

➤ Une nouvelle avancée pour la signalisation et la gestion de trafic d'un système de transport Hyperloop

Les projets futuristes de train à vitesse proche de l'avion dans des tubes sous vide, promus par Elon Musk sous le nom d'Hyperloop, peinent à trouver une concrétisation sur le terrain un peu partout dans le monde, en raison du nombre et de la difficulté des défis techniques à relever. Une avancée de nature logicielle permettant une meilleure simulation du système de gestion de trafic d'un tel moyen de transport est présentée ci-dessous.

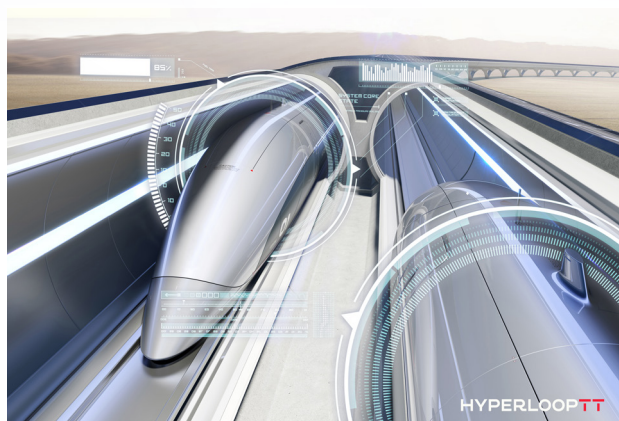


Figure 1 : Vue d'artiste d'un système de transport Hyperloop - © Hyperloop Transportation Technology.

Historique

En 2012, Elon Musk proposait d'étudier la faisabilité d'un train à très grande vitesse baptisé par lui Hyperloop, destiné à « amener la vitesse de l'avion au sol »¹ grâce à l'utilisation de capsules circulant dans un tube sous vide, propulsées par un moteur à induction linéaire. Les capsules hébergeant les passagers sont maintenues en lévitation magnétique, par un procédé type Maglev, grâce à des aimants permanents répartis tout au long du tube. La REE a été parmi les premiers médias spécialisés à instruire ses lecteurs des premiers essais de faisabilité réalisés en Californie pour tenter de valider ce concept².

¹ Vitesse théorique revendiquée : 1200 km/h !

Les entreprises concernées actuellement évoquent plutôt des vitesses plus réalistes de 500 à 800 km/h.

² Voir par exemple REE 2016-3, pp.4-6

En effet après quelques études préliminaires réalisées au sein des sociétés contrôlées par Elon Musk (Tesla, Space X), celui-ci avait décidé de ne pas se lancer lui-même dans l'exploitation du concept Hyperloop et avait mis en ligne les résultats obtenus afin de permettre aux candidats désireux de se lancer dans l'aventure d'en disposer librement. Après de multiples initiatives promettant des résultats miraculeux sans même avoir démontré la moindre preuve de concept, la situation semble se stabiliser aujourd'hui autour d'un petit nombre de projets :

- **Hyperloop Transportation Technologies (HTT)** : cette société californienne a choisi d'implanter son centre de recherches en Europe et plus précisément à Toulouse ce qui lui permet de collaborer aisément avec Airbus. Une première piste d'essai de 320 mètres a été installée en 2019.

- la société canadienne **Transpod** qui, après avoir obtenu une levée de fonds de 550 millions USD, a annoncé le développement d'une première ligne Hyperloop de 300 km environ pour relier les villes de Calgary et Edmonton (inauguration prévue en 2031) ;

- **Hyperloop One**, société du groupe Virgin, devenue Virgin Hyperloop, qui semble la plus avancée puisqu'un premier test avec passagers s'est déroulé en 2020 à 172 km/h (figure 2). Elle a toutefois annoncé récemment vouloir se focaliser sur le transport de marchandises.



Figure 2 : Test Virgin Hyperloop One avec passagers à bord - © Virgin Hyperloop.

- enfin, **Boring Company**, une autre société d'Elon Musk spécialisée dans le forage de tunnels se propose de se lancer dans un projet Hyperloop souterrain, le motif invoqué pour ce choix étant d'éviter les aléas météorologiques.

