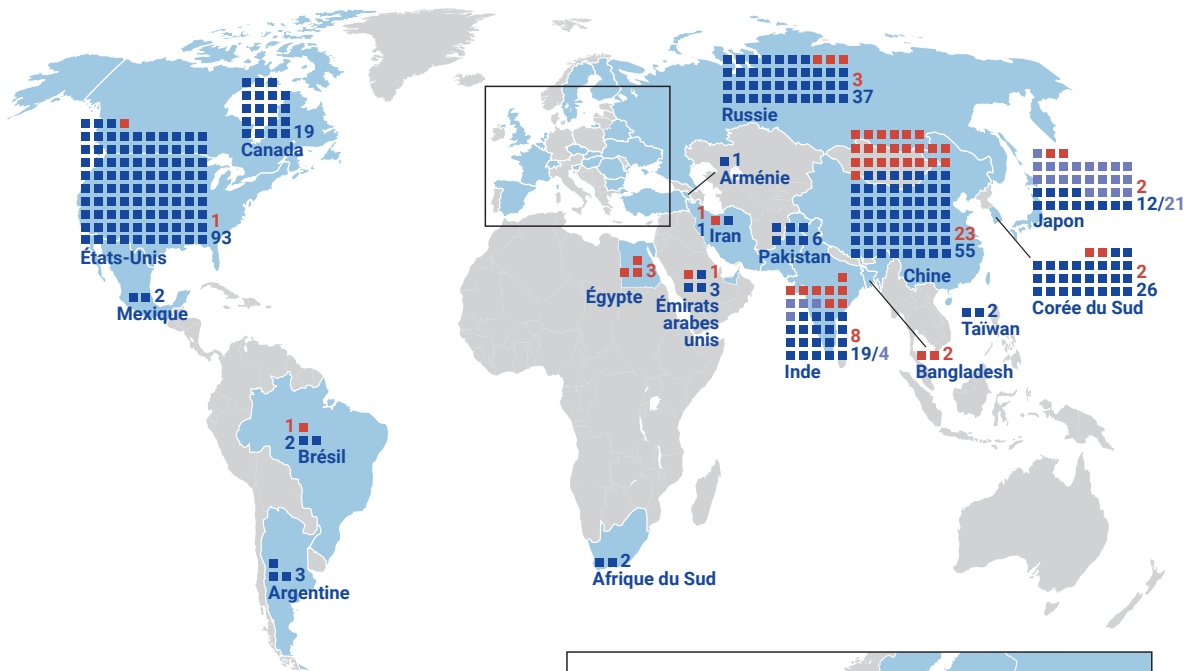
En Égypte, le premier béton de la tranche nucléaire El-Dabaa 3 a été coulé le 3 mai 2023, marquant ainsi le

lancement officiel de la construction de l'installation. Après El-Dabaa 1 et 2, c'est la troisième tranche de type VVER-1200 en construction en Égypte, sur les quatre prévues. Le site d'El-Dabaa se trouve à quelque 300 km au nord-ouest du Caire, la capitale du pays. Nouvelle venue dans le nucléaire, l'Égypte est soutenue par la Russie sur la base d'engagements contractuels prévoyant que le groupe étatique russe Rosatom assure non seulement la construction des installations, mais aussi la fourniture du combustible pour toute la durée de vie de la centrale nucléaire, qu'il participe à la formation du personnel, et qu'il soutienne ce dernier dans le cadre de l'exploitation et de la maintenance durant les dix premières années de fonctionnement. Un autre accord prévoit la construction par la partie russe d'un dépôt pour le combustible usé, avec fourniture des conteneurs requis. Enfin, Korea Hydro & Nuclear Power construira 80 bâtiments et fournira des matériaux pour la partie non nucléaire de l'installation.

Cinq fermetures définitives

En 2023, l'Allemagne a fermé ses trois dernières tranches encore en service (Emsland, Isar 2 et Neckarwestheim 2), achevant ainsi l'abandon de l'atome décidé après Fukushima. Néanmoins, de plus en plus de voix s'élèvent outre-Rhin pour réclamer le retour de l'énergie nucléaire, qui jusqu'en 2011 comptait pour un quart de la production domestique d'électricité. Deux autres pays ont chacun arrêté définitivement une tranche à la suite de décisions d'abandon de l'atome de nature politique: la Belgique, qui a fermé Tihange 2, et Taiwan, qui en a fait autant avec Kuosheng 2. (M.A./D.B. d'après l'AIEA, base de données PRIS et nuclearplanet.ch)

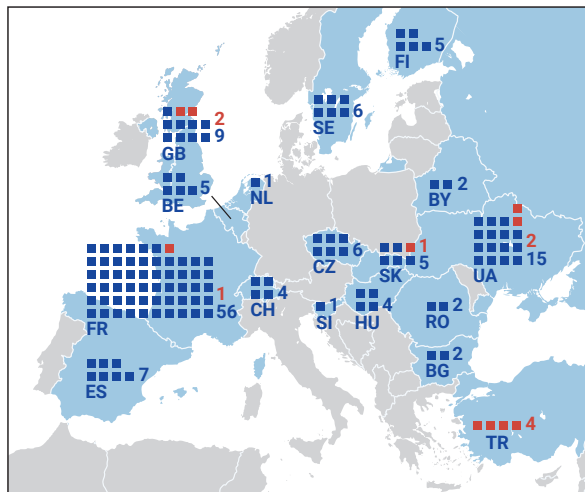
Les centrales nucléaires dans le monde



État au 31 décembre 2023

- Centrales nucléaires en service: 438
- Dont actuellement à l'arrêt: 25
- Puissance totale: env. 392'700 MW
- Centrales nucléaires en construction: 57
- Puissance totale: env. 60'500 MW

© 2024 Forum nucléaire suisse



La recherche sur la fusion en Allemagne

L'Allemagne a certes abandonné la fission en avril 2023, mais elle poursuit ses recherches en matière de fusion, ce «vecteur d'espoir» dont elle espère qu'il l'aidera à couvrir ses besoins croissants en électricité décarbonée. Grâce à un programme de soutien, le pays injectera plus d'un milliard d'euros dans la recherche sur la fusion d'ici fin 2028 dans le but de construire une centrale à fusion sur son territoire avant le milieu du siècle.

«La crise énergétique nous a montré à quel point il est essentiel de disposer d'un approvisionnement énergétique propre, fiable et abordable. La fusion est une chance énorme de résoudre tous nos problèmes énergétiques. Avec notre nouveau programme de soutien, nous voulons investir massivement dans ce domaine. Nous y consacrerons plus d'un milliard d'euros au cours des cinq prochaines années, et ce de manière technologiquement ouverte», a déclaré la ministre allemande de la Recherche, Bettina Stark-Watzinger, dans un message vidéo diffusé le 5 septembre 2023 depuis le ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBF). Elle indique vouloir créer un «écosystème de la fusion» en collaboration avec l'industrie, afin qu'une centrale à

fusion devienne rapidement réalité en Allemagne. «La question n'est plus de savoir si la fusion aura lieu, mais si l'Allemagne en fera partie. Mon objectif est que ce soit le cas».

La ministre allemande prévoit d'allouer un montant supplémentaire de 370 millions d'euros à la recherche sur la fusion pour la période allant jusqu'à fin 2028: «Avec les moyens déjà prévus pour les instituts de recherche, le BMBF aura ainsi débloqué plus d'un milliard d'euros pour ce domaine de recherche à l'horizon 2028». Ce soutien ira ainsi aussi bien à la fusion magnétique qu'à la fusion laser, ce qui en assurera la neutralité technologique, a précisé Mme Stark-Watzinger. Le programme de soutien du BMBF est fondé sur une prise de position publiée en juin 2023 sur la recherche en matière de fusion, qui décrit les conditions-cadres dans lesquelles une centrale à fusion peut devenir réalité en Allemagne.

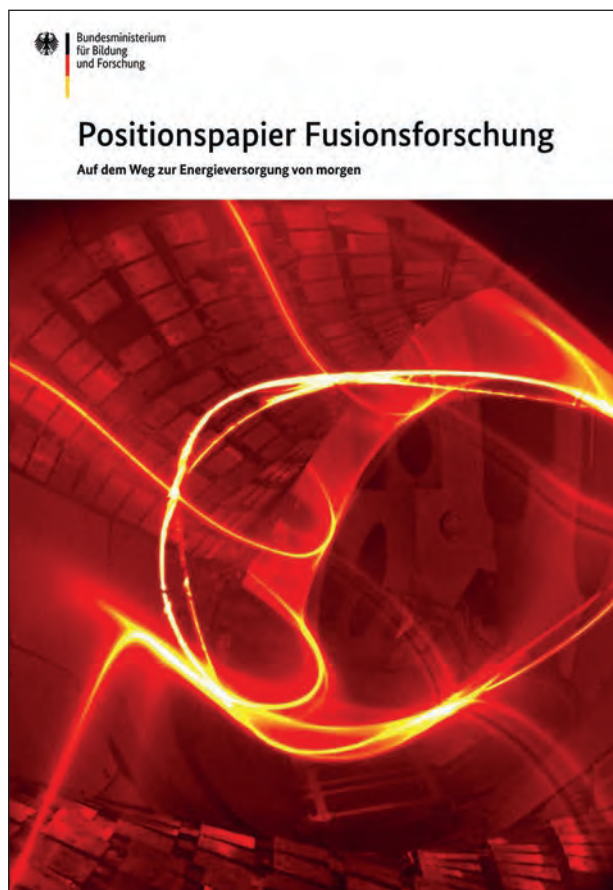
Il n'y a pas qu'au niveau fédéral que des activités sont en cours pour encourager la fusion nucléaire. Le land de Bavière, souvent critiqué par les médias pour sa lenteur à développer l'éolien, entend lui aussi se doter de centrales à fusion et a présenté à cet effet son «Masterplan zur Förderung der Kernfusion und neuartiger Kerntechnologien» (Masterplan pour l'encouragement de la fusion nucléaire et des nouvelles technologies nucléaires) à la fin septembre 2023.

Un pays bien établi dans le domaine de la fusion magnétique, mais avec un retard à combler dans la fusion laser

En Allemagne, plusieurs instituts de recherche travaillent depuis des décennies sur la fusion nucléaire, surtout magnétique: l'Institut Max-Planck de physique des plasmas (IPP) à Garching près de Munich, l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT) et le Centre de recherche de Jülich (FZJ). Tous trois reçoivent déjà des fonds gouvernementaux.



