

## ➤ Nouvelles mesures de la masse des neutrinos par l'expérience Katrin

La quête de la masse du neutrino a franchi une nouvelle étape avec l'expérience Katrin qui a permis d'en fixer une limite maximale. Estimée bien plus abondants dans l'univers que les atomes, la détermination de la masse du neutrino est cruciale pour l'évaluation de la matière noire et de l'évolution de l'univers.

### Genèse d'une particule fantôme

Rappelons la genèse de la découverte théorique des neutrinos en 1930 par Wolfgang Pauli qui pour sauver la conservation de l'énergie dans la désintégration  $\beta$  imagina l'existence d'une particule qui n'avait jamais encore été détectée. Postuler l'existence d'une nouvelle particule à partir de considérations théoriques coïncidait avec l'hypothèse du positron d'antimatière que Paul Dirac avait déduit de son équation quelques années auparavant. Pour sauver le tout nouvel édifice de la physique des particules, les physiciens se rallièrent à la proposition de Pauli. En 1933 Enrico Fermi élaborait une théorie de la désintégration  $\beta$  en intégrant la nouvelle particule qu'il baptisa neutrino (petit neutron). La théorie décrivait la désintégration  $\beta$  comme la transformation d'un neutron en proton accompagné par la création d'un électron et d'un antineutrino. Les caractéristiques de ce dernier semblaient plutôt étranges (au sens courant) car cette particule neutre semblait présenter une masse nulle ou très faible et une interaction inexistante avec la matière courante. C'était donc d'emblée une particule élémentaire quasiment indétectable. Détecter les neutrinos était dans les années 30 un challenge passionnant pour les physiciens.

### Une quête de la masse difficile

La détection de cette particule devait donc s'avérer très ardue. En 1956, soit près de 20 ans après son existence théorique, deux physiciens, Reines et Cowan, proposèrent l'idée d'utiliser la transformation inverse, à partir de l'interaction d'un antineutrino et d'un proton, produisant un positron (particule d'antimatière équivalente de l'électron mais de charge positive) et un neutron. Le positron ainsi créé rencontrerait rapidement un électron et l'annihilation de ces deux particules produirait deux photons gamma  $\gamma$  aisément détectables.

Ils utilisèrent le réacteur nucléaire de Savannah River qui devait, selon la théorie, émettre un flux intense de neutrinos. Ces neutrinos étaient supposés interagir avec des protons dans un réservoir d'eau, créant des neutrons et des positrons, chaque positron engendrant par la suite une paire de photons  $\gamma$  lors de son annihilation avec un électron. Les rayons gamma auraient été détectés en plaçant un matériau scintillateur dans un réservoir d'eau.

Cette première tentative fut non concluante et Cowan et Reines eurent l'idée de faire interagir les neutrons avec du chlorure de cadmium dissous dans le réservoir, occasionnant à leur tour l'émission de photons  $\gamma$  mais décalés de  $5 \mu\text{s}$  des photons  $\gamma$  provenant des neutrinos. Pour éviter les phénomènes parasites, l'eau était parfaitement purifiée et l'expérience fut montée à 12 m sous terre pour ne pas être perturbée par les rayons cosmiques.

Après des mois de collecte de données, la présence de trois neutrinos par heure fut démontrée dans le système de détection. Par la suite les détections de neutrinos se sont poursuivies, utilisant des réservoirs enterrés contenant d'énormes quantités d'eau. La détection des neutrinos