Tous ces projets sont encore loin d'avoir résolu les nombreux écueils techniques à résoudre, notamment le fort coût énergétique par passager (certains envisagent de revêtir les tubes de panneaux solaires pour atteindre une neutralité carbone) et plus généralement la rentabilité économique d'un tel procédé qui semble difficile à atteindre. En particulier ces technologies se caractérisent par une faible capacité de transport (capsules de 30 personnes environ). Pour concurrencer le TGV, les capsules devraient donc se suivre à une cadence très élevée (à quelques secondes d'intervalle !) ce qui poserait à l'évidence des problèmes de sécurité majeurs. Ce ne sont d'ailleurs pas les seuls en matière de sécurité : risques de pressurisation, évacuation en cas de panne, etc. Sans parler des questions d'acceptabilité sociale d'un système aussi révolutionnaire, n'offrant pas de visibilité sur l'extérieur.

Avancée dans la gestion de trafic et la signalisation d'un système Hyperloop

Les difficultés que nous venons de mentionner qui laissent planer de sérieux doutes sur l'avenir des technologies Hyperloop au moins à court et moyen terme³, n'empêchent pas de constater, au fil des communiqués des principaux compétiteurs, des avancées parfois marquantes. C'est le cas en ce qui concerne une étude qui motive ce Flash Info, réalisée pour le compte de HTT par le laboratoire d'Hitachi Rail basé à Naples, dans le cadre d'une collaboration entamée entre les deux entreprises en décembre 2020.

Cette étude-ci a porté sur la mise au point d'un logiciel de signalisation et du système de gestion de trafic associé, fondée sur l'utilisation du *cloud* et son interfaçage avec les simulateurs développés précédemment par HTT en particulier pour le suivi en temps réel des capsules passagers. Ceci a consisté pour Hitachi Rail à « customiser » pour Hyperloop son produit de simulation de trafic ferroviaire ERTMS, déjà installé avec succès sur des lignes ferroviaires standard dans plusieurs pays européens, dont la France.

En remplaçant l'utilisation d'équipements matériels complexes par un logiciel faisant appel au *cloud*, la solution obtenue est censée offrir une meilleure fiabilité dans le déploiement, réduire

³ HTT par exemple vient de revoir à la baisse ses ambitions sur le site de Toulouse en renonçant à construire une piste d'essai d'un kilomètre sur l'ancien aérodrome militaire de Franczal. A contrario, Transpod confirme sa volonté d'implanter un petit centre de recherches et une piste d'essai à Droux, en Haute-Vienne.

les coûts et améliorer la durabilité du système de contrôle et de gestion des grandeurs critiques. Ce simulateur doit permettre également d'automatiser les tâches répétitives et surtout la détection et le traitement en temps réel d'éventuelles défaillances au lieu de réagir en urgence lorsque celles-ci se manifestent.

Le système ERTMS présente aussi l'avantage d'être utilisé et reconnu à l'échelle internationale ce qui devrait faciliter l'implantation à l'avenir de la technologie HTT de façon interoperable n'importe où dans le monde. ■ AB

De nouvelles évolutions pour la 5G La version 17 des spécifications

Alors que le déploiement de la 5^{ème} génération de système mobile se poursuit à grande échelle – à la fin du deuxième trimestre 2022, 218 opérateurs de 87 pays avaient lancé des services 5G compatibles avec ceux du 3GPP¹. Cette instance poursuit ses travaux de spécification des évolutions de la 5G.

Fin juin 2022, la version 17 des spécifications était achevée et à la fin de 2021, la liste des points d'étude pour la version 18 était approuvée (figure 1). Le 3GPP a décidé que cette dernière version serait la première des spécifications de 5G Advanced.