En septembre 2023, Bettina Stark-Watzinger, ministre allemande de la Recherche, annonce le lancement d'un programme visant à octroyer un soutien d'un milliard d'euros à la recherche sur la fusion jusqu'à fin 2028. L'objectif est de construire une centrale à fusion outre-Rhin (démonstrateur) d'ici 2045. (Photo: BMBF / Hans-Joachim Rickel)



En juin 2023, le BMBF a publié le document «Positionspapier Fusionsforschung – Auf dem Weg zur Energieversorgung von morgen» (Prise de position sur la recherche en matière de fusion: sur la voie de l’approvisionnement énergétique de demain). Il y reprend entre autres les besoins formulés par une commission d’experts sur la fusion inertielle en vue d’un développement réussi de la fusion et décrit dans leurs grandes lignes les activités en cours et en projet. (Photo: BMBF)

À côté de la fusion magnétique, des recherches sur la fusion inertielle par laser sont également en cours au plan international, et elles commencent à porter leurs fruits, comme le montre la percée réalisée fin 2022 par des chercheurs du Lawrence Livermore National Laboratory californien, qui ont pour la première fois réussi à obtenir un gain d’énergie net. Une telle réussite, conjuguée à d’autres avancées, a incité l’Allemagne à évaluer son potentiel en matière de fusion laser en vue de développer ses activités dans ce domaine. En mai 2023, la ministre Stark-Watzinger s’est exprimée en ces termes après s’être vu remettre le mémorandum «Laser Inertial Fusion Energy» rédigé par la commission d’experts man-

datée à cet effet: «Grâce notamment à son savoir-faire en matière de technologie laser, l’Allemagne a beaucoup à apporter à l’énergie d’avenir qu’est la fusion. Ce sujet doit être abordé sans idéologie et en faisant preuve d’ouverture technologique».

Ce mémorandum décrit les potentiels de la place industrielle et du pôle de recherche qu’est l’Allemagne dans l’optique de la fusion laser. Il définit les besoins pour poursuivre la recherche dans ce domaine dans la perspective de la construction d’une première centrale à fusion. Certaines des conclusions de ce mémorandum ont été reprises dans la prise de position de juin 2023 évoquée plus haut, qui vise notamment à faire progresser le développement d’infrastructures de fusion laser en Allemagne. Selon cette prise de position et l’annonce du programme d’encouragement faite en septembre 2023, le BMBF entend doter l’agence pour l’innovation disruptive SPRIND (Federal Agency for Disruptive Innovation) d’une filiale spécifique, Pulsed Light Technologies GmbH, qui d’ici fin 2028 investira jusqu’à 90 millions d’euros dans des projets conjoints avec le secteur privé.

Le programme d’encouragement du BMBF prévoit de compléter le soutien déjà fourni aux grandes institutions de recherche par un volet important, celui de l’intégra-



Le professeur Constantin Häfner, président de la commission d’experts sur la fusion laser mandatée par le BMBF, remet à Bettina Stark-Watzinger son mémorandum sur la fusion par confinement inertiel par laser. C’était le 22 mai 2023. (Photo: BMBF / Hans-Joachim Rickel)

tion de l'industrie. «La poursuite du développement des approches technologiques doit viser à accroître de façon ciblée le degré de maturité des technologies requises en intégrant l'industrie dans cet effort (p. ex. au moyen de projets de recherche conjoints)», écrit le BMBF dans sa prise de position, en précisant que: «Ce [partenariat public-privé] représente logiquement la prochaine étape vers l'exploitation systématique du savoir-faire issu de la recherche fondamentale. Il s'agit de mener des projets sur des éléments concrets de la technologie dans le cadre de projets de coopération entre les instituts de recherche, les hautes écoles et l'industrie.» Ce mode d'encouragement de la recherche a déjà fait ses preuves dans d'autres domaines technologiques.

L'Allemagne reconnaît le potentiel de la fusion

Si l'Allemagne encourage une technologie comme la fusion tout en fermant ses centrales à fission, on peut en déduire que la fusion présente un certain nombre d'avantages. Dans sa «Stratégie d'avenir pour la recherche et l'innovation» publiée en février 2023, le BMBF écrit: «La recherche sur la fusion vise à développer une

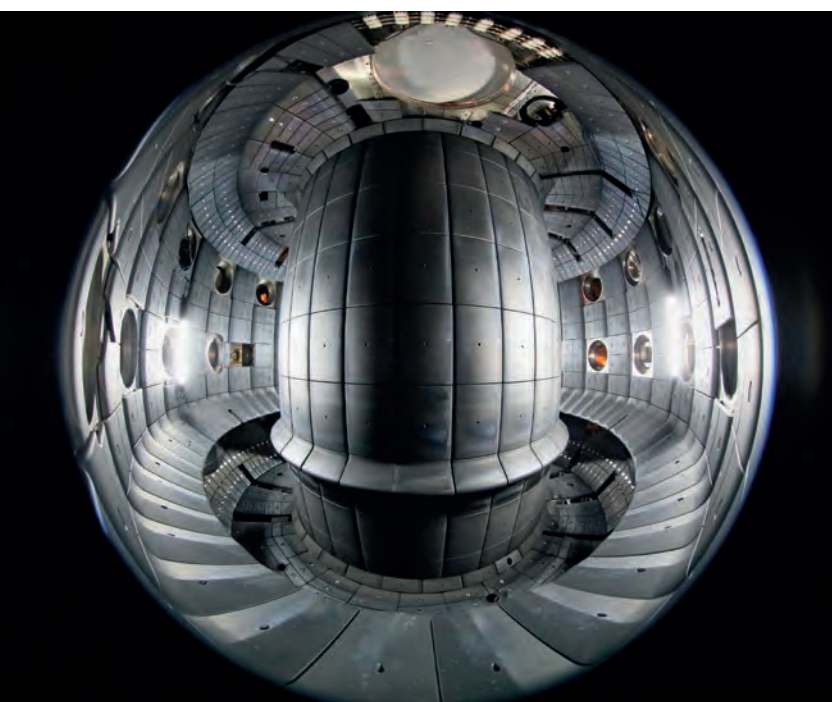
La fusion nucléaire

Quels sont les mécanismes qui sont à l'œuvre dans la fusion nucléaire? Comment cette dernière fait-elle briller les étoiles pendant des milliards d'années? L'humanité rêve d'utiliser cette source d'énergie quasi inépuisable à son échelle, mais quels problèmes faut-il alors résoudre? Comment fonctionne une centrale à fusion nucléaire? Regardez le film d'animation du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) pour recevoir des réponses à ces questions.



source d'énergie fiable et économique qui ne dépende pas des combustibles fossiles. Les activités menées en Allemagne dans ce domaine apportent d'ores et déjà des connaissances importantes pour l'exploitation potentielle de la fusion dans les centrales électriques. Axée sur le long terme, la recherche sur la fusion complète la recherche pour la transition énergétique.»

Dans sa prise de position, le BMBF qualifie la fusion de «technologie d'avenir pour la production d'énergie neutre en CO₂» et de solution «porteuse d'espoir» pour la couverture de besoins croissants en électricité: «Nous avons besoin de sources d'énergie sûres, abordables et neutres en CO₂ qui soient capables de couvrir la charge de base.» Le ministère a indiqué qu'à l'heure actuelle, il n'est pas encore possible de se passer des centrales électriques conventionnelles, car le solaire et l'éolien ne fournissent pas toujours de l'énergie de manière fiable. Il estime que la consommation d'énergie élevée des pays industrialisés obligera ces derniers à poursuivre la diversification de leur secteur énergétique. En plus des énergies vertes, il leur faudra pouvoir recourir à des technologies neutres en CO₂ capables de participer à la couverture de la charge de base et qui viendront compléter le mix électrique du futur: «La fusion, en s'ajoutant à l'électricité de source renouvelable et à l'hydrogène vert, peut apporter une contribution en la matière».



L'intérieur du tokamak à configuration variable (TCV) de l'EPFL.
(Photo: Alain Herzog / EPFL)

La recherche suisse sur la fusion

Avec le Swiss Plasma Center (SPC) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), la Suisse dispose elle aussi de son propre centre de recherche sur les plasmas et la fusion, ainsi que de son propre réacteur de fusion. Construit en 1992, le TCV (Tokamak à Configuration Variable) a fêté son 30^e anniversaire en septembre 2023. Comme son nom le laisse supposer, il permet notamment aux chercheurs de générer différentes formes de plasma en vue de déterminer la configuration de plasma la plus appropriée pour produire de l'électricité dans un réacteur de fusion à usage commercial.

«Le Swiss Plasma Center s'est fixé pour objectif de contribuer à la réussite du projet Iter [réacteur expérimental thermonucléaire international], de développer les bases scientifiques et technologiques de [la future centrale de démonstration] Demo, de former les prochaines générations de scientifiques et d'ingénieurs spécialisés dans la fusion et d'exploiter les applications du plasma et de la fusion pour l'industrie et la société», explique le professeur Ambrogio Fasoli, directeur du SPC. Iter servira à démontrer la faisabilité scientifique et technologique de la fusion sur Terre, tandis que Demo prouvera que l'énergie de fusion peut être exploitée commercialement, précise-t-il. La recherche suisse en fusion est axée sur la contribution qu'elle entend offrir aux projets internationaux, tout en encourageant en parallèle la participation de l'industrie suisse à ces projets. Mais comment tout cela a-t-il commencé?

La Suisse s'est engagée dans le programme de recherche sur la fusion de la Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom) en 1978 par le biais d'un accord de coopération pour la recherche commune dans le domaine de la physique

des plasmas et de la fusion nucléaire. En tant que membre de l'entreprise européenne Fusion for Energy, la Suisse a participé à la construction d'Iter de 2007 à 2020, versant à cet effet 274,5 millions de francs à Euratom durant la même période. De 2007 à 2019, Iter a en parallèle généré des commandes à hauteur de 190 millions de francs pour les entreprises suisses. La Suisse a assumé très tôt des tâches centrales dans le projet ITER. Ainsi, tous les composants supraconducteurs des aimants ont été testés par le Superconductivity Group du SPC à Villigen, dans le canton d'Argovie. En outre, TCV est depuis 2015 l'une des expériences centrales d'EUROfusion, le consortium qui organise la recherche sur la fusion en Europe. Après l'échec de l'accord-cadre avec l'UE en 2021, la Suisse a perdu son statut de pays tiers associé à Horizon Europe et donc au programme de recherche et de formation d'EUROfusion. L'UE ne considère pour l'heure plus la Suisse comme un État participant à la construction d'Iter. De ce fait, les entreprises industrielles suisses ne peuvent plus participer directement aux appels d'offres pour la fourniture de composants et de services liés à Iter.