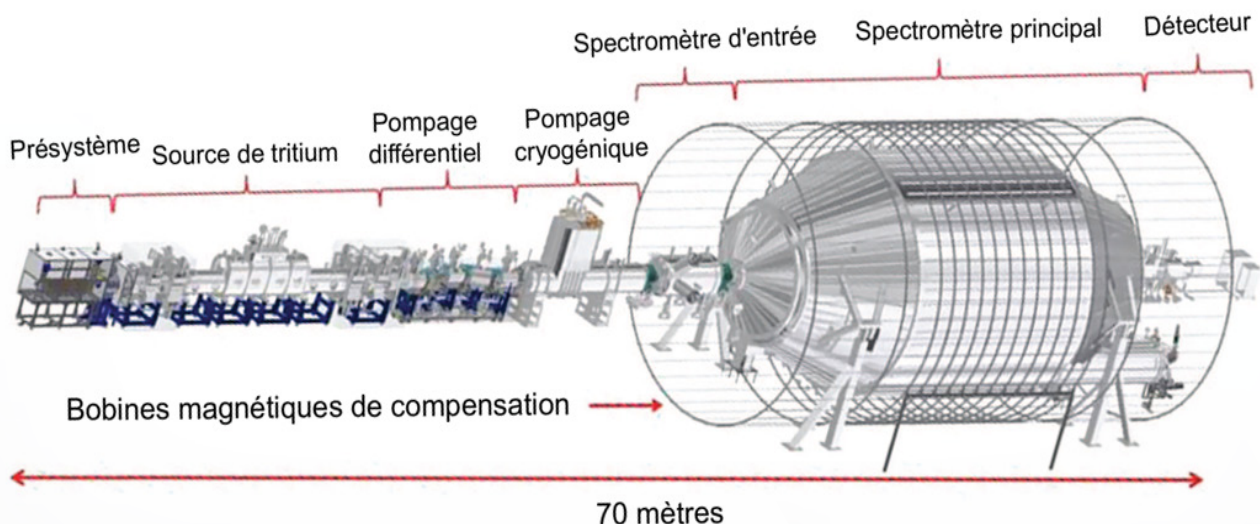


Figure 1 : Le détecteur Katrin. Source KATRIN RT.

par photomultiplicateur se faisait par l'utilisation de l'effet Tcherenkov qui est l'émission de lumière par une particule qui se déplace plus vite que la lumière dans un milieu, en l'occurrence ici l'eau, phénomène analogue au bang des avions supersoniques.

Depuis ces premières détections trois types de neutrinos ou « saveurs » de neutrino, électronique, muonique et tauique, ont été découverts. Ils étaient caractérisés par une propriété étonnante : ils pouvaient en oscillant se convertir les uns dans les autres. Autre conséquence, les oscillations supposaient l'existence de masses qui n'étaient pas prévues par le modèle standard de la physique des particules. La détermination de cette masse représentait donc un défi pour le modèle standard avec des pistes pour la validité des théories qui ont pour objectif de dépasser les théories actuelles.

## L'expérience Katrin

Plusieurs vagues de mesures de masse ont été effectuées en utilisant l'effet cinématique des désintégrations de type  $\beta$  à deux corps qui donnent naissance aux neutrinos. Mais les différentes campagnes furent bien souvent éloignées de l'objectif et c'est dans ce contexte que l'expérience Katrin (Karlsruhe tritium neutrino), à l'institut de technologie de Karlsruhe, en Allemagne, et basée sur une désintégration du tritium, a été lancée. C'est une expérience extrêmement délicate qui a demandé près de 20 ans pour sa conception et sa réalisation. Le dispositif (voir figure 1) est construit autour d'un spectromètre de 200 tonnes, 10 m de haut et 70 m de long. Il a demandé le développement d'outils très sophistiqués tels que la stabilité des lignes de champs électriques et magnétiques du spectromètre ou pour l'épaisseur de la source de tritium ou enfin pour la finesse du capteur électronique final. Le principe est d'utiliser la désintégration radioactive bêta du tritium qui émet un électron et un neutrino électronique en se transformant en hélium 3. La détermination de la masse s'effectue par la mesure du spectre des électrons et elle est comparée à une distribution théorique paramétrée par le carré de la masse du neutrino. Cela permet aux expérimentateurs d'obtenir une valeur de masse maximale avec un degré de certitude de 90 %. En 2019 les physiciens des particules ont réussi à établir une première borne supérieure de 1,1 électronvolt, qu'ils ont améliorée et abaissée à 0,8 électronvolt en 2022. Les derniers résultats publiés cette année ont abaissé la valeur à 0,45 électronvolt. Pour obtenir cette valeur le bruit de fond a été divisé par 2 et le nombre de données a été multiplié par 6 passant de 361 spectres en 2022 à 1757 spectres, en ayant réduit les incertitudes de mesure. Il est prévu d'effectuer à partir de la fin de l'année plus de 1000 jours de prises de mesure afin d'atteindre un palier de 0,3 électronvolt.

