



Figure 1 : Vue d'artiste de la sonde Dragonfly au-dessus de Titan – Source : NASA.

➤ Vers les lunes glacées de Saturne

Dragonfly : une mission innovante

La nouvelle mission Dragonfly de la NASA vers Titan, la lune géante de Saturne, doit être lancée en 2027. Lorsqu'il arrivera au milieu des années 2030, le rover entamera un voyage de découverte qui pourrait apporter une nouvelle compréhension du développement de la vie dans l'univers (figure 1).

La mission Dragonfly est destinée notamment à éclairer sur les types d'étapes chimiques qui se sont produites sur Terre et qui ont finalement conduit à la formation de la vie, appelées chimie prébiotique. L'abondance de chimie complexe riche en carbone de Titan, son océan intérieur et sa présence passée d'eau liquide à la surface en font une destination idéale pour étudier les processus chimiques prébiotiques et l'habitabilité potentielle d'un environnement extraterrestre.

De nombreuses explorations depuis 1979

L'exploration de Saturne et de ses satellites à l'aide de sondes spatiales a débuté en 1979 avec le survol de la planète par la sonde Pioneer 11. Saturne, du fait de sa distance de la Terre et du Soleil, est une destination complexe qui nécessite un savoir-faire et des ressources financières que, jusque-là, seule l'agence spatiale américaine, la NASA, est parvenue à réunir. Jusqu'en 2017, quatre missions spatiales ont visité Saturne et ses satellites, dont une seule, Cassini-Huygens a pu mener des missions prolongées en se plaçant en orbite autour de la planète géante. En 2019, l'agence

spatiale américaine a décidé de développer la mission Dragonfly. Celle-ci devrait déposer en 2034 un robot aérien à la surface de Titan. Cette mission a été autorisée à poursuivre les travaux de conception et de fabrication de la mission finale au cours de l'exercice 2024. L'agence a reporté la confirmation officielle de la mission (y compris son coût total et son calendrier) jusqu'à la mi-2024, à la suite de la publication de la demande de budget pour l'exercice 2025. A l'heure où nous écrivons ces lignes les finalités scientifiques de la nouvelle administration ne sont pas encore connues, mais on peut penser que l'avancement de ce projet est suffisant pour qu'il ne soit pas abandonné.

L'exploration spatiale de Saturne a débuté avec le survol de la planète par la sonde spatiale Pioneer 11 lancée en 1973. Elle atteint Saturne le 1er septembre 1979, passant à 22 000 km du sommet des nuages. La traversée de l'atmosphère s'effectue sans encombre et Pioneer 11 prend les premières photos rapprochées de la planète, découvre deux satellites et un anneau jusque-là inconnu, étudie la magnétosphère saturnienne et établit que la température sur le satellite Titan est vraisemblablement trop basse pour permettre le développement d'une forme de vie, malgré la présence de méthane et de molécules organiques.

Voyager 1, lancée le 5 septembre 1977, pénètre le 10 novembre 1980 au cœur du système planétaire de Saturne. Le jour suivant, la sonde effectue un survol rapproché de Titan. Les scientifiques savaient avant ce survol que Titan possède une atmosphère comportant du méthane et certains d'entre eux avaient émis l'hypothèse que des formes de vie avaient pu se développer dans cet environnement créé par l'effet de serre. Mais bien avant le rendez-vous avec la lune, les photos prises permettent de constater que Titan est entouré d'une couche de nuages continue, opaque en lumière visible qui ne permet pas de distinguer la surface. Des traces d'éthy-

lène et d'autres hydrocarbures sont détectées tandis qu'une température sans doute trop basse pour la vie est mesurée. Les anneaux et les autres satellites dont l'observation est programmée (Dioné, Mimas et Rhéa) sont tous très proches de la planète géante puisque le survol doit durer, en tout, à peine dix heures.

Voyager 2, lancée le 20 août 1977 avant Voyager 1, passe à 161 000 km du centre de Saturne le 26 août 1981. À l'aide de son instrumentation radio, Voyager 2 parvient à sonder les couches externes de l'atmosphère de la géante gazeuse. Des températures, passant de 82 kelvins au niveau de pression 70 millibars à 143 kelvins au niveau de pression 1 200 millibars, sont mesurées. La sonde est dirigée de manière à pouvoir obtenir de meilleures vues des lunes que Voyager 1. La trajectoire retenue permet à la sonde d'utiliser l'assistance gravitationnelle de Saturne pour se diriger vers sa destination suivante : Uranus.

Cassini-Huygens lancé le 15 octobre 1997 est une mission particulièrement ambitieuse rattachée au programme Flagship de la NASA. Avec une masse totale de 5,6 tonnes, dont 3,1 tonnes de carburant et 350 kg pour l'atterrisseur Huygens, il s'agit du plus gros engin spatial lancé vers les planètes externes. L'orbiteur Cassini embarque douze instruments scientifiques, dont un radar, tandis que Huygens en emporte six. Cassini est stabilisé selon trois axes et son énergie est fournie par trois générateurs thermoélectriques à radio-isotope utilisant du plutonium 238. La mission Cassini-Huygens a rempli tous ses objectifs scientifiques, en fournissant une moisson de données sur Saturne, sa magnétosphère, ses anneaux, Titan et les autres lunes de la planète géante (figures 2 et 3). Les caméras de l'orbiteur ont également fourni certaines des plus belles images du système solaire. Cassini a notamment permis d'étudier Titan de manière approfondie et de découvrir une dizaine de nouvelles lunes de Saturne, de petite taille portant le nombre total de satellites de Saturne à 62. La sonde a permis également de découvrir de nouveaux anneaux de Saturne.

Une approche novatrice et des objectifs scientifiques clairs

Dragonfly adopte une approche novatrice de l'exploration planétaire, en utilisant un hélicoptère-atterrisseur pour voyager entre divers sites sur Titan (figure 4). Cette technique avait été utilisée pour la première fois sur Mars par la mission « Ingenuity » abordée dans un précédent numéro de la REE. L'objectif de Dragonfly est de caractériser l'habitabilité de l'environnement de Titan, d'étudier la progression de la chimie prébiotique dans un environnement où des matériaux riches en carbone et de l'eau liquide peuvent s'être mélangés pendant une période prolongée. Il est prévu de rechercher des indications chimiques indiquant si la vie à base d'eau ou d'hydrocarbures a existé sur cette lune.