Auparavant, le SPC représentait directement la Suisse auprès d'EUROfusion. À titre de solution transitoire, il a pu en devenir partenaire associé par l'intermédiaire de l'Institut allemand Max-Planck de physique des plasmas (IPP), qui assure la coordination d'EUROfusion. Selon Ambrogio Fasoli, cela permet aux collaborateurs de continuer à participer à toutes les activités de recherche et d'avoir accès aux installations des autres pays. Mais cela signifie aussi qu'ils sont désormais financés directement par la Suisse et non plus par EUROfusion. *(M.A./D.B. d'après différentes sources)*



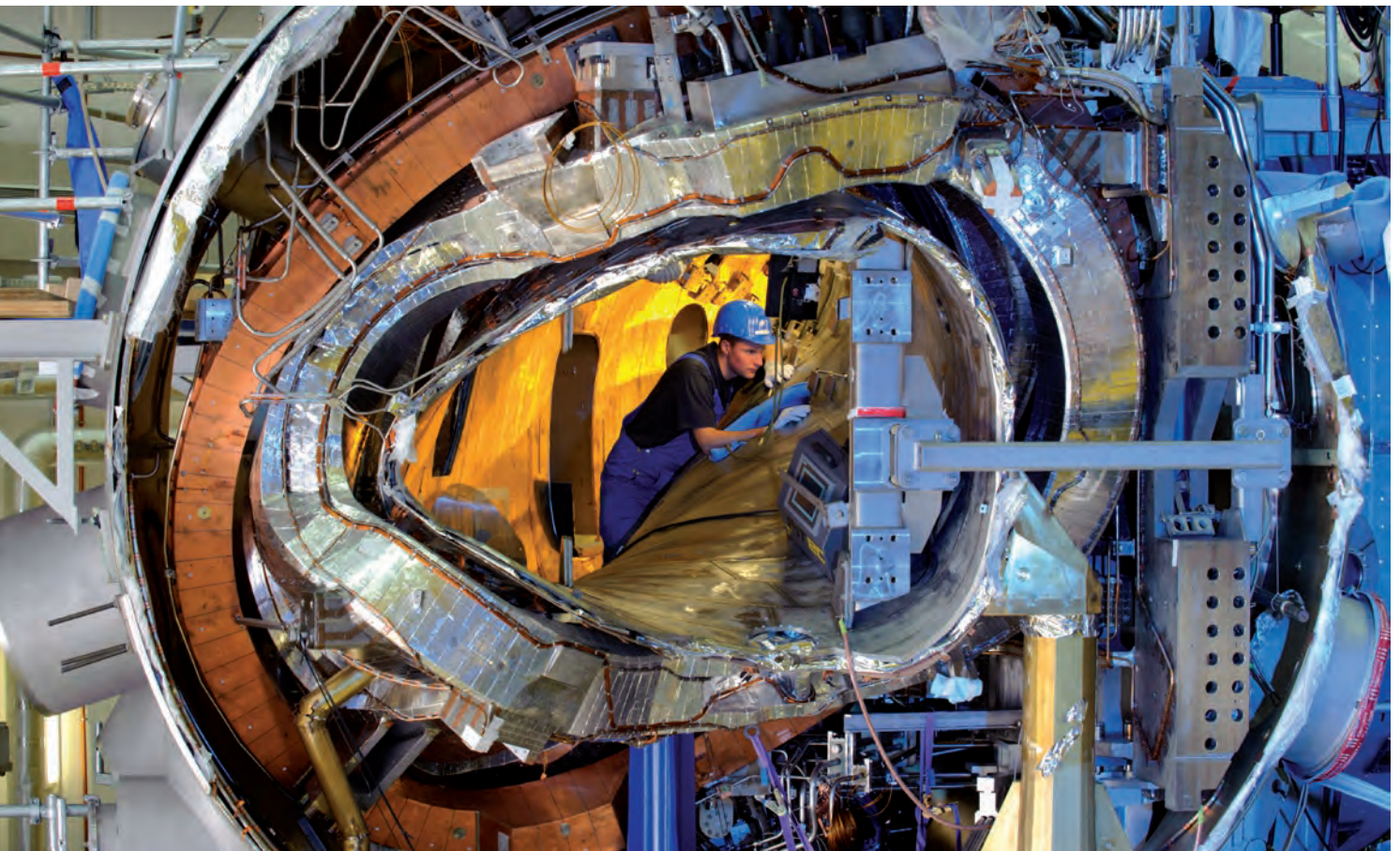
Le programme d'encouragement «Fusion 2040 – vers une centrale de fusion», présenté le 13 mars 2024, prévoit que la première centrale de fusion en Allemagne sera construite au début des années 2040.

La fusion nucléaire: différents procédés

La ministre allemande de la Recherche, Bettina Stark-Watzinger, plaide en faveur d'une ouverture technologique dans le cadre de la recherche sur la fusion. Elle aborde donc les différents procédés permettant de reproduire sur Terre des conditions similaires à celles présentes sur le soleil: la fusion par confinement magnétique et la fusion par confinement inertiel.

Stellarators et tokamaks: les réacteurs de fusion magnétique

Dans le cadre de la fusion magnétique – le procédé le plus utilisé –, le plasma de fusion est confiné par des champs magnétiques qui le maintiennent à distance des parois du réacteur. Sur Terre, la fusion deutérium – tritium est la plus simple à réaliser, raison pour laquelle ces deux isotopes de l'hydrogène sont utilisés comme combustibles dans le plasma de fusion. Le plasma est chauffé à plus de 100 degrés grâce à l'émission d'ondes électromagnétiques, à la manière d'un four à micro-ondes, ce qui permet de libérer l'énergie requise pour faire fusionner des noyaux de deutérium et de tritium.



L'installation expérimentale Wendelstein 7-X de l'Institut Max-Planck de physique des plasmas (IPP), sur le site Greifswald, doit permettre de «démontrer la faisabilité d'installations de fusion du type stellarator.» Elle a généré son premier plasma en décembre 2015. Les expérimentations doivent permettre d'étudier avant tout les propriétés de confinement d'un stellarator optimisé ainsi que le fonctionnement continu de ce dernier. La photographie montre un des modules durant le montage: on y voit la cuve du plasma, une bobine magnétique, la cuve extérieure ainsi que de nombreuses conduites dans lesquelles circulent le fluide caloporteur et l'électricité.

(Photo: Institut Max-Planck de physique des plasmas, Wolfgang Filser)

L'énergie libérée lors de la réaction de fusion est alors captée et transformée en électricité au moyen d'une turbine.

Les deux installations exploitées à l'Institut Max-Planck de physique des plasmas (IPP) fonctionnent selon le principe de la fusion par confinement magnétique: il s'agit du tokamak ASDEX Upgrade («Axialsymmetrisches Divertor-Experiment»), à Garching, et du Wendelstein 7-X, le plus gros stellarator au monde, à Greifswald. Par ailleurs, des sous-domaines de la fusion magnétique, tels que les interactions entre le plasma et la paroi du réacteur, la résistance à la fatigue des matériaux, les aimants, le cycle du combustible et la gestion de la chaleur, sont étudiés à l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT) et au Centre de recherche de Jülich (FZJ). Le Réacteur expérimental thermonucléaire international (Iter), construit en France, repose, lui aussi, sur la fusion par confinement magnétique. L'Allemagne participe aux travaux par l'intermédiaire du consortium européen EUROfusion.

Les tokamaks et les stellarators se distinguent principalement par leur champ magnétique: dans le cas du stellarator, des bobines externes de forme complexe produisent un champ magnétique qui confine le plasma, lequel revêt la forme d'une torsion. Le stellarator peut fonctionner en continu. À l'inverse, un tokamak fonctionne par impulsions. En plus du champ magnétique généré par des bobines de configuration plus simple que dans le stellarator, le tokamak nécessite l'intervention d'un transformateur qui induit, par impulsions, un courant électrique dans le plasma en forme de «donut», et maintient le courant stable.

La fusion inertielle par lumière laser et par projectiles

Outre les institutions de recherche connues telles que le National Ignition Facility du Lawrence Livermore Natio-

nal Laboratory, en Californie, des start-up de taille plus modeste étudient la fusion inertielle. Dans le cas de celle-ci, deux nouvelles approches permettent de fournir au combustible une quantité d'énergie suffisante pour pouvoir le comprimer et déclencher une réaction de fusion: le bombardement par lumière laser et le bombardement par projectiles. D'après le ministère fédéral allemand de la Formation et de la recherche (BMBF), l'Europe, y compris l'Allemagne et à l'exception de la France et de la Grande-Bretagne, mène comparativement peu de travaux.

Dans le cas de la fusion inertielle, une bille de combustible d'un millimètre de diamètre est exposée à un intense faisceau de lumière laser ou à un faisceau de particules, lequel permet de chauffer la bille en question. Justin Wark, physicien à l'Université d'Oxford, explique qu'ensuite: «La partie extérieure de la bille s'évapore et se transforme en plasma qui se détache de la surface et produit une sorte de «fusée sphérique» qui implose en atteignant une vitesse de 400 kilomètres par seconde en quelques milliardièmes de secondes seulement.» On obtient alors la densité et la température requises pour la réaction de fusion. Le «claquement» qui se produit alors au cœur de la bille provoque une étincelle, et la densité du combustible comprimé qui entoure cette étincelle est si élevée qu'elle rend possible la réaction de fusion nucléaire en un dixième de milliardième de seconde – soit plus rapidement que la vitesse à laquelle la minuscule bille chaude pourrait éclater. «[La bille] est alors confinée par sa propre inertie, raison pour laquelle on nomme cette méthode de fusion «fusion inertielle», explique le professeur Wark.

Une autre branche de la fusion par confinement inertielle est la fusion par projectiles: pour déclencher la réaction de fusion, une bille de combustible est bombardée non pas par un faisceau lumineux mais par un faisceau de projectiles. (B.G./D.B./C.B. d'après différentes sources)

EAU: calendrier respecté pratiquement à la lettre

Les Émirats arabes unis (EAU) ont construit leurs quatre premières tranches nucléaires sur le site de Barakah en huit ans chacune grâce à une planification méticuleuse et au savoir-faire d'autres pays. D'autres tranches devraient suivre.

Alors que les récents projets de construction de l'industrie nucléaire occidentale ont fait parler d'eux à plusieurs reprises en raison de retards et de dépassements budgétaires, les nouveaux venus dans le nucléaire que sont les EAU développent cette technologie à un rythme soutenu. La première des quatre tranches du site de Barakah a été mise en service en 2020, huit ans après le coulage du premier béton, et Barakah 4, la dernière, a divergé le 1^{er} mars 2024.

Le programme nucléaire des EAU

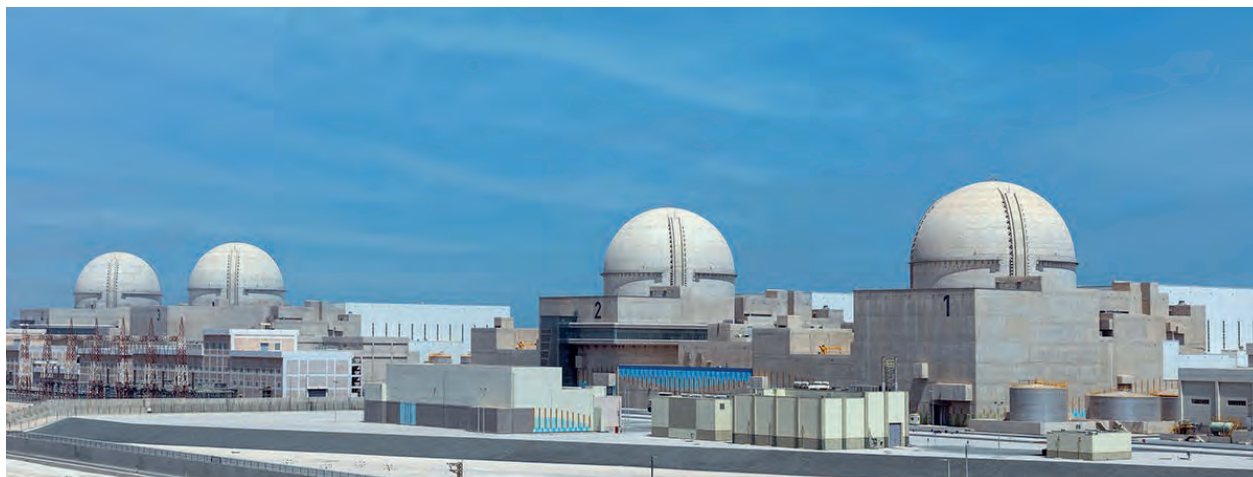
Le projet de construction est né en 2003 avec la ratification par les EAU d'un accord de garanties avec l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). À l'été 2008, le pays a nommé un ambassadeur auprès de cette organisation. En avril de la même année, il a publié une stratégie générale sur l'énergie nucléaire dans laquelle il prévoyait une forte augmentation de ses besoins en capacités de production d'électricité, s'attendant à ce qu'ils passent de 15,5 GW en 2008 à plus de 40 GW en 2020. Ce document jugeait le charbon importé trop polluant et pas assez sûr, et estimait que les énergies renouvelables ne pourraient pas couvrir plus de 6 à 7% des besoins à l'horizon 2020. En revanche, il qualifiait l'énergie nucléaire «d'option éprouvée, prometteuse sur le plan environnemental et compétitive sur le plan commercial, qui pourrait contribuer de manière significative à l'approvisionnement de base des EAU et à leur sécurité énergétique future».