## Conclusion provisoire

Les neutrinos sont donc massifs et ces mesures de masse confirment l'interrogation qui a débuté dès l'hypothèse de leur existence. Le modèle standard avait été élaboré *a priori* avec des neutrinos sans masse ce qui semblait justifié par les résultats expérimentaux de l'époque. Mais le modèle standard n'était pas complet et ce défaut a été corrigé. Mais il a demandé l'ajout de nombreux paramètres libres qui semblent nécessiter l'existence d'autres objets de masse élevée non détectés aujourd'hui. Une amélioration de la valeur de la masse des neutrinos complèterait, une fois de plus, le modèle standard de la physique des particules et mènerait probablement à une meilleure compréhension des interactions fondamentales de la matière. Au-delà de la physique des particules, les neutrinos pourraient être aussi fondamentaux pour l'évaluation de la dynamique de l'expansion de l'Univers du fait de leur grand nombre. La détermination de leur masse est donc au cœur de grandes questions en cosmologie. ■

**Marc Leconte**, membre émérite SEE

## > Inauguration du plus important supercalculateur classifié dédié à l'IA en Europe

**L'armée a inauguré en septembre le nouveau supercalculateur classifié, c'est-à-dire soumis aux règles du secret défense, dédié à l'intelligence artificielle (figure 1). Il sera exploité dans la forteresse du Mont Valérien (92) par l'AMIAD (Agence ministérielle pour l'intelligence artificielle de défense).**

Le système est le plus important d'Europe et le troisième plus grand au monde pour permettre à la France de traiter souverainement ses données (source HPE) :

- 1 024 puces dernière génération d'origine NVIDIA, adaptées aux technologies d'IA ;
- Isolé de l'Internet ;
- Opéré uniquement par des personnels habilités secret-défense.

Il permet notamment l'entraînement des LLM<sup>1</sup> IA (les *foundation models*) nécessitant de grandes quantités de données et d'importantes capacités de calcul.

Ce supercalculateur (ASGARD) a été assemblé à Kutna Hora (près de Prague) par une usine d'HPE suite à un contrat en octobre 2024 avec HPE et Orange. Il remplace les 200 puces

1 Large Language Model

- d'ancienne génération qui étaient 3 à 15 fois moins puissantes que ces puces de dernière génération.

Des informations plus précises sur la puissance totale en flops (mesure de puissance de calcul) ne sont pas disponibles publiquement, ce qui n'est pas étonnant pour un système classifié. Selon HPE c'est un système « *exascale* » soit de l'ordre de l'exaflop (1000 petaflops <sup>2</sup>). Les systèmes « *exascale* » sont encore rares en Europe comme le montre la mise en place par Eviden du supercalculateur Jupiter <sup>3</sup> qui atteint tout juste l'exaflop pour le centre de recherche de Jülich en Allemagne.

Il faut souligner que les centres de données, qui sont utilisés pour tout type d'application, constituent des systèmes encore plus puissants. Par exemple, celui que Mistral construit en Essonne va comporter 18 000 processeurs Blackwell de Nvidia de 20/40 petaflops chacun, soit au total de 360 à 720 exaflops. Les centres de données américains ou chinois sont encore plus gros (jusqu'à 1 million de m<sup>2</sup>, avec plus d'un million de processeurs).

### Des besoins pour l'armée

Comme le montre le conflit entre l'Ukraine et la Russie, l'IA est déjà très présente et révolutionne la manière de faire la

guerre qui est aussi aujourd'hui une 'dialectique' des algorithmes. La supériorité opérationnelle passe désormais par la supériorité technologique. Pour cette raison, le ministre des Armées a lancé, en janvier 2024, la stratégie ministérielle pour l'IA de défense. L'objectif est de positionner la France parmi les trois premières puissances mondiales dans la course à l'IA de défense. 600 millions d'euros ont été prévus par la loi de programmation militaire dont 200 millions d'euros en 2024 et 2025.

L'armée compte couvrir l'ensemble des usages de l'IA de défense : l'IA embarquée, l'IA des opérations et l'IA organique. Le système permet d'entraîner les systèmes IA avec les données spécifiques, par exemple pour le traitement du signal radar ou acoustique. Il servira à « *renforcer la capacité de nos fameuses oreilles d'or, à écouter, dissocier, reconnaître, discerner les sous-marins en mer pour gagner la guerre acoustique indispensable à la permanence de notre dissuasion nucléaire* ». Ce système sera au cœur de la création de la première unité militaire robotique de combat, dotée d'une IA collective dans le cadre du projet Pendragon. Le supercalculateur permettra d'accélérer les travaux autour de la simulation.