Cette mission vers Titan transportera un instrument appelé *Dragonfly Mass Spectrometer Organics* (DrACO) conçu pour étudier les types d'étapes chimiques qui se sont produites sur Terre et qui ont

finalement conduit à la formation de la vie. L'abondance de chimie complexe riche en carbone de Titan, son océan intérieur et sa présence passée d'eau liquide à la surface en font une destination idéale pour étudier les processus chimiques prébiotiques et l'habitabilité potentielle d'un environnement extraterrestre.

Sur chaque site, des échantillons de moins d'un gramme seront extraits de la surface par le DrACO et amenés à l'intérieur du corps principal de l'atterrisseur. Là, ils seront irradiés par un laser embarqué ou vaporisés dans un four pour être mesurés par DraMS.

Un lancement espéré en 2028 pour une arrivée en 2030

Plus tôt cette année, Dragonfly a satisfait à tous les critères de succès de son examen préliminaire de conception. L'équipe de Dragonfly a procédé à une refonte de la planification de la mission en fonction du financement prévu pour l'exercice 2024 et estime que la date de préparation au lancement révisée est fixée à juillet 2028.



Figure 2 : La dernière image de Titan envoyée par la sonde Huygens-Cassini-Source : NASA.

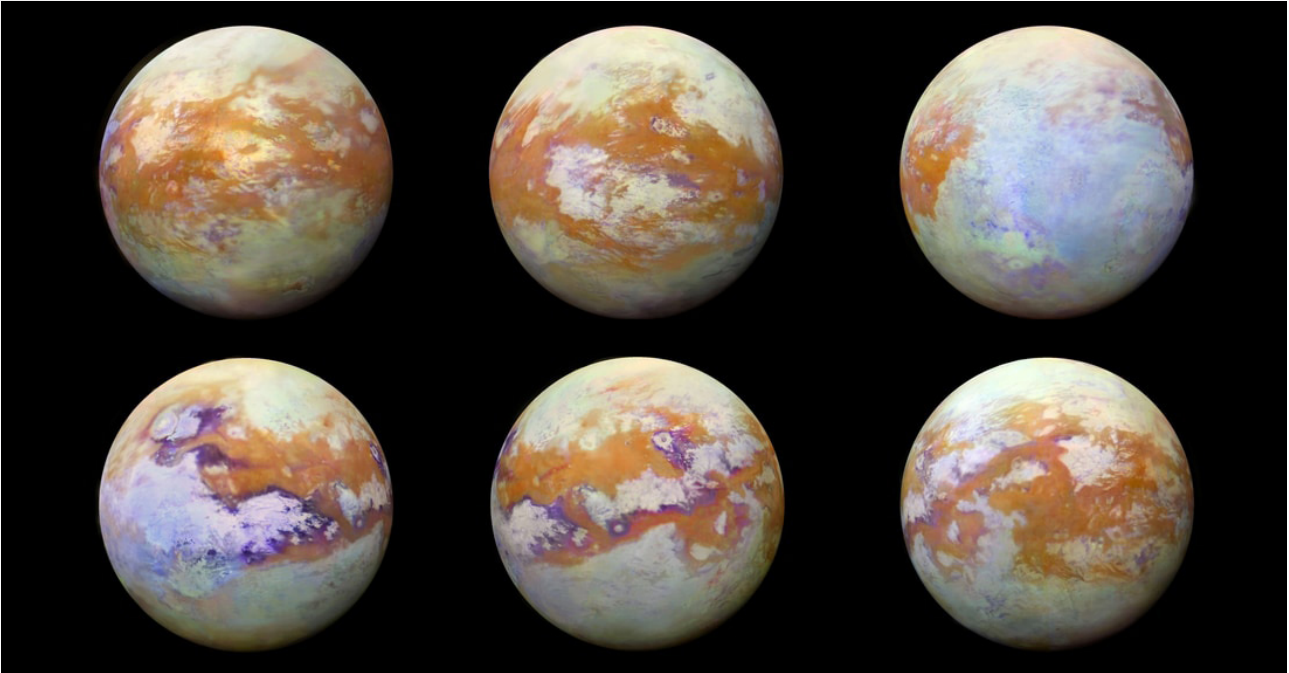


Figure 3 : Ces six images infrarouges de la lune de Saturne, Titan, représentent certaines des vues les plus claires de la surface de la lune glacée produites jusqu'à présent. Ces vues ont été créées en 13 ans de données acquises par l'instrument VIMS (*Visual and Infrared Mapping Spectrometer*) à bord de la sonde spatiale Cassini. Source : NASA.

- L'Agence a annoncé officiellement la date de préparation au lancement de la mission à la mi-2024, lors du Conseil de gestion du programme de l'Agence. Mais nous sommes au premier trimestre 2025 et rien n'est décidé. Si le lancement a bien lieu en 2028, l'arrivée est prévue au début des années 2030.

Sinon il faudra trouver un autre créneau compatible avec la technique de l'accélération gravitationnelle.

Rendez-vous donc en 2030. ■

André Deschamps, Membre senior SEE



Figure 4 : Vue d'artiste de la séquence d'atterrissage de Dragonfly – Source NASA.

► Production d'électricité 2024 : une inflexion aux conséquences notables ?

Au mois de février 2025, RTE a publié son traditionnel « bilan électrique ». Si ce document très riche montre la poursuite de certaines tendances passées, il fait aussi apparaître des inflexions significatives, tant au niveau français qu'europpéen.

En première approche : une reprise modeste de la consommation mais une progression sensible de la production

- La décroissance de la consommation électrique (en France environ -9 % depuis la période 2011-2017) s'est interrompue. La reprise (UE : +1,2 %, France : +0,9 %, avant correction des effets climatique et calendaire¹) a toutefois été modérée, notamment du fait d'un hiver particulièrement doux, et n'a pas encore permis de retrouver le niveau de consommation d'avant les crises sanitaires et énergétiques ; elle permet toutefois d'être plus optimiste pour l'avenir, sauf nouvelle crise conjoncturelle.

- Toutes filières confondues, le volume de production d'électricité en France a progressé pour la deuxième année consécutive en 2024 (+9 % par rapport au niveau de 2023), dans les mêmes proportions qu'en 2023, où la production avait augmenté de 10,8 % par rapport à 2022. Le niveau de production d'électricité a ainsi atteint 539 TWh en 2024,

¹ 2024 a compté un jour de plus que 2023...

dépassant pour la première fois son niveau d'avant les crises sanitaire et énergétique (537,5 TWh en moyenne sur la période 2014-2019), comme indiqué dans la figure 1.