La publication de la stratégie a été suivie par la mise en place d'un cadre juridique et par le choix du site, qui s'est porté sur Barakah, à 250 km à l'ouest de la ville d'Abu Dhabi. Fondée en 2009, l'Emirates Nuclear Energy Corporation (ENEC) a joué le rôle de propriétaire et de preneur de licence. À l'été 2009, ENEC avait reçu des offres de trois des neuf fabricants de réacteurs initialement invités à soumissionner: le Français Areva, qui proposait l'EPR avec Suez et Total, l'Américain GE Hitachi Nuclear Energy (GEH), qui proposait l'ABWR, et un consortium sud-coréen, qui proposait l'APR1400. En décembre 2009,

ENEC a annoncé qu'elle avait choisi le consortium dirigé par Korea Electric Power Corporation (Kepeco) pour construire quatre réacteurs APR1400. Kepeco a par la suite indiqué que si le choix s'était porté sur elle dans un contexte d'intense concurrence, c'est parce qu'elle avait démontré qu'elle offrait le facteur de capacité le plus élevé, les coûts de construction les plus bas et la durée de construction la plus courte. Les EAU portaient alors du principe que les quatre tranches nucléaires de Barakah assureraient 25% de leur production d'électricité à un quart du coût de celle issue du gaz.

De l'étude d'impact environnemental à la mise en service en dix ans

En avril 2010, ENEC a soumis à la Federal Authority of Nuclear Regulation (FANR) des demandes d'autorisation et une étude d'impact environnemental pour Barakah. Dix sites potentiels avaient au préalable été évalués pour la construction des quatre réacteurs en projet, avec le concours non seulement de la FANR, mais aussi de l'Electric Power Research Institute états-unien, de la Nuclear Regulatory Commission (NRC) et de l'AIEA. En juillet 2010, la FANR a accordé à ENEC une autorisation de préparation de site pour Barakah et une autorisation de construction limitée pour les principaux composants des quatre tranches. Le permis de construire de l'autorité environnementale d'Abu Dhabi a suivi peu après, et le premier coup de pioche a été donné en mars 2011. Les demandes de permis de construire étaient basées sur l'analyse de sûreté effectuée pour les tranches sud-coréennes Shin-Kori 3 et 4, construites par Kepeco, qui ont servi d'installations de référence pour Barakah. Il existe néanmoins plusieurs différences entre les tranches de Shin-Kori et celles de Barakah. La première est que la température de l'eau de mer dans le golfe de Barakah est d'environ 35 °C, alors qu'elle s'élève à 27 °C environ aux abords de Shin-Kori, ce qui pour Barakah entraîne un rendement thermique moindre et le besoin de disposer de plus grands échangeurs de chaleur et condenseurs. La seconde est la fréquence de sortie, qui est de 50 Hz aux EAU et de 60 Hz en Corée du Sud. Au final, les réacteurs



Les quatre tranches de la centrale nucléaire de Barakah ont été construites en quelque huit ans chacune. (Photo: ENEC)

de Barakah ont une puissance nette de 1345 MWe par tranche, contre 1383 MWe pour Shin-Kori 3 et 4.

En décembre 2010, ENEC a déposé une demande de permis de construire de 9000 pages pour les tranches 1 et 2 de Barakah. La FANR a délivré le permis en question à la mi-juillet 2012, après un examen de 18 mois auquel ont participé plus de 60 de ses collaborateurs, trois sociétés de conseil internationales et l'AIEA, et dans le cadre duquel des modifications résultant de l'accident de réacteur de Fukushima ont été intégrées. La construction de la tranche 1 a été lancée en juillet 2012, celle de la tranche 2 en avril 2013. Pour les tranches 3 et 4, ENEC a déposé en mars 2013 une demande de permis de construire de 10'000 pages basée sur celle des tranches 1 et 2. Cette demande a été approuvée à la mi-septembre 2014, et la construction de la tranche 3 a débuté une semaine plus tard. La tranche 4 a suivi le 30 juillet 2015.

Un retard dû à l'obstacle de la langue

La mise en service commercial des quatre tranches était initialement prévue pour 2017, 2018, 2019 et 2020 respectivement. En mars 2015, ENEC a déposé une demande d'autorisation d'exploiter pour les tranches 1 et 2. Une mission pré-OSART (équipe d'examen préliminaire de la sûreté d'exploitation) a établi un rapport positif en octobre 2017, et Nawah Energy Company (société exploitante fondée en mai 2016 et appartenant à 82% à ENEC et à 18% à Kepco) a demandé une mission de suivi

OSART. Il était alors prévu de charger en combustible la tranche 1 au mois d'août 2017, mais début 2017 sa mise en service a été reportée à 2018. Suite à un précédent rapport d'évaluation de la sûreté, Nawah a réalisé début 2018 un examen complet de l'aptitude à l'exploitation (ORR) à propos duquel la FANR a émis plus de 400 observations négatives, ce qui a eu pour effet de reporter à nouveau la mise en service. L'un des problèmes fondamentaux ayant entraîné certaines des critiques de la FANR était la nécessité de développer les connaissances d'anglais du personnel arabophone et coréanophone.

En juin 2018, le ministère de l'Énergie des EAU a délivré une licence de production d'énergie pour les quatre tranches de Barakah. En février 2020, la FANR a accordé l'autorisation d'exploiter la tranche 1. Le chargement en combustible a débuté peu après, et la tranche a été raccordée au réseau en août 2020, pour ensuite atteindre sa pleine puissance en décembre de la même année et entrer en service commercial en avril 2021. ENEC a annoncé l'achèvement de la tranche 2 en juillet 2020 et en a obtenu le permis d'exploitation en mars 2021, lançant alors sans attendre le chargement en combustible. La tranche 2 a été mise en service en août 2021 et raccordée au réseau un mois plus tard. La construction de la tranche 3 a été achevée en novembre 2021. L'autorisation d'exploiter a été délivrée en juin 2022, et le réacteur a pour la première fois injecté de l'électricité dans le réseau en octobre 2022. Il est en service commercial depuis février 2023. Le chargement en combustible de

Barakah 4 s'est achevé en décembre 2023. Le réacteur a ainsi pu diverger pour la première fois le 1^{er} mars 2024.

Une mise en œuvre rapide et de bonnes notes

Lorsque les EAU ont lancé leur programme nucléaire en 2008, l'opinion communément admise était que les programmes de ce genre sont généralement développés petit à petit, avec une certaine lenteur. Comment les EAU ont-ils déjoué ce pronostic? En mettant en œuvre toute une série de mesures en parallèle. Ainsi, ils ont au départ fait appel à des spécialistes étrangers expérimentés, puis ont formé leur propre personnel au fur et à mesure de l'avancement du projet. Ils ont en outre choisi un constructeur de réacteurs chevronné, qui avait déjà démontré sa capacité à respecter à la fois les délais et le budget impartis. En janvier 2011, une mission INIR (Integrated Nuclear Infrastructure Review) menée par l'AIEA a conclu que les EAU avaient suivi correctement l'«approche par étapes» préconisée par l'organisation pour ce type de pays. Parmi les bonnes pratiques identifiées par la mission figuraient la coopération entre les autorités de réglementation et les services publics (sans que leur indépendance s'en trouve entravée), le développement des ressources humaines, un système de management bien structuré et une forte culture de la sûreté. En outre,

ENEC a adhéré à l'Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO) afin de bénéficier dès le départ de ses procédures d'évaluation par les pairs (peer review) et de garantir ainsi des normes de sûreté élevées.

Autres projets de développement de l'atome

En 2010, ENEC a repris les négociations avec les soumissionnaires non retenus, Areva et GE Hitachi, en vue d'une collaboration dans des domaines nucléaires apparentés. En novembre 2013, la Dubai Electricity & Water Authority a annoncé qu'elle s'était fixé pour but de porter le nucléaire à 12% de ses capacités d'approvisionnement en électricité d'ici 2030, principalement à partir de la centrale nucléaire de Barakah à Abu Dhabi, mais éventuellement aussi, à un moment donné, à partir d'une centrale à Dubaï. Cet objectif figure dans la stratégie énergétique intégrée de Dubaï pour 2030. Quant à la nouvelle stratégie en matière d'énergies propres des EAU, annoncée en janvier 2017, elle prévoit des investissements de 163 milliards de dollars d'ici 2050 afin de mettre en place une production d'énergie issue à 44% des énergies renouvelables, à 6% du nucléaire, à 38% du gaz et à 12% du charbon propre. La stratégie en matière d'énergies propres de Dubaï pour 2050 est moins ambitieuse: elle vise à atteindre d'ici 2030 une production issue à 25% du solaire, à 7% du nucléaire, à 61% du gaz et à 7% de charbon propre. Dans une interview accordée au podcast «Decouple», le CEO d'ENEC, Mohamed Al Hammadi, a par ailleurs laissé entendre que le site de Barakah avait été initialement conçu pour accueillir huit réacteurs et qu'il était donc doté du nombre correspondant de canaux d'eau de refroidissement.

Le 1^{er} mars 2024, Enec a annoncé qu'elle utiliserait l'expérience et les connaissances acquises à Barakah pour aider d'autres pays à se doter de nouvelles capacités nucléaires. Parallèlement, elle entend développer le secteur nucléaire des EAU grâce à la recherche et développement, et en faisant appel aux technologies nucléaires les plus récentes. Selon elle, il s'agit notamment de petits réacteurs modulaires (SMR) et de réacteurs avancés destinés à la production d'électricité propre, d'hydrogène et d'ammoniac ainsi qu'à la fourniture de chaleur à différentes branches industrielles. (M.Re./D.B. d'après WNA, *Country Profile*, janvier 2024; ENEC, février 2024 et 1^{er} mars 2024, ainsi que *Decouple*, 10 mars 2023)



Pour faire face à la croissance fulgurante de leurs besoins en électricité, les Émirats arabes unis (ici Abu Dhabi) misent notamment sur l'énergie nucléaire. (Photo: Martin Lewison/Flickr)

L'acte modificateur unique et l'initiative Stop au blackout ne sont pas antinomiques



Jean-Philippe Kohl

Directeur adjoint et chef de la division Politique économique de Swissmem

Deux projets à première vue diamétralement opposés figurent à l'agenda de notre politique énergétique: l'acte modificateur unique, sur lequel le peuple se prononcera le 9 juin, et l'initiative Stop au blackout, qui vient d'être déposée. Il ne faut toutefois pas s'y tromper: une production d'électricité sûre, économiquement viable et climatiquement neutre requiert à la fois un renforcement des énergies renouvelables et la levée de l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires.