### Un apport stratégique pour la France

La France renforce ainsi son indépendance stratégique. Il est en effet primordial de réduire la dépendance à des infrastructures étrangères, ou à des clouds non sécurisés. Cependant, si la France (Eviden, Orange) est capable de construire ces

2 Petaflops: un million de milliards de flops soit 10 puissance 15.

3 [https://www.theregister.com/2025/06/10/jupiter\\_europes\\_top\\_super](https://www.theregister.com/2025/06/10/jupiter_europes_top_super)



Figure 1 : Inauguration par le ministre des Armées le 4 septembre (source : Defense.gouv).

supercalculateurs, elle dépend du fournisseur de processeur américain Nvidia pour les composants stratégiques.

La France renforce sa capacité militaire de mise en place des algorithmes les plus efficaces. Mais cela dépendra des données d'entraînement disponibles et de la maîtrise de la France sur la qualité et la confidentialité des données. La réussite du projet dépendra aussi de la mise en place des compétences nécessaires pour gérer tous les développements logiciels associés.

La France bénéficiera ainsi d'un avantage politique et diplomatique, renforçant son poids dans les forums et les négociations de défense.

Enfin, cette initiative participe à la mise en place d'un écosystème français IA performant avec le développement des talents humains, indispensable au développement économique de la France et tirant parti des synergies civil/militaire. ■

**Roberto Kung**, membre senior SEE

## ➤ Production hydro-électrique

**Un accord qui ouvre la voie à une relance des investissements en France**

### Un contentieux durable qui bloque le développement de l'hydro-électricité en France

Depuis plus de 10 ans, les concessions hydro-électriques sont au cœur d'un litige entre la Commission européenne et le gouvernement français. En application de la directive européenne dite « Concessions » de février 2014, les États membres sont en effet tenus d'assurer une mise en concurrence des contrats de concession publics arrivant à terme.

Les barrages et les centrales hydro-électriques sont soumis à deux régimes différents selon leur puissance :

- Concession de service public, pour les installations de plus de 4,5 MW : l'État est propriétaire et confie l'exploitation à un opérateur ;
- Autorisation administrative, pour les plus petites installations : l'installation appartient à un propriétaire privé (particulier, entreprise) qui doit détenir une autorisation environnementale délivrée par le préfet.

En France, les 340 installations hydro-électriques de plus de 4,5 MW sont donc soumises au régime de concession (généralement d'une durée de 75 ans), les plus petites relevant du régime d'autorisation administrative. La plupart

des concessions hydro-électriques sont gérées par des concessionnaires, dont les trois principaux sont : EDF (70 % de la production hydro-électrique), la Compagnie nationale du Rhône (25 % de la production) et la Société hydro-électrique du Midi (moins de 5 %).

Conséquences de plus de dix années de conflit : ainsi que nous l'évoquions dans notre dossier consacré en 2024 à l'hydro-électricité, le lancement des travaux pour augmenter la puissance des ouvrages ou pour ajouter des moyens de pompage sur des sites existants est retardé. Dans l'incertitude du renouvellement de leur concession, les opérateurs ont arrêté les investissements, fragilisant le parc hydro-électrique le plus important de l'Union européenne (UE). Cette paralysie entrave l'atteinte des objectifs de baisse des énergies fossiles de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

### L'accord de principe annoncé le 28 août 2025

Un accord de principe entre la France et la Commission européenne sur le régime de concessions hydro-électriques a été annoncé par le Premier ministre le 28 août 2025. Il prévoit notamment :

- Le passage d'un régime de concession à un régime d'autorisation pour l'exploitation de l'énergie hydraulique ;
- La possibilité de maintenir les exploitants en place, indispensable pour garantir la continuité de l'exploitation des ouvrages ;
- En contrepartie à cette non-remise en concurrence, la mise par EDF à la disposition des autres énergéticiens de « six gigawatts de capacités hydro-électriques », soit un tiers de la puissance de ses barrages, en vue d'une revente aux consommateurs finaux. « Ces capacités virtuelles seraient mises en vente sous le contrôle de la Commission de régulation de l'énergie et via des enchères concurrentielles », précise le gouvernement.

Pour être appliqué, cet accord devra faire l'objet d'une prochaine proposition de loi que l'Assemblée Nationale devrait adopter, même si certains, à gauche de l'échiquier politique, y voient un risque de privatisation partielle des moyens de production ou le spectre d'un « Arenh Hydro ».