Analyse par filières de production, en France

Les conditions climatiques, ainsi que, en France, la fin de la crise technique touchant le parc nucléaire, ont été globalement plutôt favorables à la production électrique :

- Nucléaire : Le volume de production a augmenté de 13 % en 2024 par rapport à l'année précédente complétant son redressement par rapport au point bas de 2022. Avec la mise en service de l'EPR de Flamanville, cette tendance devrait s'accroître en 2025.

- Hydraulique : Le niveau de production des centrales hydroélectriques s'est établi à 75,1 TWh en 2024, soit une hausse de 28 % par rapport aux 58,9 TWh produits en 2023. Il s'agit du niveau le plus élevé depuis 2013 (75,5 TWh), atteint grâce à des précipitations abondantes, l'année 2024 ayant été l'une des dix années les plus pluvieuses depuis 1959.

- Eolien terrestre : La production éolienne terrestre a reculé en 2024 par rapport à son niveau de 2023, malgré la poursuite du développement du parc, du fait du climat (faibles vents).

- Eolien en mer : Le parc éolien en mer français et sa production ont doublé en 2024, avec la mise en service de deux parcs (Saint-Brieuc et Fécamp).

- Solaire photovoltaïque : La production d'électricité solaire a atteint en 2024 un record historique (comme chaque année ●●●

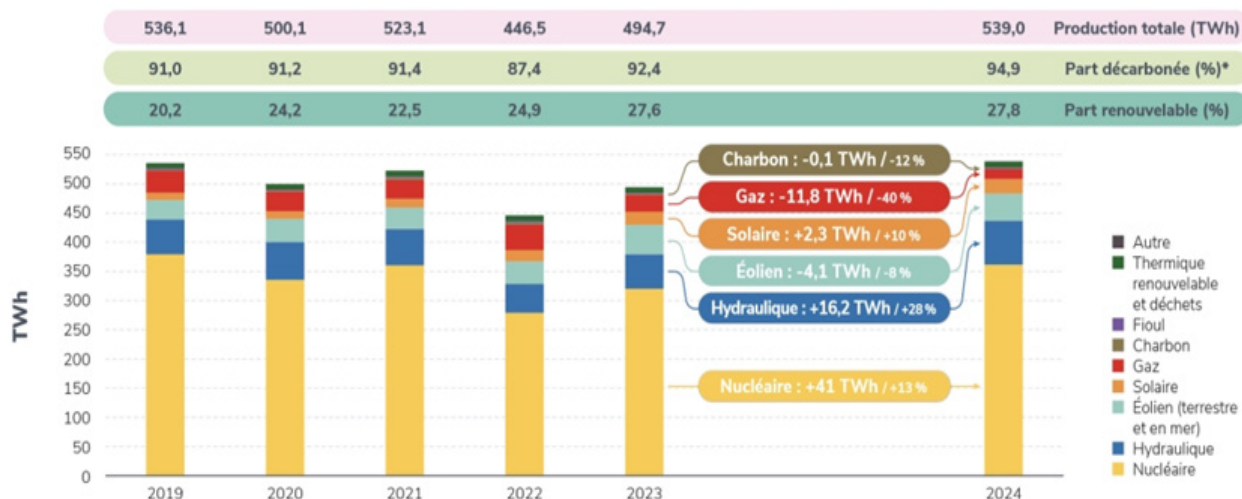


Figure 1 : Evolution de la production d'électricité par filière en France entre 2019 et 2024. Source RTE.

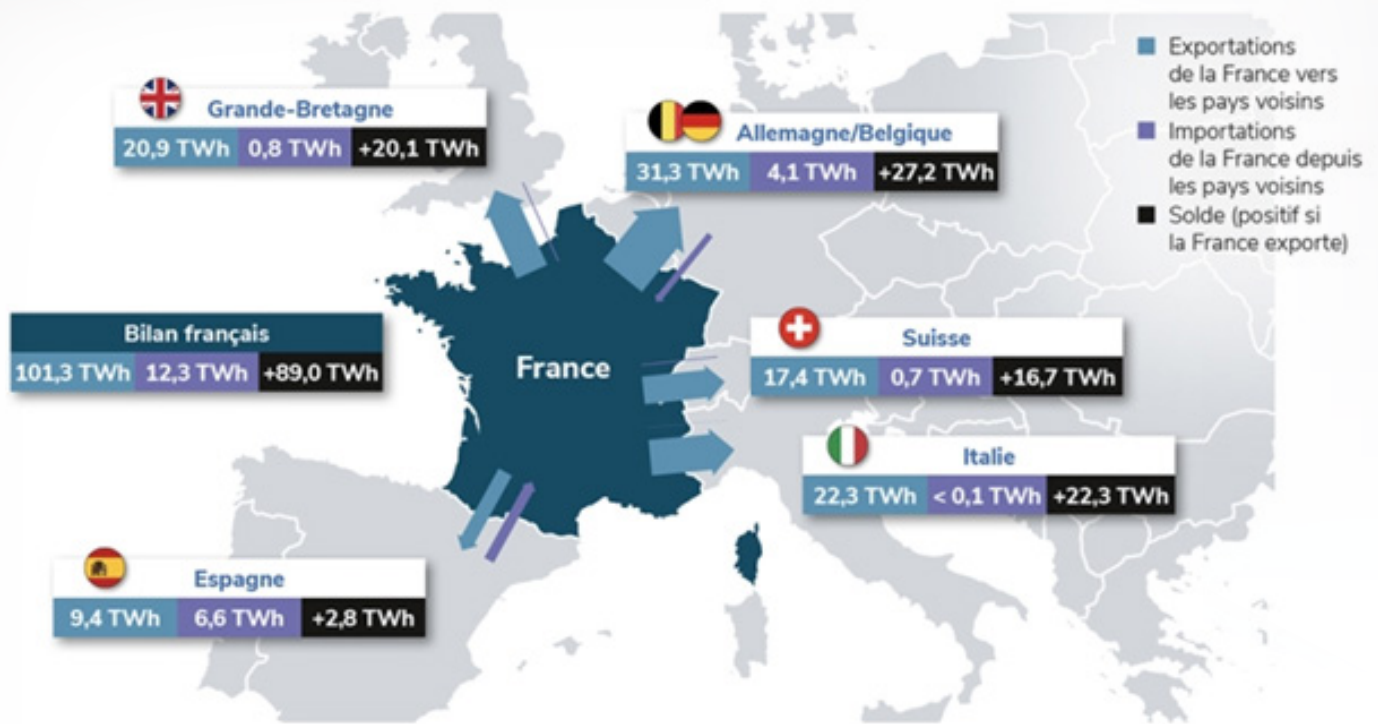


Figure 2 : Echanges commerciaux d'électricité entre la France et les pays voisins en 2024. Source RTE.