L'acte modificateur unique, on le sait, vise à accroître massivement la production domestique d'électricité d'origine hydraulique, photovoltaïque et éolienne par des mesures de soutien ciblées (subventions et accélération des procédures). Un tel accroissement est nécessaire de toute urgence en raison, d'une part, de la décarbonation et de l'électrification qui en découle, et de l'autre, de notre dépendance croissante aux importations hivernales d'électricité. Néanmoins, l'importation de courant est limitée

techniquement par les caractéristiques du système. En outre, il ne faut pas trop miser sur les capacités structurelles d'exportation des pays voisins en hiver: ces derniers sont eux aussi confrontés au défi de la décarbonation et au besoin supplémentaire d'électricité qu'elle induit.

Ce sont les milieux de la protection du paysage qui ont lancé le référendum contre l'acte modificateur unique. Leur principale critique est l'atteinte à la nature et au paysage qui découlerait de la construction de grandes installations solaires ou éoliennes dans les Alpes. Étant donné que ce sont en partie les mêmes milieux qui – par principe et indépendamment de tout projet spécifique – réclament à cor et à cri que l'on encourage les énergies renouvelables, il y a là une contradiction qui mine leur crédibilité.

Il faut néanmoins prendre au sérieux l'argumentation des détracteurs de l'acte modificateur unique. La Suisse a un problème d'approvisionnement électrique en hiver. Si l'on veut que des énergies renouvelables comme le photovoltaïque et l'éolien contribuent vraiment à l'approvisionnement hivernal, le lieu de construction typique de ces installations doit – pour des raisons liées à la météo – être la montagne (au-dessus de la limite du brouillard, sans compter qu'il y a aussi plus de vent dans les régions al-

Jean-Philippe Kohl a étudié l'économie politique à l'université de Zurich et obtenu son doctorat en 1996 à l'université de Bâle. Il a ensuite travaillé jusqu'en 2000 au département de politique économique de la Fédération des coopératives Migros à Zurich. Puis il a été secrétaire général adjoint de la Direction des finances du canton de Berne jusqu'en 2008. Depuis 2008, il est directeur adjoint et chef de la division Politique économique de Swissmem. Il est en outre chargé d'enseignement à la Haute école d'économie de la Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), à Brugg-Windisch, depuis 2003.

pines). Une telle approche modifiera fondamentalement la physionomie du paysage.

La protection du paysage obéit à des perceptions subjectives, c'est donc en dernière analyse une affaire de goût. Même s'il y a des exceptions, la plupart des gens semblent considérer les grandes installations en question comme des atteintes au paysage. C'est la seule explication que l'on puisse donner à l'opposition massive de la population locale à certains projets. Plusieurs projets d'installations photovoltaïques et de parcs éoliens alpins ont ainsi été tués dans l'œuf. Cette résistance n'est pas un phénomène propre aux populations rurales et alpines. Si l'on voulait construire un parc éolien à proximité de la ville de Zurich, la population locale s'y opposerait tout autant.

Le débat actuel sur la protection de la nature et du paysage n'aurait probablement jamais vu le jour si le projet de construction de deux nouvelles centrales nucléaires n'avait pas été abandonné à la suite de l'accident de Fukushima survenu en 2011. Si l'on compte un délai de réalisation de 20 ans, ces centrales auraient pu être mises en service aux alentours de 2035, et il n'aurait pas été nécessaire de développer le photovoltaïque et l'éolien de montagne.

La «dégradation du paysage» liée aux grandes installations renouvelables est donc le «prix à payer» pour la sortie du nucléaire décidée naguère. Mais il serait aujourd'hui improductif de rejeter l'acte modificateur unique pour tout miser sur le nucléaire. Cela ne cadre pas avec l'axe du temps. La société et l'économie ont besoin, de court à moyen terme, de plus d'électricité que ce que de nouvelles centrales nucléaires pourraient produire compte tenu des délais de construction. Consciente de cette «dépendance envers la courbe de développement des capacités», Swissmem soutient l'acte modificateur unique.

À long terme, il est tout à fait possible, à défaut de mieux, de limiter l'ampleur de la «dégradation du paysage». Pour cela, il faut premièrement que les centrales nucléaires existantes restent en service aussi longtemps qu'elles sont sûres. Et deuxièmement, il faut lever l'interdiction de construire de nouvelles installations nucléaires. C'est là une des principales exigences de l'initiative Stop au black-out.

En tant qu'association de l'industrie de la tech, Swissmem s'est toujours engagée en faveur de l'ouverture technologique tout en s'opposant à l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires. L'évolution au plan international montre clairement que le nucléaire doit être considéré comme l'un des piliers d'un approvisionnement énergétique climatiquement neutre, aux côtés des énergies renouvelables. Chaque forme de production ayant ses avantages et ses inconvénients spécifiques, la meilleure manière d'obtenir un système robuste est de jouer sur toute la gamme des technologies de production d'électricité climatiquement neutres. Il faudrait que de nouvelles capacités nucléaires soient disponibles au plus tard au moment de l'arrêt définitif, pour raison d'âge, de Gösigen et Leibstadt.

L'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires doit être levée sans plus tarder:

1. Tant que cette interdiction existera, on ne trouvera pas d'investisseurs prêts à se lancer dans la construction de centrales nucléaires. Pourquoi ces derniers s'intéresseraient-ils à des projets impossibles à réaliser? Leur absence d'intérêt est logique.
2. L'annulation de la date de péremption imposée à l'industrie nucléaire par décision politique constituerait un signal fort pour le marché du travail. Il faut du personnel qualifié aussi bien pour assurer l'exploitation à long terme des centrales nucléaires existantes que pour faire fonctionner celles de demain. Tôt ou tard, la Suisse devra assurer sa propre relève.
3. La recherche nucléaire revêt une grande importance, mais elle doit pouvoir être utilisée et mise en œuvre sur place. Aujourd'hui, elle est marginalisée et insuffisante.
4. Les délais de réalisation des nouvelles centrales nucléaires resteront longs, même si l'on parvient un jour à les raccourcir en accélérant les procédures, comme pour le photovoltaïque, l'éolien ou l'extension du réseau.
5. Il est indispensable qu'un débat sociétal ait lieu au préalable. La levée de l'autorisation de construire de nouvelles centrales nucléaires est bien plus qu'une simple formalité législative. Il s'agit d'un changement de paradigme visant à ce que le nucléaire soit considéré comme faisant partie intégrante des solutions permettant d'atteindre le zéro émission nette, au même titre que les énergies renouvelables.

Chronologie de l'acte modificateur unique

À l'été 2021, le Conseil fédéral a présenté au Parlement le message concernant la loi relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables (acte modificateur unique). Le projet repose sur les révisions de la loi sur l'approvisionnement en électricité et de la loi sur l'énergie. Au terme de plus de deux années de délibération, le Conseil national et le Conseil des États sont parvenus à une conciliation et l'acte modificateur unique a été adopté lors de la session d'automne 2023.

En octobre 2023, la Fondation Franz Weber (FFW) a lancé un référendum contre le projet, aux côtés d'autres organisations. Car selon elle, bien qu'il

présente certains points positifs, le paquet législatif donne la primauté aux installations de production d'électricité d'origine renouvelable au détriment de la protection de la nature et du paysage, ce qui est inacceptable.

La Chancellerie fédérale a confirmé que le Comité de référendum «Protection du paysage au lieu de la Loi sur les énergies renouvelables» avait remis, dans les temps, en janvier 2024, 63'277 signatures valables. Pour qu'un référendum facultatif puisse être organisé, 50'000 signatures minimum sont nécessaires. La date de la votation a été fixée au 9 juin 2024. (M.A./C.B.)



Dans son discours prononcé à l'occasion du Congrès de l'électricité 2024, le conseiller fédéral Albert Rösti a déclaré: «L'acte modificateur unique permettra de protéger le paysage tout en garantissant notre approvisionnement électrique». (Photo: AES via X)

Ceux qui pensent que ce débat arrive au mauvais moment ou trop tôt en ont tout simplement peur. La controverse suscitée par l'acte modificateur unique met clairement en évidence les conflits d'objectifs liés à la production d'électricité. L'ouverture technologique permet d'étendre les possibilités accessibles à la société pour cette production. Elle est donc souhaitable, et le plus tôt sera le mieux.

L'ouverture technologique n'est pas non plus une question de couleur politique, comme le montre le débat sur l'éner-

gie nucléaire au sein des partis verts d'Europe. «Moins d'Allemagne et plus de Finlande», voilà ce qu'il faudrait à la Suisse. Nous devons donc dire oui à l'acte modificateur unique et oui à la levée de l'interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires. (D.B.)

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

En Suisse

Le Conseil fédéral a approuvé le **programme de gestion des déchets 2021** de la Nagra, qui décrit l'avancement des travaux en Suisse en vue du dépôt en couches géologiques profondes. Il a également défini des exigences pour le programme 2026.



Le projet du siècle de dépôt en couches géologiques profondes de la Nagra suit son cours. (Photo: Nagra)

Mi-décembre 2023, **trois conteneurs de transport et de stockage** en provenance de la centrale nucléaire de Leibstadt sont arrivés au dépôt intermédiaire central (Zwilag) et ils ont été placés dans la halle de stockage.



Coup d'œil dans la halle de stockage des conteneurs à Zwilag, Würenlingen. Cette halle permet de stocker les déchets vitrifiés hautement radioactifs issus des installations de retraitement et les assemblages combustibles usés provenant des centrales nucléaires suisses. (Photo: Zwilag)

La Suisse est confiante quant au stockage des déchets radioactifs en couches géologiques profondes. Cette solution est plébiscitée par la majorité de la population, aussi bien à l'échelle du pays que dans la région concernée. C'est ce que montre un **sondage représentatif**.

En 2023, la centrale nucléaire de **Gösgen** a produit 8049 GWh d'électricité (2022: 7964 GWh). L'installation a injecté de l'électricité sur le réseau suisse de manière sûre et fiable durant 336 jours.

En 2023, la centrale nucléaire de **Leibstadt** a enregistré une production nette de 9677 GWh d'électricité, soit la troisième valeur la plus élevée de ses 40 ans d'exploitation.