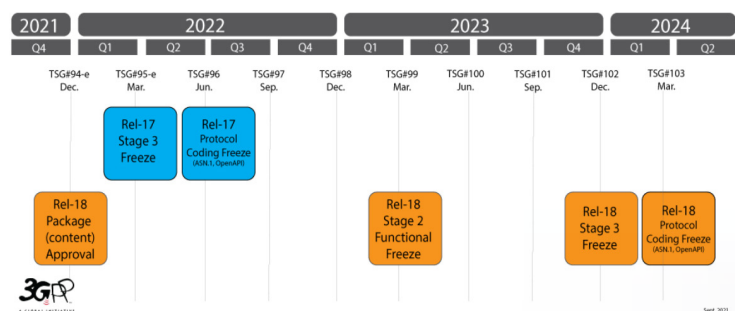


Figure 1 : Calendrier des versions 17 et 18 des spécifications - Source : 3GPP.

Dans ces deux versions les évolutions concernent tant des améliorations de fonctionnalités existantes que des fonctions nouvelles apparaissant à la suite de la multiplication des utilisations de la 5G, notamment dans les différents secteurs d'activité économique.

¹ Source rapport GSA : <https://gsacom.com/technology/5g>.

●●● La version 17 des spécifications

Les améliorations du RAN

Elles portent sur de nombreux thèmes :

- amélioration du *MIMO* avec notamment celle de la gestion des faisceaux radio pour permettre une mobilité encore plus rapide des terminaux ;
- amélioration de la *couverture radio* dans le cas de partage dynamique de spectre avec LTE via notamment une amélioration des performances des canaux de commande ;
- des améliorations en matière de *consommation d'énergie* sont apportées aussi bien aux terminaux mobiles à large bande (eMBB) qu'aux terminaux IoT dans les états de repos, inactifs ou connectés. Elles autorisent, par exemple, une surveillance réduite des ressources radio aux terminaux faiblement mobiles ou aux terminaux situés dans une zone de bonne communication radio ;
- les *services de localisation* mis en œuvre dans la version 16 des spécifications ² font l'objet d'améliorations permettant dans certains cas d'usage, comme l'automatisation des usines, une précision de 20 à 30 cm. Le retard à la transmission de la localisation est également réduit pour rendre possible des applications quasi-temps réel ;
- dans le cas de *l'Internet des objets* et de la *communication à haute fiabilité et faible latence* (URLLC), de nouvelles améliorations sont apportées pour augmenter l'efficacité spectrale et la capacité du système. De plus la possibilité de fournir des services

URLLC dans des bandes de fréquences hors licence est introduite ;

- la *transmission de données à bas débit* à partir d'un dispositif IoT à basse énergie à l'état inactif imposait de réactiver la connexion préalablement établie : pour éviter la procédure de réactivation et réduire la consommation d'un tel dispositif, la version 17 autorise maintenant la transmission des données du dispositif à l'état inactif ;

- pour les *réseaux privés et l'Edge Computing*, la version 17 des spécifications introduit des améliorations dans la gestion de l'authentification des terminaux qui sont autorisés à se connecter à des réseaux privés 5G et des mécanismes de routage permettant d'accéder aux serveurs d'application par le chemin le plus court possible (*session breakout*) ;

Les fonctions nouvelles dans la version 17 des spécifications

Quatre groupes de fonctions nouvelles permettent d'étendre encore les cas d'usage de la 5G.

Les terminaux à capacités réduites (RedCap)

La version 17 des spécifications introduit une nouvelle classe de terminaux dont le niveau fonctionnel requis est situé entre le niveau allégé exigé pour les terminaux fournissant des services de communication du type mMTC ³ et le niveau très élevé requis pour les terminaux de communication URLLC (figure 2). L'objectif est de disposer de terminaux moins complexes que les terminaux standard de la 5G grâce à la réduction du nombre de récepteurs radio, à la réduction de la bande passante des récepteurs et des transmetteurs