### Et maintenant, place à la relance de programmes d'équipement hydraulique

Le manque à gagner éventuel d'EDF sur une partie de sa production devrait être compensé par une augmentation de ses capacités hydro-électriques. Le PDG d'EDF, Bernard Fontana, a déclaré au Parlement vouloir augmenter de ●●●



Figure 1 : Le barrage de Monnès, formant le réservoir supérieur de la centrale de pompage-turbinage de Montézic (Aveyron), mise en service en 1982.

« 20 % », soit 4 GW, la puissance hydraulique du groupe en France. Devant les élus du personnel, il a ensuite indiqué pouvoir consacrer « 4 à 4,5 milliards d'euros » à la modernisation des centrales hydro-électriques.

Cette hausse de puissance devrait être échelonnée en deux étapes, avec 2 GW d'ici 2035, et 2 GW après 2035.

Pour y parvenir, EDF compte d'abord sur la modernisation de plusieurs centrales existantes, se traduisant par une augmentation de leur capacité de production de l'ordre de 10 %. Face aux besoins de plus en plus importants en stockage d'énergie, EDF travaille également au déploiement de nouvelles STEP<sup>4</sup>. Ces dernières devraient représenter 1500 MW, sur les 2000 MW de nouvelles capacités prévues d'ici 2035. À Saut Mortier, des travaux vont bientôt démarrer pour y installer une turbine-pompe de 18 MW. Cette nouvelle pompe va faire du site, composé des retenues des bassins de Vouglans, Saut-Mortier et Coiselet, la première STEP à trois bassins. Mise en service prévue : 2030.

Parmi les projets dans les cartons, l'un des plus attendus est le gigantesque chantier de Montézic 2 (figure 1), qui devrait faire passer la puissance totale de la STEP de Montézic de 920 MW à 1286 MW. ■

**Jacques Horvilleur**, membre émérite SEE

4 STEP : Stations de transfert d'énergie par pompage

## Traitement des déchets de fusion

**Depuis des décennies, la fusion<sup>1</sup> suscite un immense espoir : reproduire sur Terre l'énergie qui fait briller le Soleil et les étoiles.**

Contrairement à la fission, qui repose sur la division d'atomes lourds comme l'uranium ou le plutonium, la fusion consiste à unir deux noyaux légers, comme le deutérium et le tritium, deux isotopes de l'hydrogène. Cette réaction produit un noyau d'hélium-4, un gaz inerte, et libère des neutrons emportant avec eux une grande partie de l'énergie émise dans la réaction. Sur le papier, il est difficile de ne pas être séduit : à masse égale, la fusion libère quatre fois plus d'énergie que la fission et des millions de fois plus que la combustion des hydrocarbures, sans l'inconvénient de produire des déchets radioactifs<sup>2</sup> à haute activité et à vie longue ou d'émettre des gaz à effet de serre et des particules fines. Portée par cette promesse, la recherche

1 La réaction de fusion la plus utilisée est la suivante :  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} (3,5 \text{ MeV}) + n (14 \text{ MeV})$

2 Définition d'un déchet radioactif : « Toute matériau qui contient ou est contaminé par des radionucléides à des concentrations ou niveaux d'activité supérieurs aux valeurs définies par les autorités compétentes de réglementation et pour lequel aucune utilisation n'est prévue. » AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique).

mondiale s'est lancée dans des projets d'une ampleur inédite tels que des tokamaks géants comme ITER <sup>3</sup> ou des installations de confinement inertiel telles que le NIF <sup>4</sup> aux USA ou le laser Mégajoule <sup>5</sup> en France. Mais derrière cette vision presque parfaite se cache une réalité plus complexe. Le chemin vers une fusion maîtrisée et industrialisable n'a jamais été simple, et demeure aujourd'hui encore semé de défis majeurs. L'un d'eux, concerne les déchets radioactifs que produira réellement la fusion. Étudier leur nature, leur niveau de radioactivité et leur durée de vie est essentiel pour évaluer l'impact environnemental et la soutenabilité d'une filière industrielle à grande échelle.

## Des déchets radioactifs bien différents de ceux issus de la réaction de fission

La fusion ne génère pas de produits de fission, ces radionucléides à la radioactivité intense et durable qui représentent les déchets radioactifs de l'industrie électronucléaire actuelle et dont la gestion impose un stockage géologique profond.