La centrale nucléaire enregistre un nouveau record de production. (Photo: Centrale nucléaire de Leibstadt)

En 2023, plus de 29'000 personnes ont visité les **centres de visiteurs** des trois centrales nucléaires suisses et du dépôt intermédiaire Zwilag. Ainsi, l'intérêt de la population pour les installations nucléaires suisses a sensiblement augmenté par rapport à l'année précédente (+20%).

En marge du Forum économique mondial à Davos, le directeur de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), **Rafael Grossi**, a exprimé son point de vue très positif concernant les centrales nucléaires suisses, et a vanté les normes de sécurité élevées en vigueur dans notre pays.



Rafael Grossi est convaincu que les centrales nucléaires suisses pourront continuer à fonctionner encore longtemps. (Photo: World Economic Forum)

À l'étranger

La ministre française de la Transition énergétique, **Agnès Panier-Runacher**, a déclaré lors d'une interview accordée au journal La Tribune Dimanche: «Il faut du nucléaire au-delà des six premiers EPR2».



La ministre française de la Transition énergétique, Agnès Panier-Runacher, porte devant le Parlement le projet de loi sur la souveraineté énergétique, qui doit tracer la voie vers une France libérée des combustibles fossiles. (Photo: Agnès Panier-Runacher sur X)

Le **gouvernement britannique** a présenté les projets de développement de l'énergie nucléaire les plus ambitieux depuis 70 ans. Ceux-ci prévoient la construction de onze nouveaux réacteurs d'ici 2050, ce qui permettra de couvrir un quart du besoin national en électricité.

Le 27 décembre 2023, le **gouvernement espagnol** a publié une feuille de route pour la sortie du nucléaire du pays. Ainsi, les sept réacteurs actuellement en fonctionnement devraient être déconnectés du réseau entre 2027 et 2035.



Feuille de route de sortie du nucléaire: L'installation double d'Almaraz sera la première centrale nucléaire d'Espagne à être définitivement déconnectée du réseau au terme de la validité de son permis d'exploitation. (Photo: Foro Nuclear)

En **Estonie**, un groupe de travail composé de représentants et représentantes du gouvernement a étudié l'entrée du pays dans le nucléaire, et est arrivé à une conclusion positive.

Le gouvernement de l'Ontario soutient la modernisation des **tranches 5 à 8 de la centrale nucléaire de Pickering** par Ontario Power Generation (OPG). Celle-ci permettra de garantir l'approvisionnement énergétique durant encore 30 ans et de créer des emplois.

D'après Électricité de France (EDF), la mise en service de l'EPR **Hinkley-Point-C1** est repoussée à 2029, au plus tôt. Les coûts totaux du projet sont estimés entre 31 et 34 milliards de livres sterling (CHF 34 à 37 mia.).

La tranche nucléaire **Barakah 4**, aux Émirats arabes unis, a divergé le 1^{er} mars 2024. Les trois autres réacteurs APR-1400 du site nucléaire, situé à proximité de Ruwals, dans la région d'Al Dhafra, à Abu Dhabi, sont déjà en service.

La mise en service du second réacteur AP1000 sur le site nucléaire de **Vogtle**, dans l'État américain de Géorgie, à la limite avec la Caroline du Sud, marque l'achèvement de l'unique projet nucléaire des États-Unis.

Kakrapar 4 – un réacteur à eau lourde sous pression du type indigène IPHWR-700 – a pour la première fois délivré de l'électricité sur le réseau national le 20 février 2024. →



Le Premier ministre indien, Narendra Modi, se rend sur le site de Kakrapar. (Photo: NPCIL)

Le réacteur APR-1400 **Shin-Hanul 2**, en Corée du Sud, a été pour la première fois synchronisé avec le réseau le 21 décembre 2023. L'exploitation commerciale est attendue pour le premier semestre 2024.

La tranche nucléaire **Koursk 2** du type RBMK-1000 a été définitivement déconnectée du réseau le 31 janvier 2024 à 04 h 01, heure de Moscou.

L'entreprise américaine Westinghouse Electric Company a remis au Department of Energy Security and Net Zero (DESNZ) britannique une demande officielle afin de pouvoir soumettre son petit réacteur modulaire, l'**AP300**, à la procédure d'homologation britannique Generic Design Assessment (GDA).



Représentation du petit réacteur modulaire AP300 de Westinghouse. (Photo: Westinghouse Electric)

Le **Conseil d'État chinois** a décidé d'autoriser une nouvelle phase de développement du projet nucléaire de Taipingling, dans la province chinoise du Guangdong, et du projet Jinqimen, dans la province du Zhejiang. Deux installations du type Hualong-One seront construites sur chacun des deux sites.

Le DESNZ britannique a étudié et autorisé la demande déposée par le fabricant de réacteurs américain GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) concernant procédure d'homologation GDA de la conception du petit réacteur modulaire (SMR) du type **BWRX-300** de GEH.

L'entreprise américaine Westinghouse Electric Company a signé un accord avec le développeur de SMR britannique Community Nuclear Power (CNP) concernant la construction de quatre **AP300**.

Le **Xe-100**, un réacteur haute température refroidi au gaz de la génération IV, a achevé l'homologation préalable pour le Canada. La Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) n'a constaté aucun obstacle majeur à son homologation.

L'énergéticien Meralco a identifié trois sites susceptibles d'accueillir le **microréacteur modulaire** développé par l'entreprise américaine Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) dans et aux alentours de **Manille**, la capitale des Philippines.



Le microréacteur modulaire du développeur américain USNC est un réacteur haute température refroidi au gaz de la génération IV. Il sera construit dans le sous-sol. (Photo: USNC)

Baptisée «**Destination Nuclear**», la première initiative de coopération intersectorielle lancée en Grande-Bretagne par le secteur nucléaire vise à accroître les effectifs dans ce domaine pour réaliser les objectifs d'expansion du nucléaire du pays.

Le réacteur de fusion **Joint European Torus (JET)**, en Grande-Bretagne, a enregistré un nouveau record pour sa toute dernière expérimentation: Il a généré 69 mégajoules d'énergie à partir de seulement 0,2 milligramme de combustible deutérium-tritium.

L'Université technique du **Danemark** a décidé de mettre en place un centre interdisciplinaire destiné à consolider et renforcer la recherche dans le domaine des technologies nucléaires.

EDF Energy souhaite investir 1,3 milliard de livres supplémentaires (CHF 1,4 mia.) dans les neuf tranches nucléaires britanniques entre 2024 et 2026. Une prolongation de l'exploitation est à l'étude pour les huit réacteurs du type **Advanced Gas Cooled Reactor (AGR)**.

Lors du salon professionnel Marintec China 2023, qui a lieu tous les deux ans, la China State Shipbuilding Corporation (CSSC) a dévoilé les plans d'un nouveau porte-conteneurs gigantesque utilisant un **réacteur à sels fondus**.



Selon le chantier naval chinois de Jiangnan, le nouveau porte-conteneurs KUN-24AP est quasiment neutre sur le plan climatique grâce à sa propulsion nucléaire. Le navire, qui pourra accueillir jusqu'à 24'000 conteneurs, comptera parmi les plus grands au monde. (Photo: Global Times auf X)

Le **gouvernement britannique** investit 300 millions de livres sterling (env. CHF 325 mio.) dans un programme visant à promouvoir la production, sur son sol, de combustible à base d'uranium faiblement enrichi à teneur élevée («High-Assay Low Enriched Uranium», HALEU). Le premier site de production au Royaume-Uni doit être mis en service au début des années 2030

Orano Med a lancé la construction de la toute première **installation de production industrielle de radiothérapies internes** vectorisées à base de plomb 212 d'Europe.



Pose de la première pierre du nouveau laboratoire ATLab (Alpha Therapy Laboratory) sur le site français d'Onnaing près de Valenciennes, en présence de personnalités politiques locales et régionales, de représentants du secteur de la santé, et de représentants d'Orano. (Photo: Orano Med)

Le ministère namibien de l'Exploitation minière et de l'Énergie a remis à l'Australien Deep Yellow Ltd. la concession d'exploitation minière pour le **projet de Tu-mas**.

Au **Niger**, l'attribution de nouvelles licences minières a été suspendue. Global Atomic, une entreprise canadienne qui exploite des mines d'uranium dans ce pays d'Afrique de l'Ouest, a précisé que l'interdiction de nouvelles licences minières concernait uniquement les petits orpailleurs. (M.A./C.B./A.T.)

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.forum-nucleaire.ch.

L'intelligence artificielle au service de l'énergie nucléaire



Dr. Wolfgang Picot

Attaché de presse / RP à
l'Agence internationale de
l'énergie atomique (AIEA)

L'intelligence artificielle (IA), cet ensemble de systèmes informatiques sophistiqués qui simulent la logique humaine pour résoudre des problèmes et prendre des décisions, présente un important potentiel pour notre secteur d'activité. Grâce à sa capacité à améliorer à la fois l'efficacité, l'automatisation, la sûreté et la maintenance prédictive tout en optimisant les processus, l'IA progresse déjà dans certains domaines de l'industrie nucléaire.

L'IA est un terme générique qui englobe diverses technologies développées au fil des décennies. Elle peut aller de simples programmes informatiques, tels que les filtres antispam, à des concepts plus avancés comme l'apprentissage automatique (machine learning), par lequel les ordinateurs, grâce à un entraînement intensif reposant sur de gigantesques quantités de données, améliorent leur capacité à résoudre des tâches sans être explicitement programmés pour chacune. Avec l'arrivée de circuits intégrés très puissants est apparu l'apprentissage profond (deep learning), sous-domaine de l'apprentissage automatique faisant appel à des réseaux neuronaux artificiels calqués sur le cerveau humain.

L'IA générative, qui s'appuie sur des modèles d'apprentissage profond pour créer des contenus, captive le public grâce à sa capacité à générer des images, des vidéos et des textes originaux. Très polyvalente, elle peut être adaptée à de nombreuses fonctions ou activités. «On est en droit d'être enthousiasmé par ce que les outils génératifs peuvent faire», déclare Jeremy Renshaw, qui dirige les travaux concernant l'IA, les technologies quantiques et l'innovation nucléaire à l'Electric Power Research Institute (EPRI) américain. «Les modèles actuels sont déjà très performants et des efforts intenses

sont actuellement déployés pour développer des outils encore plus puissants.»

En raison de son caractère nouveau et opaque, l'IA générative ne peut pas encore être utilisée dans le cadre de l'exploitation des centrales nucléaires, même si elle est susceptible de faciliter certaines tâches administratives, comme dans d'autres secteurs. En effet, on ne comprend pas encore très bien comment les réseaux artificiels fonctionnent et parviennent à des conclusions. Des systèmes plus transparents, appelés «IA explicable», laissent espérer une extension de son utilisation à l'exploitation des installations. Des développements en ce sens sont en cours et M. Renshaw est convaincu qu'ils devraient permettre aux centrales nucléaires de faire appel à l'IA dans un avenir prévisible.