² Voir REE N°4/2020 p. 29

³ mMTC : massive machine type communication

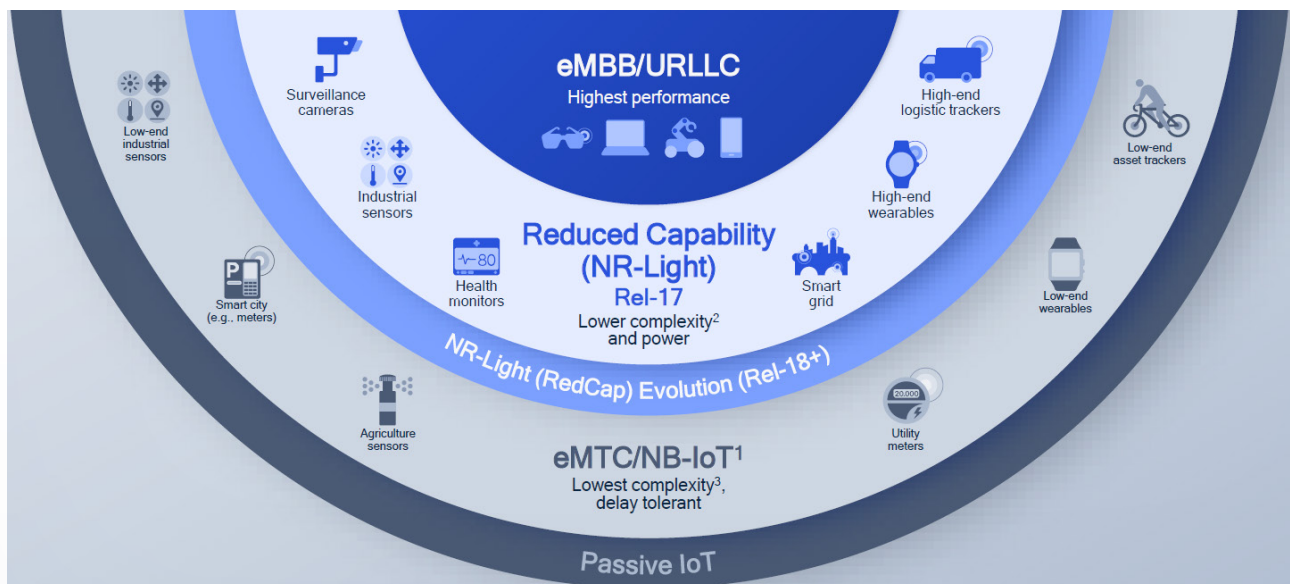


Figure 2 : RedCap dans la gamme des terminaux 5G - Source : Qualcomm.

et à un mode de fonctionnement « half-duplex ». Le coût de ces terminaux devrait s'en trouver réduit et devrait permettre d'étendre l'usage de la 5G à de nouveaux cas.

Les réseaux non-terrestres

La version 17 des spécifications introduit la possibilité de faire appel à des satellites en orbite basse (LEO) ou en orbite géostationnaire (GEO) ou à des plates-formes de haute altitude (des ballons par exemple) pour assurer la communication vers des zones éloignées ou non desservies par des réseaux terrestres. Elle tire profit des analyses techniques menées antérieurement au 3GPP et traite les problèmes posés par l'augmentation de l'affaiblissement et du délai de propagation en boucle résultant de l'altitude des plates-formes ou des satellites, de l'effet Doppler affectant les canaux radio vers les satellites LEO ainsi que du changement rapide des nœuds desservant une communication via ce même type de satellite. Elle fournit un premier ensemble de spécifications pour des services du type NB-IoT ⁴ et LTE-M ⁵.

Les bandes de fréquences au-delà de 52 GHz

Une nouveauté importante est l'extension de la gamme de fréquences dans laquelle la 5G peut fonctionner. Jusqu'à la version 16, la 5G était limitée à la bande 410 MHz à 7,125 GHz et à la bande dite millimétrique 24,25 GHz à 52,6 GHz. A partir de la version 17, le 3GPP considère que la 5G peut fonctionner dans la bande 24,25 GHz - 71 GHz et, moyennant l'augmentation de l'espacement de sous-porteuses jusqu'à 960 kHz, qu'il est possible d'augmenter les bandes passantes utilisables notamment dans la bande des 60 GHz.

Les services diffusés et multicast

Avec la version 17, la fourniture de services de diffusion et de services multicast est beaucoup plus aisée à mettre en œuvre qu'elle ne l'était dans LTE. Plusieurs usages de ces services sont envisageables : diffusion d'information de sécurité publique écrite ou vocale, téléchargement de mises à jour logicielles, diffusion de télévision directe ou de vidéo... Les paquets de données de diffusion peuvent être prioritaires notamment lorsqu'il s'agit de services de sécurité publique. Les données en mode diffusion peuvent être reçues dans tous les états de connexion du terminal (au repos, connecté et inactif) et les données en mode multicast ne le peuvent qu'en mode connecté.