En revanche, les réactions de fusion engendrent des phénomènes radioactifs, liés d'une part à la présence de tritium et d'autre part de neutrons émis dans la réaction. En effet, ces derniers, très énergétiques (~14 MeV), interagissent avec les matériaux environnants, transformant des noyaux stables en isotopes radioactifs, un processus appelé *activation neutronique*. Le tritium quant à lui est un isotope radioactif de l'hydrogène qui se désintègre par émission bêta de faible énergie, avec une période radioactive de 12,3 ans.

D'après l'ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), l'installation ITER produira environ 5 200 m<sup>3</sup> de déchets radioactifs durant son exploitation, et près de 30 000 m<sup>3</sup> lors de son démantèlement. Plus de 90 % seront des TFA (très faible activité) ou FMA-VC (faible et moyenne activité à vie courte), gérés via les filières d'évacuation existantes <sup>6</sup>.

Dans un réacteur de fusion, le tritium <sup>7</sup> joue un rôle clé. Il sert de combustible dans la réaction de fusion la plus étudiée aujourd'hui, celle qui associe le deutérium au tritium.

Dans un grand nombre de projets, le tritium sera fabriqué et utilisé en continu, ce qui nécessitera un suivi précis. Une partie circulera dans le plasma et pourra être récupérée par les systèmes spécialisés. Une autre pourra interagir avec les matériaux de la machine, notamment ceux exposés directement au plasma, et y diffuser ou s'implanter provoquant dans certains cas des dommages. Enfin, une petite fraction se retrouvera dans les déchets provenant des pièces usées et remplacées, ce qui implique de prévoir des solutions adaptées pour les gérer en toute sûreté. Les résultats les plus récents <sup>8</sup> démontrent qu'une détritiation (élimination du tritium résiduel) efficace permet de reclasser la majorité des matériaux en déchets TFA, après trois ans de refroidissement, évitant ainsi qu'ils restent classés en moyenne activité.

Mais le plus grand enjeu concernant la production de déchets radioactifs est bien l'activation des matériaux de structure soumis aux flux intenses de neutrons énergétiques. En particulier, selon les simulations et les mesures expérimentales conduites dans le cadre des projets de fusion magnétique, les zones les plus exposées sont le « divertor », la première paroi et le « blanket <sup>9</sup> », qui accumulent une radioactivité significative pendant l'exploitation. En effet, le neutron émis, non confiné par les champs magnétiques, s'échappe du plasma et vient frapper les matériaux environnants, les rendant radioactifs. Cette émission neutronique intense constitue la principale source de radioactivité secondaire dans la fusion. Après l'arrêt de l'exploitation, la radioactivité de ces matériaux décroît rapidement : en une centaine d'années, la majorité de ces matériaux atteignent une activité comparable à celle de la croûte terrestre. Mais pour certains noyaux atomiques qui les constituent, il n'en sera pas ainsi. Par exemple, le nickel, métal couramment dans certains aciers, peut devenir radioactif lorsqu'il est exposé à un flux neutronique et conduire à la création d'isotopes radioactifs, principalement le <sup>59</sup>Ni et le <sup>63</sup>Ni, qui ont des périodes radioactives longues, respectivement 7,6 x 10<sup>4</sup> ans et 100,8 ans. S'ils étaient intégrés à la composition des aciers des réacteurs de fusion, ils compliqueraient la gestion, le stockage et le recyclage des matériaux. Ce qui conduit, lorsque cela est possible, à les écarter au profit d'autres éléments. Les calculs menés dans le cas de l'exploitation d'ITER montrent qu'en utilisant des aciers au vanadium au plus proche du plasma, le niveau de radioactivité atteint en fin de vie de l'installation sera dix fois moins important que celui d'une cuve d'un réacteur à fission de type REP (réacteur à eau pressurisée) et deviendra négligeable au bout d'environ 30-40 ans <sup>10</sup>.

3 <https://www.iter.org>

4 <https://lasers.llnl.gov>

5 <https://www-lmj.cea.fr>

6 [https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/Andra-Synthese-2018\\_EN\\_relu\\_HD.pdf](https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/Andra-Synthese-2018_EN_relu_HD.pdf)

7 Le tritium est un isotope de l'hydrogène, légèrement radioactif, qui se désintègre par émission bêta- avec une période radioactive de 12,3 ans et l'énergie de l'électron émis est de 5,7 keV en moyenne.