- depuis 2006), avec 24,8 TWh produits. Il s'agit d'une hausse de 2,3 TWh (+ 10 %) par rapport au niveau de production de 2023, portée par le développement du parc, alors que l'année écoulée a été la moins ensoleillée que la France ait connue depuis près de trente ans.

Quelques records historiques

En 2024, la France a retrouvé des niveaux importants de production d'électricité et battu plusieurs records.

- Sa production d'électricité atteint son plus haut niveau depuis 5 ans (539,0 TWh). Elle retrouve ainsi un niveau supérieur à celui de 2019 et conforme à la moyenne 2014-2019 (537,5 TWh) ;
- La hausse de la production d'électricité en 2024 s'explique essentiellement par l'augmentation des productions nucléaire (+ 41,3 TWh) et hydraulique (+ 16,2 TWh) et, dans une moindre mesure, de celle de la production solaire (+ 2,3 TWh). Dans le même temps, la production d'électricité à partir de ressources fossiles a significativement baissé en 2024 (- 11,6 TWh par rapport à son niveau de 2023) pour atteindre son minimum depuis 1952. Le volume de production décarbonée n'a jamais été aussi élevé, grâce au redressement du nucléaire, à une année pluvieuse qui a favorisé la production hydraulique, et au développement de la production éolienne et solaire au cours des dix dernières années ;

- Ainsi, La production renouvelable a atteint un record de 150,0 TWh, soit 27,8 % de la production totale et la part de production décarbonée a atteint en 2024 un niveau historique (95 %).

Pour la France, cet écart entre une forte dynamique de la production et une progression bien moindre de la consommation intérieure implique une forte progression de ses exports vers les pays voisins, qui se sont établis au niveau record de 89 TWh (figure 2).

Autre conséquence - beaucoup moins positive - de cet écart, et notamment de l'accroissement de la part de la production « non pilotable » : l'augmentation de la fréquence d'apparition de prix spot négatifs.

Dans un système électrique dans lequel la part des renouvelables croît, l'augmentation des prix négatifs est un phénomène attendu, en particulier si la consommation électrique demeure faible. De fait, la fréquence d'apparition de prix spot négatifs a doublé par rapport à 2023. Ils ont représenté 359 heures, soit 4 % du temps. Lorsqu'ils sont survenus, ces prix sont certes la plupart du temps demeurés proches de zéro, sans s'établir à des valeurs très basses, et se sont souvent succédé pendant plusieurs heures la nuit ou l'après-midi durant les week-ends au printemps et à l'été. ■

Jacques Horvilleur, membre émérite SEE

➤ ARCEP : de nouvelles missions et des responsabilités élargies

Depuis bientôt trois décennies, l'Arcep ¹ régule en France des réseaux d'échange comme les télécommunications, les postes ou la presse...

A la faveur des mutations de la vie économique, du développement des usages et des technologies, l'action de l'Arcep a largement évolué. Par exemple, il faut maintenant tenir compte de la fin de vie de technologies (cuivre, 2G, 3G...) et l'avènement de nouvelles technologies comme le déploiement partout de la fibre, la généralisation de la 4G et le déploiement de la 5G, la « cloudification » des réseaux ou les services satellitaires *Direct to Device*...

Pour répondre à ces nouveaux enjeux, l'Arcep s'est vue confier de nouvelles missions par le législateur : le secteur de la distri-

bution de la presse, le marché du cloud, le développement de l'innovation grâce au partage de données et la prise en compte de l'impact environnemental.

Face à ces nouvelles orientations stratégiques, la présidente de l'Arcep, Laure de La Raudière a présenté l'ambition 2030 ² de l'Arcep le 21 janvier 2025, entourée des membres du collège, à la Sorbonne.

L'ambition 2030 de l'Arcep

L'objectif de l'Arcep est de garantir partout, pour tous et pendant longtemps un accès équitable, performant et durable aux réseaux numériques tout en assurant un équilibre entre innovation, compétitivité et protection des utilisateurs (figure 1).

Partout : la connectivité doit être généralisée et performante avec couverture optimale sur tout le territoire français. Cette connectivité concerne :

1 Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse

2 <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-thematiques-transverses/ambition-2030-pour-larcep.html>



CONNECTIVITÉ

Finaliser la transition vers le THD pour tous

- Généralisation de la fibre optique et de réseaux mobiles de nouvelle génération
- Accompagnement de la fermeture des réseaux cuivre, 2G et 3G



RÉSILIENCE

Assurer la qualité, la pérennité et la résilience des infrastructures

- Amélioration de la qualité de service des réseaux fixes et mobiles
- Pérennisation des conditions économiques de tous les réseaux fibre
- Réflexions sur la résilience des infrastructures numériques



COMPÉTITIVITÉ

Garantir la connectivité des entreprises et dynamiser la concurrence

- Disponibilité d'offres variées répondant aux besoins des entreprises
- Développement pérenne de la 5G des entreprises dans la bande 3,8 – 4,2 GHz



ENVIRONNEMENT

Partager la connaissance des impacts environnementaux du numérique

- Plateforme de la mesure des impacts environnementaux du numérique
- Caractérisation des impacts de l'IA



CLOUD

Favoriser une plus grande liberté de choix de services cloud

- Amélioration des conditions concurrentielles du marché du cloud grâce à un nouveau cadre tarifaire et technique



DURABILITÉ

Agir pour réduire les impacts environnementaux du numérique

- Intégration de l'impact environnemental dans la régulation européenne du numérique
- Passage à l'échelle de l'écoconception du numérique : focus sur les services numériques et les box



IA

Œuvrer à l'ouverture des marchés numériques et des systèmes d'IA

- Vigie de l'ouverture de l'internet : sur les réseaux et sur l'ensemble des maillons de la chaîne du numérique
- Valorisation de modèles d'IA évaluables et efficaces



DONNÉES

Favoriser le développement de l'économie par la donnée et l'innovation

- Accompagnement des entreprises pour le partage et l'accès à des données
- Labellisation des intermédiaires en France et pour l'Europe



DISTRIBUTION DE LA PRESSE

Favoriser la modernisation de la distribution de la presse et valoriser la place du marchand

- Accompagnement des réformes du secteur
- Assurer le suivi de la continuité de l'accès à la presse par un outil cartographique
- Réflexions sur les conditions de l'accès à la presse en ligne

Figure 1 : Les neuf objectifs de l'Arcep (source Arcep).