Vers la version 18 des spécifications

En juin 2021, le 3GPP a commencé à discuter de ce que pourrait être la version 18 des spécifications et a retenu à la

fin 2021 une liste de 27 points à étudier ou à spécifier qui pourront être inclus dans la version 18. L'objectif du 3GPP est d'achever les spécifications au 1^{er} trimestre 2024. Cette version vise à la fois à améliorer encore les performances de la 5G et aussi à traiter de nouveaux cas d'usage. L'amélioration des performances devrait porter sur un grand nombre de domaines :

- la poursuite de la réduction de la consommation d'énergie des réseaux 5G ;
- l'amélioration de la couverture en vue d'optimiser les investissements dans le réseau d'accès radio ;
- l'amélioration de la mobilité ;
- l'évolution du MIMO ;
- l'extension des possibilités en matière de diffusion et de multicast ;
- l'amélioration de la précision et des performances énergétiques de la localisation.

Parmi les nouvelles fonctionnalités envisagées on peut noter :

- le perfectionnement des terminaux RedCap afin de réduire à la fois leur coût et leur consommation d'énergie : l'objectif est d'en étendre l'utilisation aux capteurs industriels, à la vidéo-surveillance ou à des accessoires portables (lunettes , montres...) ;
- la meilleure prise en compte des services de réalité virtuelle et de réalité augmentée en leur fournissant simultanément très haut débit et faible latence ;
- le report dans la 5G des fonctions de commande à distance de drones qui existent dans la version 15 des spécifications de LTE et leur amélioration éventuelle ;
- la prise en compte de nouvelles topologies de réseau, comme le relais de communication de véhicule à véhicule ou de véhicule à réseau ou la possibilité d'améliorer l'intégration de l'accès et du lien de raccordement (IAB) en rendant mobile le nœud IAB lui-même ;
- l'utilisation de l'intelligence artificielle (apprentissage) pour améliorer la performance de la couche physique, et pour le pilotage du trafic et son équilibrage dans le réseau.

Les évolutions spécifiées ou planifiées devraient étendre les usages de la 5G : ce ne sont pas les dernières puisque l'on envisage d'ores et déjà deux versions complémentaires des spécifications de 5G Advanced à l'horizon 2027. ■ PC ●●●

4 NB-IoT : Narrow Band Internet of Things

5 LTE_M : LTE for Machine Type Communication

Les projets de fusion thermonucléaire vont-ils manquer de tritium ?

Les projets de fusion pour la production d'électricité reposent essentiellement sur la réaction du deutérium et du tritium dans un plasma à très haute température. Or le tritium, isotope de l'hydrogène, est un élément extrêmement rare et coûteux à fabriquer. Des solutions sont à l'étude, notamment, dans le cadre du projet ITER et de son successeur DEMO, pour réduire la dépendance au tritium. En même temps il sera nécessaire d'accroître la production de cet élément stratégique au niveau mondial face à une demande qui risque d'exploser si cette technologie démontre qu'elle peut atteindre le seuil de rentabilité requis.

Introduction

La fusion thermonucléaire qui porte en elle les espoirs lointains mais réels d'une production d'énergie abondante et bon marché a fait l'objet dans la REE de nombreux articles de fond¹ ou de nouvelles brèves rendant compte des avancées des principaux projets de fusion dans le monde, à commencer par le projet international ITER implanté en France.

La plupart des projets de fusion sont basés sur la réaction D-T des isotopes de l'hydrogène, deutérium (un proton + un neutron) et tritium (un proton + 2 neutrons), dans un plasma à plusieurs dizaines de millions de degrés car c'est la réaction qui possède la section efficace la plus élevée. Même si le seuil de rentabilité consistant à produire plus d'énergie qu'on en consomme, n'a encore été atteint nulle part dans le monde, les résultats expérimentaux, notamment ceux du JET, en accord avec une théorie bien explorée, rendent la communauté scientifique plutôt confiante sur la faisabilité d'un tel procédé, au moins à terme de plusieurs décennies car ces technologies sont lourdes à mettre en œuvre. Le projet international ITER par exemple devrait atteindre et dépasser le seuil de rentabilité au cours de la prochaine décennie.