Les applications de l'apprentissage automatique (machine learning)

Utilisé dans le secteur nucléaire depuis un certain temps déjà, l'apprentissage automatique s'est avéré utile dans différents domaines. Les exploitants se servent des algorithmes d'apprentissage automatique pour la surveillance en temps réel et la maintenance prédictive. Les modèles d'apprentissage automatique



L'intelligence artificielle a fait l'objet d'une manifestation parallèle lors de la 67^e Conférence générale de l'AIEA. (Photo: AIEA / Dean Calma)

passent au crible les informations fournies par les capteurs, ce qui permet aux analystes humains de se concentrer sur les éventuelles irrégularités présentes dans une fraction de l'ensemble des données collectées. «L'inspecteur n'a besoin d'examiner que les données pertinentes. Il n'a pas à chercher une aiguille dans une botte de foin, car nous éliminons la botte de foin», explique M. Renshaw.

Cette technologie ne remplace pas l'analyse humaine. Cependant, elle peut fournir des résultats plus rapides et plus fiables tout en s'appuyant sur une interaction humaine moindre, bien que toujours indispensable. L'apprentissage automatique est déjà utilisé pour détecter les fissures dans les cuves et les tuyaux métalliques des centrales nucléaires. Il permet d'accroître la précision, de réduire les coûts et d'optimiser la surveillance humaine, ce qui pourrait constituer un progrès significatif pour la branche.

Les applications potentielles de l'IA dans les centrales nucléaires sont nombreuses. L'IA pourrait, par exemple, assurer l'ajustement de la production d'électricité en fonction de données recueillies en temps réel comme la demande des consommateurs, les conditions météorologiques et la performance des équipements. L'automatisation à l'aide de la robotique et de systèmes d'IA pourrait permettre de gérer les tâches courantes, de concentrer l'intervention humaine sur les tâches à forte valeur ajoutée et d'améliorer l'efficacité de la centrale. Elle permettrait également d'optimiser la consommation de combustible et de maximiser la production d'énergie des réacteurs.

«Associée à d'autres technologies, comme les jumeaux numériques, l'IA pourrait considérablement accroître l'efficacité de la production d'énergie d'origine nucléaire», indique Nelly Ngoy Kubelwa, ingénieure nucléaire spécialisée dans les technologies innovantes à l'AIEA. Un ju-

meau numérique est une représentation numérique d'un objet physique, d'une personne ou d'un processus, capable de simuler des situations réelles et leurs résultats.

Selon Mme Ngoy Kubelwa, les solutions d'IA suscitent un vif intérêt dans la filière. Cela étant, avant qu'une nouvelle technologie puisse être mise en œuvre dans les centrales nucléaires, il faut que les organismes de réglementation en connaissent et en comprennent parfaitement le fonctionnement pour être en mesure d'élaborer des lignes directrices et de délivrer les autorisations nécessaires à son utilisation.

«Il existe de nombreuses discussions autour de la question de savoir si l'IA, et en particulier l'IA générative, est quelque chose de radicalement différent qui nécessite que nous changions complètement notre approche pour réglementer son utilisation ou bien si nous pouvons adapter les normes actuelles», explique Mme Ngoy Kubelwa. «Pour étendre l'utilisation de cette technologie, nous devons définir des cadres en collaboration avec les organismes de réglementation.»

L'AIEA soutient l'application potentielle de l'IA dans les centrales nucléaires depuis 2021. Elle a élaboré un rapport sur l'IA et créé par la suite, sous les auspices du Réseau international pour l'innovation à l'appui des centrales nucléaires en exploitation (ISOP), des groupes de travail qui se concentrent sur les aspects réglementaires et techniques du déploiement de l'IA. Les publications à venir sur les applications de l'IA dans le secteur nucléaire et leurs implications en matière de sûreté sou-

Wolfgang Picot est attaché de presse / RP à l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Auparavant, il a exercé différentes activités auprès de l'AIEA, du ministère américain des Affaires étrangères et d'Ars Electronica Linz GmbH. M. Picot est titulaire d'un doctorat en sciences politiques décerné par l'Université de Vienne.

ignent cet engagement. L'AIEA dirige également un projet de recherche coordonné visant à étudier comment l'IA et les technologies innovantes peuvent contribuer à accélérer le déploiement des petits réacteurs modulaires, et elle envisage la création de centres collaboratifs dédiés à l'IA.

Pour Mme Ngoy Kubelwa, le sujet n'est pas seulement technique. «L'utilisation de l'IA et d'autres technologies émergentes sera le signe que le secteur nucléaire suit de très près les nouveaux développements», déclare-t-elle. «Il est essentiel de nous engager sur ce terrain de manière proactive pour susciter l'intérêt de la jeune génération, qui est crucial pour assurer l'avenir de la production d'énergie d'origine nucléaire.»

Publié initialement dans le Bulletin de l'Agence internationale de l'énergie atomique de septembre 2023, vol. 64-3, sous le titre «Renforcer la production d'énergie nucléaire grâce à l'intelligence artificielle», cet article est repris ici sous une forme légèrement adaptée.

«Wädenswil doit rayonner!»

L'énergie nucléaire est un sujet controversé, ce qui en fait un thème de carnaval très apprécié. À preuve les costumes de tour de refroidissement et les lanternes apocalyptiques que l'on peut voir sur la place de la cathédrale de Bâle, ainsi que les nombreuses «Schnitzelbänke» (chansons satiriques en vers) que l'on peut entendre à ce propos dans la Cité rhénane. En la matière, les cliques et les Guggenmusik font preuve de plus ou moins de créativité, généralement au détriment de l'atome, sauf dans les régions d'implantation.

S'agissant de la perle que nous venons de découvrir, nous ne saurions taxer ses auteurs de manque de créativité. La question est plutôt de savoir de quel bord ils sont: s'agit-il vraiment d'adversaires invétérés de l'atome?

Cette perle, c'est www.akwaedi.ch, «le site web de Wädenswil, Cité de l'énergie nucléaire», sur lequel on peut lire: «Nous sommes un mouvement citoyen pacifique qui veut garantir l'approvisionnement énergétique de Wädenswil grâce au nucléaire, une énergie naturelle issue de la terre. Les centrales nucléaires ont notamment l'avantage d'être dotées de tours de refroidissement imposantes et pittoresques qui feront à nouveau rayonner la Cité de l'énergie qu'est Wädenswil.» Suit une invitation à aborder le sujet avec les politiciennes et politiciens locaux, puis un appel «à porter autour du cou un crayon combustible en plus de la plaquette du carnaval». Le fait que l'expression «plaquette du carnaval» est en gras montre clairement, si l'on ne l'avait pas compris plus tôt, que le contenu du site web est de nature carnavalesque.

Néanmoins, l'impression d'authenticité est encore renforcée par des déclarations de prétendus partisans de l'atome. Voici notre préférée: «Les centrales nucléaires sont bonnes pour la nature. L'uranium provient du sol et est donc à 100% biologique». Pour faire bonne mesure, les autrices ou auteurs (leur identité n'est pas claire) se sont donné la peine de dresser le portrait de sept «sites idéaux pour la construction de belles centrales nucléaires», en décrivant en outre l'utilisation qui serait faite de l'électricité produite, par exemple: «principale source d'énergie du terrain de beach-volley et du McDonald – pour des matchs chauds et des hamburgers encore plus chauds». Il est aussi question de sites de

«stockage final», par exemple sous la station de lavage de voitures de Wädenswil, d'où «même l'auto la plus sale ressort chargée d'énergie». Quant aux données de production, bien que présentées dans un format inhabituel (entre 2 et 5 «GWh/jour»), elles se situent dans une fourchette plutôt réaliste pour de petits réacteurs tels que ceux qui pourraient entrer en ligne de compte dans pareil environnement urbain. Les dates de lancement des travaux (11 novembre 2024, soit le début du carnaval de cette année) et de mise en service («pile pour le carnaval 2025») lèvent les derniers doutes quant au caractère humoristique du projet. Plusieurs photomontages de tours de refroidissement et de bâtiments réacteur implantés au beau milieu de Wädenswil montrent à quel point les sites hypothétiques sont urbains.

Les auteurs n'ont pas ménagé leurs efforts pour arriver à ce résultat – les photomontages et le reste du site en témoignent. Même si l'idée de la centrale nucléaire comme «victime» de l'humour potache du carnaval n'a rien de nouveau, les recherches effectuées, la créativité et le souci de détail méritent d'être salués. Pour notre part, en tant qu'incorrigibles supporters de l'atome, nous ne serions pas les premiers à crier au scandale si cette blague devenait réalité, mais c'est une autre histoire. (M.Re./D.B. d'après le site www.akwaedi.ch, consulté le 8 février 2024)



Ochsenschür: l'un des sept sites pressentis pour la construction de belles centrales atomiques dans la Cité de l'énergie nucléaire Wädenswil. (Photo: akwaedi.ch)

«Comprendre le nucléaire» est en ligne

Le site web du Forum nucléaire suisse s'enrichit d'un nouveau volet consacré à la diffusion de connaissances de base sur l'énergie nucléaire.

Le volet «Comprendre le nucléaire» de notre site web constitue une source d'information de base sur tout ce qui touche à l'énergie nucléaire. Facile à comprendre et complet, il s'adresse aux profanes ainsi qu'aux autres personnes intéressées. Il comble ainsi un vide, puisque de telles informations n'étaient jusqu'à présent pas disponibles sur le site du Forum.

Le volet «Comprendre le nucléaire» s'articule autour de six grands thèmes: l'électricité issue du nucléaire, l'ura-

nium et la radioactivité, la sécurité, l'environnement et le climat, la gestion des déchets radioactifs, l'énergie nucléaire dans le système électrique suisse. Chacun de ces thèmes est subdivisé en deux à trois sections.

Pour accéder à ce nouveau volet, il vous suffit, lorsque vous vous trouvez sur notre site web (www.forumnucleaire.ch), de cliquer sur «Comprendre le nucléaire», en haut à droite. Vous pouvez aussi taper directement www.comprendre-le-nucleaire.ch dans votre navigateur. (A.D./D.B.)

Comprendre le nucléaire

Grâce à notre nouvelle rubrique «Comprendre le nucléaire», l'énergie nucléaire n'aura plus aucun secret pour vous. Celle-ci propose des informations claires et accessibles qui permettront aux personnes curieuses ou intéressées d'entrer dans l'univers du nucléaire. Venez découvrir les principes fondamentaux qui se cachent derrière cette source d'énergie.