- le déploiement de la fibre optique, couvrant quasiment toute la France d'ici 2030, notamment dans les zones rurales ;
- l'évolution du réseau mobile avec la 5G et les futures technologies sans fil ;
- la modernisation des réseaux fixes et mobiles, ainsi que les transitions et fermetures des technologies plus anciennes telles que le réseau cuivre ;
- l'amélioration de la qualité de service, avec une connectivité plus fluide et des opérateurs performants.

Pour tous : l'Internet est ouvert et compétitif, neutre et accessible à tous par ;

- l'encadrement de la concurrence en maintenant des conditions justes pour les acteurs, notamment face aux grandes plateformes numériques et aux *hyperscalers* ;
- la défense de la neutralité du net, les contenus et services bénéficiant tous du même traitement sans discrimination par les fournisseurs d'accès ;
- la surveillance des nouvelles chaînes de valeur pour éviter d'éventuelles barrières anticoncurrentielles (*cloud computing*, les services mobiles et l'IA-ChatGPT...) ;
- la garantie d'une transparence accrue, les consommateurs devant pouvoir comparer la qualité et la performance des services.

Pour longtemps : il s'agit de favoriser un numérique durable et responsable, minimisant son impact environnemental, notamment au moyen de :

- l'éco-conception des réseaux avec réduction de la consommation d'énergie et de l'empreinte carbone ;
- l'optimisation de la gestion des équipements avec le recyclage et la réparabilité des smartphones, des box Internet et des antennes ;
- la sobriété numérique en accompagnant les politiques publiques pour contrôler la consommation énergétique des centres de données et des réseaux ;
- la résilience des infrastructures contre les cyberattaques ou des événements climatiques extrêmes.

La stratégie de l'Arcep à l'horizon 2030 repose sur 9 objectifs stratégiques (voir figure 1). Elle s'appuie aussi sur trois modes d'action complémentaires aux outils traditionnels du régulateur pour amplifier l'impact de sa régulation.

Les neuf objectifs stratégiques de l'Arcep

1/ Finaliser la transition vers le très haut débit pour tous

L'objectif est d'assurer une connexion plus rapide et fiable pour tous les citoyens et entreprises, en généralisant la fibre optique et les réseaux mobiles de nouvelle génération sur toute la France, d'ici 2030. Il s'agit d'accélérer le remplacement du réseau cuivre par la fibre, surtout dans les zones rurales et peu denses, de compléter la couverture 4G et généraliser la 5G pour améliorer la connectivité partout, y compris dans les transports. En parallèle, il faut accompagner la fermeture des anciennes technologies en planifiant progressivement l'extinction du réseau cuivre (ADSL), annoncée par Orange en 2022, et des réseaux mobiles 2G/3G.

A noter que la stratégie de fermeture des anciennes technologies varie selon les opérateurs et les pays du fait de situations différentes et de chemins de migration différents vers les nouvelles technologies. La question de la rentabilité économique des investissements pour les opérateurs devient alors cruciale, notamment pour les zones peu denses. C'est l'objet du 3^{ème} objectif présenté ci-après.

2/ Garantir la connectivité des entreprises et dynamiser la concurrence

L'objectif est de fournir aux entreprises un accès adapté aux besoins numériques indispensables à leur compétitivité. Il faut leur permettre de bénéficier d'une offre variée provenant de grands opérateurs et d'opérateurs alternatifs. Par exemple, des entreprises peuvent nécessiter des services de fibre ou 5G sur mesure, c'est le cas de l'industrie et des services numériques. L'offre peut concerner le développement de réseaux 5G dédiés (5G privés) notamment dans la bande 3,8 – 4,2 GHz (par exemple : usines, hôpitaux, ports). En effet, les entreprises françaises, notamment les PME, accusent un retard notable dans leur transformation numérique³ en particulier pour la 5G, le cloud ou l'IoT.

Enfin, les solutions doivent s'envisager au niveau européen ou international (cf. rapport Draghi⁴). On peut se demander comment l'Arcep, dans son rôle national pourra favoriser une approche véritablement européenne.

3/ Assurer la qualité et la pérennité des infrastructures télécoms et apporter de l'expertise pour leur résilience

L'Arcep veut garantir des réseaux fiables, performants et sécurisés sur le long terme. Dans ce but, l'Arcep assure le rôle de

³ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/france-2024-digital-decade-country-report>.

⁴ Voir REE 2025-1, pp.14-19.

surveillance de la qualité des services, en publiant des rapports réguliers sur la performance. L'objectif est de promouvoir une amélioration continue de la qualité de service des réseaux fixes et mobiles. L'Arcep participe aux réflexions sur la résilience des infrastructures face aux diverses menaces pour la protection des réseaux contre les cyberattaques et l'anticipation des pannes majeures. Enfin, l'Arcep doit contribuer à garantir la durabilité économique des infrastructures, en assurant des conditions permettant la rentabilité des investissements y compris pour les zones mal couvertes.

Le rapport Draghi évoque le manque d'investissement des opérateurs européens du fait du morcellement des opérateurs en Europe. Il faut espérer que l'Arcep favorisera le regroupement des opérateurs en Europe pour atteindre une échelle suffisante, comme c'est déjà le cas en Amérique du Nord ou en Chine ⁵.

4/ Améliorer et partager la connaissance des impacts environnementaux du numérique

L'Arcep mène des travaux de compréhension des impacts environnementaux, notamment en élargissant progressivement ses collectes de données environnementales : auprès d'équipementiers et fabricants de câbles sous-marins en 2025 et auprès d'autres acteurs du numérique, dans les années suivantes. Cette collecte est unique en Europe, et sans doute dans le monde. Il s'agit de développer une plateforme d'observation publiant des données sur la consommation énergétique et les émissions carbone des infrastructures numériques. Cette plateforme permettra notamment de caractériser les effets de l'IA comme la consommation énergétique des LLM ⁶ ou des centres de données. Le but est d'informer et sensibiliser les acteurs concernés, les producteurs et les consommateurs et de leur mettre à disposition des outils pour comprendre l'impact écologique de leurs usages.