8 <https://scientific-publications.ukaea.uk/wp-content/uploads/UKAEA-CCFE-CP2334.PDF>

9 <https://www.iter.org/fr/machine-iter>

10 Livre : la fusion thermonucléaire contrôlée, Jean-Louis Bobin, EDP Sciences.

- Actuellement, de gros efforts de recherche <sup>11</sup> portent donc, sur des matériaux capables de résister aux contraintes mécaniques et chimiques d'un réacteur de fusion, tout en limitant au maximum l'activation neutronique induite. Il existe deux grandes manières de procéder : soit substituer certains éléments par d'autres dans des matériaux déjà existants, soit créer de nouveaux alliages en choisissant dès le début des éléments peu activables à long terme, tels le vanadium, le chrome, le titane ou le silicium. A chaque fois l'idée sera de diminuer de manière importante la durée de vie des radio-nucléides créés par activation neutronique.

### Mieux construire pour mieux déconstruire

Mais ces exemples illustrant les progrès récents de la recherche en physique des matériaux pour la fusion ne doivent pas occulter la principale priorité, qui doit rester le choix du design du réacteur et de ses objectifs. Car en effet, étudier et développer de nouveaux aciers ou alliages demande de longues études, potentiellement sur plusieurs décennies et nécessite en amont, une définition claire du concept de réacteur et des priorités stratégiques de court ou long terme. Choisir de réduire les activités de maintenance ou de minimiser la quantité de déchets radioactifs et leur durée de vie, aura un impact majeur sur les études, sur le choix des matériaux et finalement sur le coût global du réacteur. Aujourd'hui, les nouvelles approches de conception des réacteurs nucléaires suivent une logique intégrée, appelée « *design for decommissioning* », qui vise à étudier le démantèlement et le traitement des déchets dès la phase initiale. Le choix des matériaux, leur facilité de séparation, la modularité des structures et la possibilité de recyclage sont désormais considérés comme des paramètres aussi déterminants que la performance neutronique ou thermique et la disponibilité du réacteur.

### Laissons la recherche imaginer la réaction de fusion optimale

La dernière voie étudiée pour diminuer la production de déchets radioactifs, encore au stade quasiment de la recherche fondamentale serait de changer de réaction de fusion. En effet des réactions alternatives comme les réactions D+D ou D+<sup>3</sup>He, bien que techniquement plus exigeantes, pourrait réduire soit la production de neutrons soit leur énergie en voie de sortie et donc la quantité de matériaux activés. Ces scénarios relèvent encore de la recherche fondamentale, mais ils illustrent une ambition plus large : celle d'une fusion véritablement « propre », où la physique du plasma et la

science des matériaux convergent pour rendre la production d'énergie compatible avec les exigences environnementales.

En définitive, la fusion nucléaire ne pourra jamais éliminer totalement les déchets, car aucune activité humaine n'y échappe. En revanche, elle s'inscrit dans une démarche où la durabilité devient une priorité. Concevoir un réacteur de fusion, comme toute installation industrielle d'ailleurs, suppose de réfléchir en amont de toute construction, aux moyens de réduire autant que possible l'usage de matières premières et de limiter l'empreinte environnementale des déchets générés. En cela, la fusion nucléaire représente une avancée majeure dans la quête d'une énergie bas-carbone, abondante et durable. ■

**Emmanuelle Galichet**, Maîtresse de conférences au CNAM

## > Vortex : le projet d'avion spatial de Dassault

**Lors du dernier salon du Bourget le gouvernement par la voix du Ministre des armées, à l'époque Sébastien Lecornu, a signé une convention de soutien d'un démonstrateur spatial polyvalent proposé par Dassault Aviation, appelé Vortex. La signification de Vortex, Véhicule Orbital Réutilisable de Transport et d'Exploration, illustre parfaitement la capacité de ce véhicule orbital destiné à manœuvrer en orbite puis à revenir sur une piste classique. Ce projet représente une alternative aux programmes américains (X-37B), chinois (2 programmes) et indiens.**

### Un véhicule dual

Le Vortex est un véhicule conçu pour être utilisé dans une large gamme de missions tant militaires que civiles. Présenté comme polyvalent, le Vortex pourra être employé pour des applications scientifiques technologiques ou commerciales. Il pourra avoir comme mission le lancement de satellite, le traitement et le retrait de débris satellitaires, le transport de fret et aussi le transport d'équipage dans l'espace. Son versant militaire implique des missions destinées à des essais de technologies avancées, de reconnaissance ou de brouillage.