Aura-t-on assez de tritium pour démarrer ITER ?

Le problème qui est apparu récemment concerne la disponibilité à terme du tritium. Si le deutérium est raisonnablement abondant (1/5000 de l'hydrogène contenu dans les océans) et se négocie à 13 USD le gramme, il en va tout autrement du tritium qui n'existe qu'à l'état de traces à l'état naturel. Le tritium est obtenu dans

les réacteurs nucléaires comme produit de fission à raison de 3 g environ par an et par réacteur. Le tritium ainsi produit n'est pas rejeté au niveau du réacteur, il reste majoritairement dans le combustible pour se trouver dans la solution de produits de fission à l'usine de retraitement. Certains réacteurs en produisent ainsi de petites quantités² mais le tritium n'est pas ou peu récupéré pour l'instant.

Pour pallier cette difficulté, la réponse généralement donnée est que les réacteurs de fusion vont produire du tritium grâce à l'action des neutrons de haute énergie sur les parois de lithium, libérant de l'hélium et du tritium. Mais cette source de tritium recyclé n'interviendra que lorsque des réacteurs comme ITER fonctionneront en vraie grandeur et auront atteint un régime stationnaire de production de cet élément. Le rendement effectif de cette production est lui-même sujet à incertitude puisque celle-ci n'a pu être mise en œuvre et donc mesurée à ce jour et certains prédisent que la production effective de tritium de centrales comme ITER suffira simplement à alimenter les réactions suivantes sans produire d'excédent commercialisable.

La question critique concerne surtout le démarrage d'une centrale aussi importante qu'ITER. L'unique source commerciale actuelle de tritium provient d'une société canadienne (Candu) qui utilise des réacteurs à eau lourde donnant de petites quantités de tritium comme sous-produit. Mais l'entreprise prévoit d'arrêter progressivement ces réacteurs dont plusieurs sont très anciens. Le stock de tritium disponible - estimé à environ 25 kilogrammes aujourd'hui - atteindra son maximum avant la fin de la décennie et commencera à décliner régulièrement au fur et à mesure d'une commercialisation accrue et de la désintégration des stocks (durée de vie du T : 12,3 ans).

² Ce processus intervient par capture aléatoire d'un neutron par l'atome de deutérium pour donner un atome de tritium.

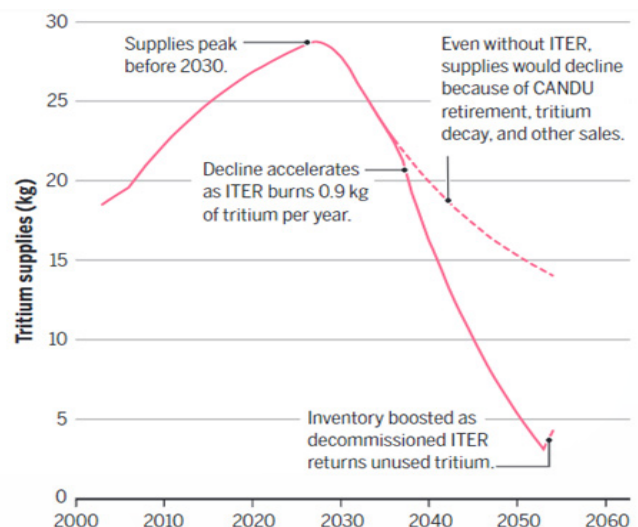


Figure 1 : Evolution du stock mondial de tritium disponible - Source ITER.

¹ Voir par exemple le dossier hors-série de la REE « La fusion thermonucléaire et le projet ITER » en 2016 et plus récemment dans REE 2021-1.

La figure 1 illustre l'évolution du stock mondial de tritium telle qu'anticipée dans une étude ITER de 2018.