Si la consommation énergétique est importante, il faut souligner que les émissions carbonées indirectes induites par la mise en œuvre des infrastructures sont bien plus conséquentes. Pour un opérateur comme Orange qui consomme plusieurs millions de tonnes de carbone annuellement ⁷, la partie induite par ses investissements (le 'Scope 3' ⁸) est 6 à 7 fois supérieure à sa consommation énergétique propre ('Scope 1 et 2'). Il est donc particulièrement nécessaire de comprendre l'empreinte des équipementiers.

5 La réduction du nombre d'opérateurs en Europe a d'ailleurs été évoquée par le président Macron lors de la table ronde sur le rapport Draghi au Collège de France en novembre 2024.

6 *Large Language Model* (Cf. l'article invité sur l'IA dans ce numéro p. 36)

7 Le Groupe Orange est présent sur un peu moins de 30 pays, dont certains comme la Pologne ou le Botswana ont une électricité beaucoup plus carbonée qu'en France qui bénéficie du nucléaire.

8 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Scope_\(bilan_carbone\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Scope_(bilan_carbone))

5/ Agir pour réduire les impacts environnementaux du numérique

Il s'agit de réduire la consommation d'énergie et l'empreinte carbone. Les services numériques « apparemment » virtuels ont une empreinte environnementale bien réelle, en entraînant la croissance des centres de données et des réseaux ou en occasionnant le changement de terminaux des utilisateurs. Certains services tels que les usages de l'IA ont un impact particulièrement fort en puissance de calcul. L'Arcep souhaite favoriser les bonnes pratiques telles que l'utilisation de codecs vidéo efficaces, la limitation de l'*auto play* ⁹ ou du *scrolling* infini, le maintien des logiciels d'exploitation pendant toute la durée de vie des terminaux ou encore le développement de plateformes IA plus sobres. Au-delà des bonnes pratiques, l'Arcep veut aussi agir pour limiter l'empreinte écologique du numérique avec une régulation sur les aspects suivants :

- l'éco-conception en encourageant des équipements (box, smartphones, centres de données) plus économes en énergie ;
- le développement du recyclage et de la réparabilité en luttant contre l'obsolescence programmée et en favorisant la durabilité et le réemploi des équipements (au moins 10 ans...) ;
- l'intégration des enjeux climatiques dans la régulation en influençant les décisions européennes sur le numérique et l'environnement.

L'Arcep, la seule en Europe à ce jour, joue un rôle précurseur parmi les régulateurs européens pour tenir compte des impacts environnementaux. Cette approche est tout à fait en ligne avec le rapport Draghi qui prône une innovation verte.

6/ Favoriser le développement de l'économie par la donnée et l'innovation

Les données numériques structurent aujourd'hui tous les usages et sont essentielles pour l'innovation. C'est pourquoi, l'Arcep veut encourager un usage ouvert et concurrentiel des données pour stimuler l'innovation, en mettant en place des standards pour le partage d'informations entre entreprises et administrations. Pour stimuler l'innovation et faire émerger de nouveaux services, la régulation doit aider les startups et PME à exploiter la donnée dans leurs modèles économiques. Enfin, dans le cadre de la loi SREN (Sécuriser et Réguler l'Espace Numérique), l'Arcep doit réguler les intermédiaires en attribuant le label « prestataire de services d'intermédiation de données reconnu dans l'Union » aux acteurs qui respectent des principes d'équité et de transparence dans l'accès aux données.

9 L'*AutoPlay* est une fonction du système d'exploitation Microsoft Windows qui examine le contenu d'un périphérique de stockage nouvellement connecté pour en informer l'utilisateur ou exécuter une action préalablement configurée.

- Le développement de l'économie nécessite un accès plus facile aux données pour favoriser la compétitivité et l'émergence des outils de l'IA comme les LLM. C'est d'ailleurs un des points évoqués dans le rapport Draghi. Il faudra trouver un équilibre entre un accès plus facile et la confidentialité des données.

7/ Favoriser une plus grande liberté de choix de services cloud

Pour assurer une concurrence équitable sur le marché des services cloud, il est nécessaire de réguler le marché du *cloud computing* pour éviter la domination des géants du numérique (dont les GAFAM). Il s'agit d'encourager la diversification des offres pour que les entreprises et les administrations puissent avoir des alternatives aux grands fournisseurs. Pour ce faire, il faut favoriser l'interopérabilité, promouvoir des standards qui permettent la migration facile des services d'un cloud à un autre, et éviter des pratiques anti-concurrentielles qui limiteraient l'accès au cloud pour les petites entreprises.

Il faut garantir, par ailleurs, les besoins de souveraineté. Par exemple, en France, Orange commercialise un « cloud de confiance » tenant compte de la réglementation souveraine française SecNumCloud 3.2. Ici encore, se pose la question d'une approche souveraine en Europe, qui puisse atteindre une échelle suffisante pour être compétitive.

8/ Œuvrer à l'ouverture des marchés numériques et des systèmes d'IA

L'Arcep doit promouvoir l'ouverture et la transparence des marchés numériques et des systèmes d'IA, afin de garantir une concurrence saine et l'innovation, et d'éviter les situations de monopole, tout en protégeant les droits des utilisateurs à un accès ouvert aux services numériques et à l'IA.

L'Arcep va jouer le rôle de vigie, en régulant les plateformes numériques par la surveillance des pratiques des grandes entreprises pour éviter des abus de position dominante, en encourageant la transparence des algorithmes des entreprises qui doivent expliquer comment fonctionnent leurs IAs. L'Arcep doit préserver la neutralité du net et prévenir des pratiques de blocage ou de filtrage de contenus.

9/ Favoriser la modernisation de la distribution de la presse et valoriser la place du marchand

Ce dernier objectif est lié aux responsabilités élargies de l'Arcep pour soutenir la modernisation du secteur de la distribution de la presse (physique et numérique), en valorisant le rôle des marchands et en adaptant les modèles économiques aux évolutions numériques, afin d'assurer la pérennité de l'accès à l'information, notamment dans les zones rurales.

Les trois modes d'action complémentaires

1/ Agir en réseaux, à tous les échelons

Dans son rôle habituel, l'Arcep se coordonne avec les parties prenantes et s'assure d'une réponse collective aux enjeux. Il s'agit ici de coopérer avec les autres régulateurs ainsi qu'avec les acteurs institutionnels, élus, experts de la société civile non seulement au niveau national, mais au niveau international. C'est un début de réponse au rapport Draghi qui se plaint de la non uniformisation de la réglementation européenne (surréglementation au niveau national, réglementations spécifiques...).