### Une coopération franco-allemande

Pour le Vortex, Dassault Aviation s'est allié à l'entreprise allemande constructrice des satellites OHB qui apportera ses connaissances du milieu spatial. Alors que les relations avec Airbus se détériorent dans le cadre du SCAF, Dassault s'allie avec OHB qui est le concurrent dans le spatial de Airbus Satellite. Le projet sera également soutenu par le CNES et l'ESA. Vortex permettra à l'avionneur national d'entrer dans le monde spatial en s'intégrant dans le « Newspace ». Ce démonstrateur représente la première

<sup>11</sup> <https://euro-fusion.org/eurofusion/>



Figure 1 : Le Vortex en orbite. Source Dassault.

étape d'une feuille de route pour le développement d'une famille d'avions spatiaux. Dassault Aviation s'appuie sur son expertise industrielle en tant que maître d'œuvre et intégrateur de systèmes aériens complexes. Le projet Vortex doit permettre de valider des technologies critiques indispensables à la maîtrise de vols hypersoniques et de leur rentrée dans l'atmosphère.

### Pour la souveraineté spatiale

L'un des enjeux majeurs de ce programme est la souveraineté européenne, car l'Europe demeure encore très dépendante des Etats-Unis, en matière d'accès à l'espace et d'utilisation des orbites basses. L'ESA envisage d'utiliser le Vortex comme un banc d'essai dans un premier temps pour tester plusieurs technologies avant de l'utiliser dans sa version cargo en complément du « Space Rider » de l'ESA que réalise Thales Alenia Space. Ce dernier présente des performances bien inférieures en termes de capacité d'emport de 600 kg contre 4 tonnes pour le Vortex.

### Caractéristiques techniques et phases de développement

L'avion se présente sous la forme d'un petit avion doté d'une forme aérodynamique avec de petits ailerons (figure 1). Il mesurera 8 m de long avec une masse de 5 à 7 tonnes. Il sera équipé d'une soute s'ouvrant vers le haut pour transporter des charges et d'un bouclier thermique dans sa partie inférieure pour la rentrée dans l'atmosphère. Le Vortex nécessitera l'utilisation d'un lanceur flexible au sommet duquel il sera fixé pour les décollages de la terre. Dassault n'envisage pas de développer de lanceurs et compte sur la coopération avec les industriels pour cela. Dans l'espace, au-delà d'une centaine de kilomètres, sa propulsion lui permettra de manœuvrer et de changer de trajectoire, d'orbite et d'altitude. Destiné à rester plusieurs mois en orbite, le Vortex est

prévu pour rentrer sur terre avec une pente plus douce qu'une capsule spatiale et pour planer très longtemps afin d'atteindre n'importe quel point sur terre pourvu d'une piste d'atterrissage. Le Vortex pourra à terme embarquer un équipage pour des missions de courte ou moyenne durée.

Un premier démonstrateur de 4 m de long et 2,5 m d'envergure appelé Vortex D sera lancé en 2028 en suborbital puis en orbite. Ce prototype d'une tonne atteindra une vitesse de 15 000 km/h à 120 km d'altitude. Une version plus grande, le Vortex S, suivra avant une troisième version d'une quinzaine de tonnes et 12 m de long, et pourra être lancée en 2031. Elle sera la première navette de ce type véritablement opérationnelle en orbite.

### Les enjeux européens

En Europe, la France est en pointe sur ce segment comme sur celui des planneurs hypersoniques avec le planneur V-Max d'Ariane. Les Etats-Unis ont une nette avance avec le X-37 de Boeing dont le premier vol a eu lieu en 2010. La Chine aurait deux programmes comparables ainsi que l'Inde. Le vol orbital est l'un des domaines de confrontation militaire, l'armée de l'air française a été rebaptisée en 2020 « Armée de l'air et de l'espace » pour considérer le continuum du sol à l'orbite géostationnaire à 36 000 km. Ce n'est pas la première fois que Dassault Aviation se positionne dans un projet d'avion spatial mais il semble que toutes les conditions soient réunies pour concrétiser ce projet. Le contexte géostratégique est en évolution rapide sur ce plan et bénéficie d'investissement importants aux Etats-Unis, en Chine et en Russie, pays qui veulent transformer l'espace en un champ de confrontation. Cet environnement contraint la France à se doter de moyens qui garantissent son indépendance stratégique dans l'espace. ■

**Marc Leconte, membre émérite SEE**