Comme on peut le voir, les ressources suffiront probablement pour permettre le démarrage opérationnel d'ITER si celui-ci n'est pas à nouveau retardé³ mais l'installation à elle seule aura consommé, à raison d'un kilogramme par an, la majeure partie du tritium disponible dans le monde, en laissant très peu de tritium disponible pour les réacteurs suivants.

Or les réacteurs d'essai les plus importants, financés par des fonds publics par la Chine, la Corée du Sud et les États-Unis, pourraient avoir besoin de plusieurs kilogrammes chacun ; il en faudra encore plus pour mettre en route DEMO, le futur réacteur successeur d'ITER (1,5 fois plus volumineux) qui est censé assurer le passage d'un réacteur expérimental à un outil de production à vocation industrielle, capable de fournir 500 mégawatts d'électricité au réseau à horizon 2050 (programme Eurofusion).

Les solutions à l'étude

Réduire la quantité de tritium au démarrage

Actuellement les concepteurs de DEMO travaillent à trouver des solutions susceptibles de réduire les besoins en tritium au démarrage. En effet Les réacteurs de fusion ont généralement besoin d'une grande quantité de tritium dans la phase initiale car les conditions propices à la fusion ne se produisent que dans la partie la plus chaude du plasma de gaz ionisés ce qui fait qu'une très faible partie seulement du tritium contenu dans la cuve d'u réacteur Tokamak est consommée. Les chercheurs s'attendent par exemple à ce qu'ITER brûle moins de 1 % du tritium injecté ; le reste se diffusera jusqu'au bord du tokamak et sera entraîné dans le système de recyclage qui élimine l'hélium et les autres impuretés, laissant un mélange de D-T. Les isotopes peuvent ensuite être séparés et réinjectés dans le réacteur. Mais cette opération peut prendre beaucoup de temps.

Une façon de limiter l'apport de tritium initial est de tirer les pastilles de combustible plus profondément dans la zone de combustion du réacteur pour qu'elles soient « brûlées » plus efficacement. Une autre solution consiste à renvoyer les isotopes d'hydrogène directement dans la machine sans les séparer. On obtient ainsi un mélange isotopique imparfait mais qui pourrait suffire.

Contrôler les fuites de tritium

Pour rendre le système durable, les opérateurs devront également contrôler les fuites de tritium. C'est là que le gain peut être le plus sensible. Le tritium a tendance à s'infiltrer dans les parois métalliques du réacteur et à s'échapper par de minuscules interstices mais on a du mal pour l'instant à évaluer dans quelle proportion.

3 Actuellement ITER ne prévoit pas une production positive avant 2035.

La lune, nouvelle source potentielle de tritium

Le tritium est présent en grandes quantités sur la lune. Les 100 000 tonnes que notre satellite est supposé contenir, même si cette estimation est approximative et surestimée, motivent fortement les investisseurs, qu'ils soient privés ou gouvernementaux. Même si la généralisation de la fusion nucléaire n'est pas pour demain, les navettes lunaires ne le sont pas non plus. Mais on peut imaginer que la valeur actuelle de 4 milliards de dollars la tonne de tritium présente une justification suffisante pour des investisseurs à long terme.

Solutions alternatives : se passer du tritium ?

Deux projets de fusion privés ont décidé de simplement renoncer au combustible à base de tritium. TAE Technologies, une start-up californienne, prévoit d'utiliser de l'hydrogène pur et du bore, tandis que la start-up Helion, dans l'État de Washington, fusionnera du deutérium et de l'hélium 3, un isotope rare de l'hélium. Ces réactions nécessitent des températures plus élevées que le couple D-T, mais les entreprises pensent que c'est le prix à payer pour éviter les problèmes liés au tritium.

Ces réactions de fusion alternatives présentent l'avantage supplémentaire de produire moins de neutrons, voire aucun, ce qui évite les dommages matériels infligés au réacteur et la radioactivité que l'approche D-T engendre d'où une durabilité bien meilleure des installations (jusqu'à 40 ans). En revanche le défi est la température de fonctionnement : alors que le couple D-T fusionne à 150 millions de degrés, l'association hydrogène-bore nécessiterait 1 milliard de degrés, une gamme de températures inexplorée aujourd'hui !