- L'électricité issue du nucléaire**
Une centrale nucléaire produit de l'électricité à partir de la chaleur. Il s'agit d'une centrale dite «thermique», au même titre que les centrales à charbon et à gaz. Toutefois, dans les centrales nucléaires, la chaleur n'est pas le résultat de la combustion de substances fossiles mais de la fission des noyaux atomiques.
- L'uranium et la radioactivité**
Découvrez des informations passionnantes sur l'uranium et la radioactivité. Ces ressources naturelles nous permettent non seulement de bénéficier d'une énergie propre et efficace mais elles offrent aussi de nouvelles possibilités dans les secteurs médicaux et scientifiques.
- Sécurité**
Dans une centrale nucléaire, la sécurité prime sur la rentabilité. Il s'agit là non seulement d'un principe légal mais aussi d'une volonté de la part des exploitants. Car si les installations ne satisfont plus les normes de sécurité les plus élevées, elles doivent être arrêtées.
- Environnement et climat**
Dans un monde en profonde mutation et mis au défi des changements climatiques, les débats sur les sources d'énergie durables ne cessent de prendre de l'ampleur. La population mondiale a fortement augmenté entre 1900 et 2022, et le besoin en énergie primaire a été plus que multiplié par dix.
- Gestion des déchets radioactifs**
La Suisse génère des déchets radioactifs dans le cadre de l'exploitation des centrales nucléaires ainsi que dans les secteurs de la médecine, de l'industrie et de la recherche. Des déchets radioactifs sont produits également lors du démantèlement. Ces déchets sont, dans un premier temps, placés dans un dépôt intermédiaire, puis ils seront acheminés dans un dépôt en couches géologiques profondes en vue de leur stockage à long terme, dans le sol.
- L'énergie nucléaire dans le système électrique suisse**
L'approvisionnement énergétique en Suisse se distingue par son mix électrique diversifié, dominé par la combinaison hydraulique-nucléaire. L'énergie nucléaire se caractérise par sa productivité élevée, par un approvisionnement électrique continu, par la longue durée de vie de ses installations, et par le coût de revient le plus bas de l'ensemble des technologies électriques actuelles de la Suisse. La rentabilité de l'énergie nucléaire est rendue

C'est ainsi que se présente le nouveau volet de notre site web. (Photo: Forum nucléaire suisse)

La France et la Suisse, unies par leurs lignes électriques

Lors d'une manifestation organisée par l'ambassade de France en Suisse et le Forum nucléaire suisse le 7 mars 2024, à Berne, l'ambassadrice Marion Paradas, Laurent Kueny – directeur de l'énergie au sein de la Direction générale de l'Énergie et du Climat –, et Marie-Agnès Berche d'Électricité de France (EDF) ont abordé les relations franco-suisse dans le domaine de l'énergie nucléaire ainsi que l'importance de la technologie dans les deux pays, devant un parterre de 90 invités issus de l'économie et de la politique.

Marion Paradas, ambassadrice de France en Suisse, estime que, tant en France qu'en Suisse, l'énergie nucléaire contribue de manière importante à l'approvisionnement énergétique. Elle estime même qu'elle est un lien qui existe physiquement entre les deux pays, à travers les échanges sur le réseau électrique. Pour elle, «[l'énergie nucléaire] doit donc rester une priorité de la coopération franco-suisse». L'ambassadrice a qualifié le courant nucléaire produit en Suisse de «garantie vitale pour la Confédération dans un contexte rempli de défis: i) celui de la souveraineté énergétique alors que la guerre en Ukraine rappelle la fragilité des approvisionnements des énergies fossiles; ii) le défi de la nécessité d'un mix énergétique sans émissions de CO₂ pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050; iii) le défi d'assurer la couverture en besoin électrique pour la Suisse alors que le pays continue de croître au plan économique comme au plan démographique».

L'énergie nucléaire, une aubaine

La France estime qu'elle a la «chance» de disposer de l'énergie nucléaire, a déclaré Madame Paradas pour reprendre les mots du Président de la République Emmanuel Macron prononcés lors d'une visite d'État en Suisse. Après une année 2022 plus difficile, le parc nucléaire français a «regagné en puissance» l'an passé, et ses pays voisins en ont également bénéficié. Grâce à ses 56 réacteurs, la France est redevenue la plus grosse exportatrice nette d'électricité d'Europe en 2023. Parallèlement, EDF continue d'entretenir ses centrales tout en améliorant la sécurité.

Onze lignes électriques transfrontalières permettent à la France d'approvisionner la Suisse en une électricité produite sans générer d'émissions de gaz à effet de serre et de manière constante. La France exporte vers la Suisse l'équivalent de cinq fois la consomma-

tion totale annuelle d'électricité du canton de Genève. «L'énergie nucléaire est donc au cœur de nos relations», estime Madame Paradas. «La France souhaite dès lors partager son mouvement de relance du nucléaire civil par des coopérations institutionnelles, scientifiques, universitaires et industrielles couvrant un large spectre d'activités. Face aux défis climatiques, économiques et de souveraineté, la France et la Suisse ont une chance, celle de l'énergie nucléaire, et d'immenses perspectives de coopération bilatérale.»

Contribuer à la conclusion d'un accord sur l'électricité avec l'UE

Hans-Ulrich Bigler, président du Forum nucléaire suisse, a fait référence à la collaboration en place depuis 1970 entre la Suisse et la France dans le domaine de l'énergie nucléaire. À cette époque, les centrales nucléaires de Fessenheim, de Cattenom et du Bugey avaient été construites avec le soutien financier de la Suisse. «Cette collaboration suisse a contribué, et contribue encore aujourd'hui, de manière importante à un approvisionnement énergétique sûr et respectueux du climat en Europe», a rappelé M. Bigler. Toutefois, la Suisse et la France ont pris des chemins très différents dans le domaine du nucléaire. Tandis que le président Macron a annoncé des projets de développement massif de ce dernier, qu'il a même qualifiés de «renaissance du nucléaire», la Suisse devrait abandonner ce mode de production d'électricité. Ainsi, pour M. Bigler, la priorité actuelle en Suisse n'est pas de construire de nouveaux réacteurs, mais de prolonger la durée de fonctionnement des réacteurs existants. Toutefois, cela ne doit en aucun cas représenter un obstacle à la mise en place d'une coopération franco-suisse dans ce domaine. Le président du Forum nucléaire suisse entrevoit des possibilités d'approfondir la collaboration dans les domaines des chaînes d'approvisionnement, des contrats à long terme, et de la formation en génie nucléaire. →

Aujourd'hui, la Suisse ne fait pas partie du marché intérieur européen. Un accord sur l'électricité avec l'UE l'aiderait à garantir son approvisionnement électrique. M. Bigler s'est dit «intimement convaincu que le fait de développer la collaboration franco-suisse contribuera à la conclusion d'un accord sur l'électricité avec l'Union européenne».

«Une relance inédite du nucléaire»

Le conférencier principal de la manifestation était Laurent Kueny, directeur de l'énergie au sein de la Direction générale de l'Énergie et du Climat. Il a présenté un exposé sur le thème «Répondre au triple enjeu de souveraineté, de compétitivité et d'accélération de la lutte contre le changement climatique». Selon lui, le choix qui a été fait par la France, il y a plusieurs décennies, de l'indépendance électrique et du nucléaire, lui permet aujourd'hui de bénéficier d'une avance en termes de décarbonation et de compétitivité de son électricité. L'électricité représente aujourd'hui un peu plus d'un quart de

la consommation d'énergie finale en France. Elle est très majoritairement décarbonée grâce à la production nucléaire (environ 65% en 2022) et renouvelable (environ 25% en 2022). Cependant, comme dans la plupart des grands pays industrialisés, le bouquet énergétique de la France reste encore dominé par les énergies fossiles, avec 37% de pétrole et 21% de gaz naturel dans la consommation d'énergie finale. Afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050 et de sortir des énergies fossiles, la France entreprend plusieurs actions:

- Réduire de 40 à 50% sa consommation d'énergie, grâce aux actions de sobriété et d'efficacité énergétique,
- Accélérer le développement de l'ensemble des énergies renouvelables: biométhane, bioliquides, biomasse, géothermie, électricité renouvelable, etc.
- Procéder à une électrification massive de ses usages et à un développement des capacités de production électrique décarbonée, les besoins en électricité devant augmenter de 55% d'ici 2050.



Une délégation française s'est rendue à Berne pour aborder l'importance de l'énergie nucléaire et échanger avec des invités issus de l'économie et de la politique (de gauche à droite): Laurent Kueny, directeur de l'énergie au sein de la Direction générale de l'Énergie et du Climat, Marion Paradas, ambassadrice de France en Suisse, Marie-Agnès Berche, responsable du Développement du nouveau nucléaire à l'international chez Électricité de France (EDF), et Hans-Ulrich Bigler, président du Forum nucléaire suisse. (Photo: Forum nucléaire suisse)



90 invités de l'économie, de la science et de la politique ont participé à la conférence à Berne, dont le conseiller national PLR Christian Wasserfallen. (Photo: Forum nucléaire suisse)

D'après M. Kueny, «Ces objectifs conduisent la France à une relance inédite du nucléaire, qui passe par la prolongation du parc existant et le lancement d'un nouveau programme de réacteurs nucléaires».

Le rôle d'EDF en France et dans le monde

En conclusion de la manifestation, Marie-Agnès Berche, responsable du Développement du nouveau nucléaire à l'international chez Électricité de France, a présenté les projets français de constructions nucléaires. Ainsi, six EPR seront mis en service au cours de la prochaine décennie, et des études ont été lancées sur la manière de construire 13 GW d'énergie nucléaire supplémentaires, soit l'équivalent de 8 EPR2. Par ailleurs, EDF participe à de nombreux projets à des stades plus ou moins avancés dans plusieurs pays. D'après Madame Berche, les deux EPR en construction sur le site britannique de Hin-

kley Point sont actuellement le plus gros chantier au monde. Outre la conception de 1600 MW, EDF propose également l'EPR1200w ainsi que le petit réacteur modulaire Nuward, d'une puissance de 340 MW.

L'intérêt mondial suscité à nouveau par l'énergie nucléaire est une grande chance pour les pays européens et leur industrie nucléaire. Marie-Agnès Berche entrevoit l'émergence d'un véritable marché pour les gros réacteurs ainsi qu'un intérêt croissant pour les SMR au cours de la prochaine décennie. EDF entend contribuer à la réussite d'un programme nucléaire européen en développant une stratégie sur les technologies et les industries européennes. L'entreprise présente des avantages significatifs, notamment en sa qualité d'exploitant européen souverain et d'unique constructeur de réacteurs de la troisième génération d'Europe. (M.R./C.B.)

Assemblée générale du Forum nucléaire suisse

Le mercredi 22 mai 2024 au Circle Convention Centre de l'aéroport de Zurich, avec Rafael Mariano Grossi, directeur de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)



Photo: AIEA / Dean Calma

Cours de perfectionnement du Forum nucléaire suisse

Le jeudi 28 novembre 2024 au Trafo de Baden «Les développements actuels au sein de l'industrie nucléaire internationale – opportunités et risques pour les installations nucléaires suisses»



Photo: Le Forum nucléaire suisse

Nouvel épisode du podcast «NucTalk»

Dans le 31^e épisode de notre podcast NucTalk, nous donnons la parole à trois membres du comité de la section germanophone WePlanet Tous nos podcasts sont disponibles (en allemand uniquement) à la page www.nuklearforum.ch/de/podcasts

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

Apéritifs de la SOSIN 2024

Les prochains apéritifs de la SOSIN sera organisé les jeudis 4 juillet, 5 septembre et 14 novembre.

www.kernfachleute.ch



Photo: SOSIN / Max Brugger

16^e séminaire de base de la SOSIN

La Société suisse des ingénieurs nucléaires (SOSIN) prévoit d'organiser du 30 septembre au 3 octobre 2024 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



Photo: SOSIN

Impressum

Rédaction:

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

Traduction:

Claire Baechel (C.B.); Dominique Berthet (D.B.);
Aude Thalmann (A.T.)

Éditeurs:

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 2024 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.