2/ Réguler par la donnée

La démarche de l'Arcep est d'organiser une remontée de l'information collectée auprès des utilisateurs et d'identifier d'éventuels dysfonctionnements des marchés en détectant des signaux faibles ou des problèmes systémiques. Le but est de mieux adapter la régulation en fonction des besoins (cf. les outils « J'alerte l'Arcep », « Mon réseau mobile » et « Ma connexion internet » ...).

3/ Mettre les travaux de l'Arcep au service du débat public

En raison de sa position privilégiée pour accéder à l'information et sa capacité à en produire une synthèse fiable et accessible à tous, l'Arcep s'engage à contribuer au débat public et à alerter population et décideurs sur des problématiques nouvelles.

Conclusion

À la faveur des mutations de la vie économique, des technologies et d'un développement accéléré des usages numériques, l'action de l'Arcep évolue pour répondre aux attentes nouvelles des utilisateurs. L'Arcep souhaite, en précurseur, favoriser un numérique durable et responsable, minimisant son impact environnemental.

L'Arcep répond déjà en partie aux recommandations du rapport Draghi notamment sur l'utilisation des données et de l'IA ou sur la compétitivité des entreprises et leur transformation numérique. Nous espérons que la contribution de l'Arcep à la mise en œuvre d'une réglementation plus harmonisée en Europe permettra l'émergence d'acteurs européens suffisamment puissants et compétitifs. Nous ne doutons pas que les autres régulateurs en Europe auront la même préoccupation. ■

Roberto Kung,
Membre senior SEE

➤ Tokamaks : des avancées tous azimuts en ce début 2025

Le domaine de la fusion nucléaire est actuellement en grande effervescence. De nombreux projets innovants sont sur la table, et tous promettent une énergie propre et illimitée. Force est d'admettre que ce n'est pas si simple.

Il existe aujourd'hui deux techniques pour déclencher une fusion nucléaire entre deux noyaux légers (des isotopes d'hydrogène), la première consiste à confiner par un puissant champ magnétique la matière dans une enceinte ayant globalement la forme d'un tore pour obtenir une température critique qui permette la fusion des noyaux. La deuxième consiste à porter à une température très élevée une cible par un laser de forte puissance. La première de ces techniques est représentée par les tokamaks qui nécessitent une taille critique et impliquent de gros investissements ainsi que des programmes au niveau des états à l'instar du programme ITER (voir REE 2016-4). La seconde technique appelée fusion par confinement inertiel a récemment ouvert la voie

à des initiatives privées de start-up qui promettent parfois d'arriver à une fusion opérationnelle plus rapidement que les tokamaks (voir par exemple REE 2023-4).

Les réacteurs de type tokamak ont récemment enregistré des avancées majeures, tant en termes de durée de confinement du plasma que de température atteinte. Voici un aperçu, parmi d'autres, des derniers développements significatifs.

Chine : EAST atteint de nouveaux sommets

Ce 20 janvier 2025, l'Académie chinoise des sciences a déclaré que des scientifiques travaillant sur la production d'énergie de fusion, via l'Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), venaient de battre un nouveau record du monde. En effet, le mélange d'énergie a pu être maintenu stable pendant plus de 1 066 secondes. Le tokamak EAST a réalisé plusieurs performances remarquables (figure1).

Situé dans l'est de la Chine, à l'Institut des sciences physiques d'Hefei, dans la province d'Anhui, EAST est un réacteur à fusion magnétique, surnommé le « soleil de la Chine ». Ce réacteur permet de chauffer un gaz hydrogène

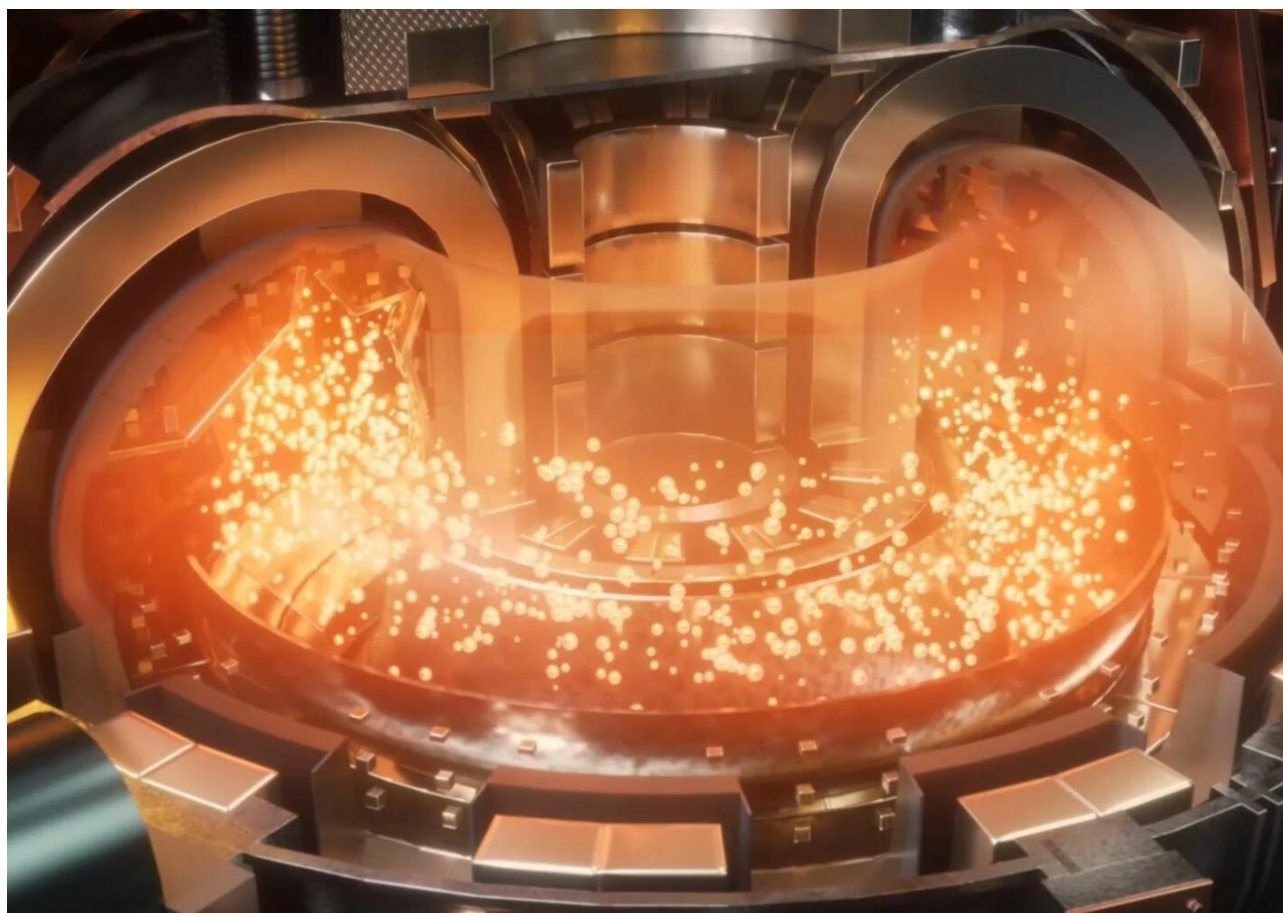


Figure 1 : Le soleil artificiel chinois. Source : Académie chinoise des sciences.

- ionisé (appelé plasma) à la température de 50 millions de kelvins, l'équivalent de 50 millions de degrés Celsius.

Cette réalisation renforce la Chine dans la recherche sur la fusion nucléaire.

France : le tokamak WEST bat le record mondial de durée de plasma !

1 337 secondes : c'est le temps durant lequel le tokamak WEST, opéré sur le centre CEA de Cadarache, a maintenu un plasma le 12 février. Un résultat qui améliore de 25 % le précédent record de durée, obtenu par le tokamak chinois East quelques semaines auparavant (figure 2).

Atteindre une telle durée est un jalon essentiel pour des machines comme Iter, qui devront maintenir des plasmas de fusion pendant plusieurs minutes. Il faut en effet maîtriser le plasma, instable par nature, et s'assurer que les composants placés face à lui sont capables de supporter ses rayonnements, sans dysfonctionner ni le polluer.

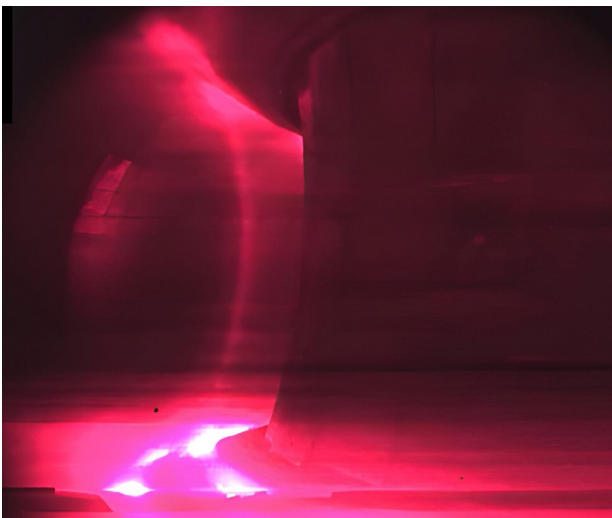


Figure 2 : Le tokamak WEST du CEA. Source : CEA.

Espagne : le Smart, nouveau venu, génère son premier plasma

Le Plasma Science and Fusion Technology Laboratory de l'Université de Séville a atteint une nouvelle étape importante avec son installation de fusion Smart (*Small Aspect Ratio Tokamak*) : le tokamak a généré son premier plasma (figure 3).

Filmé à l'aide d'une caméra ultrarapide dans le domaine spectral visible, ce premier plasma à solénoïde est un succès pour le projet Smart et une avancée majeure vers la réalisation d'un appareil de fusion qui soit le plus compact possible.

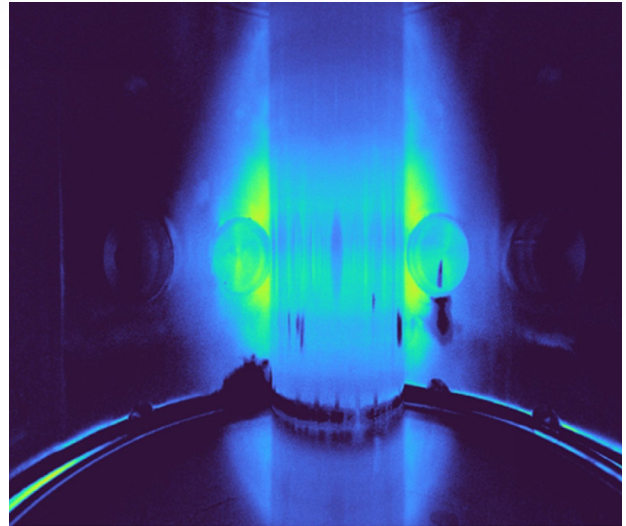


Figure 3 : Premier plasma pour le tokamak espagnol SMART. Source : PSFTL, Université de Séville.

L'installation Smart est constituée d'un tokamak sphérique capable de générer des plasmas de formes différentes, ce qui en fait une installation unique au monde. Le Smart se distingue en particulier par l'utilisation de formes de plasma possédant une triangularité négative. Contrairement aux plasmas traditionnels en forme de D avec triangularité positive, les plasmas avec triangularité négative possèdent la forme d'un D en miroir.

Cette configuration améliore la puissance car elle empêche les instabilités qui expulsent normalement les particules et l'énergie du plasma, un phénomène qui peut endommager les parois du tokamak. Par ailleurs, la triangularité négative offre une meilleure performance de fusion grâce à une plus grande surface du « *divertor* », responsable de l'évacuation de la chaleur, ce qui simplifiera également la construction de futures centrales de fusion compactes.

Fusion2Grid

Smart est la première étape de la stratégie Fusion2Grid, pilotée par le Plasma Science and Fusion Technology Laboratory en collaboration avec la communauté internationale de la fusion. Ce projet vise à développer la centrale de fusion avec confinement magnétique la plus compacte et la plus efficace possible, cette centrale étant basée sur des tokamaks sphériques à triangularité négative. Smart sera le premier tokamak sphérique compact fonctionnant à des températures de fusion et avec des plasmas à triangularité négative. L'objectif est de fournir les bases physiques et techniques pour la conception d'une centrale de fusion combinant trois technologies : celle des tokamaks sphériques, celle de la triangularité négative, et celle des champs magnétiques de forte intensité, afin d'être la plus compacte possible. ■

Jacques Horvilleur,
membre émérite SEE