Le combustible d'Helion, composé de deutérium et d'hélium 3, requiert « seulement » 200 millions de degrés, grâce à des anneaux de plasma similaires à ceux de TAE, mais comprimés par des champs magnétiques. Malheureusement l'hélium 3, bien que stable, est presque aussi rare et difficile à obtenir que le tritium car les sources commerciales d'hélium 3 dépendent de la désintégration du tritium donc on est ramené au problème précédent !⁴ Mais il semble qu'en ajoutant du deutérium au mélange de combustible, on puisse générer des réactions de fusion D-D qui produisent de l'hélium-3.

Les partisans de la fusion D-T conventionnelle pensent que les réserves de tritium pourraient être accrues en construisant davantage de réacteurs à fission. Les armées du monde entier utilisent le tritium pour augmenter le rendement des armes nucléaires et ont constitué leurs propres stocks de tritium à l'aide de réacteurs commerciaux spécialement construits ou adaptés.

4 Comme pour le tritium, la lune pourrait constituer une source alternative pour l'hélium 3. Voir à ce sujet l'article d'André Deschamps dans REE 2016-5 pp 19-21.

●●● On le voit, la solution du combustible idéal pour les réacteurs de fusion et leur approvisionnement en quantités suffisantes pour satisfaire une demande qui devrait aller croissant, est loin d'être résolue pour l'instant. C'est un des défis clés auxquels il faudra remédier - c'est loin d'être le seul - pour permettre à la fusion de tenir les promesses d'une production d'énergie abondante, bon marché et décarbonée auxquelles l'humanité aspire. ■ **AB et AD**

Record français de production d'électricité à partir d'énergie solaire

Dimanche 7 août 2022, à 14 heures, l'énergie solaire a produit 10 773 MW, un record pour la France. A ce moment-là, le soleil a assuré 26% de la production d'électricité totale, soit à peu près la moitié de la production à base d'énergie nucléaire (22 294 MW).

La figure 1 montre la courbe de charge et le mix énergétique du 7 août 2022. A 14 heures, au moment le plus fort de l'ensoleillement, le mix énergétique était composé de nucléaire (54 %), de solaire (26 %), d'éolien (10 %), d'hydraulique (5 %), de gaz

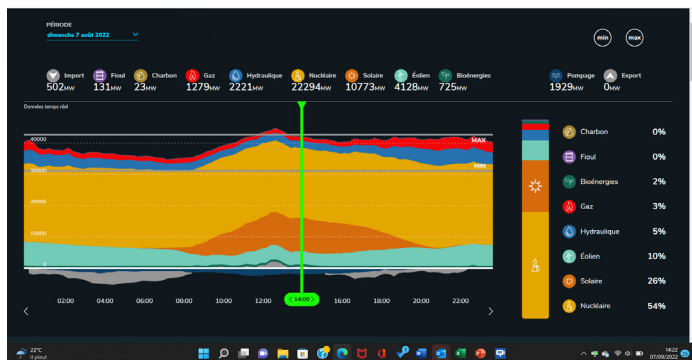


Figure 1 : Courbe de charge et mix énergétique en France, le 7 août 2022 (source RTE).

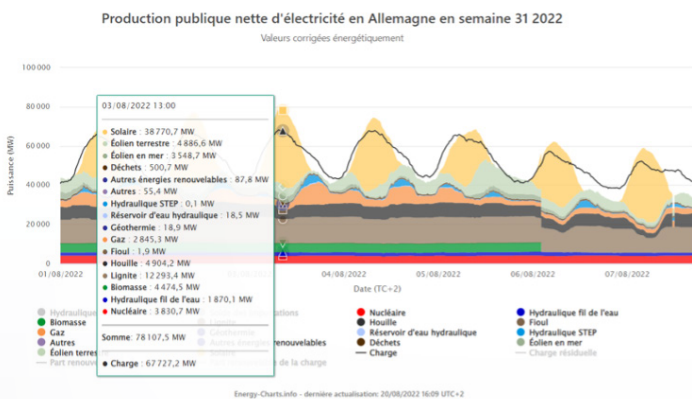


Figure 2 : Courbe de charge et mix énergétique en Allemagne, du 1^{er} au 7 août 2022 (source Fraunhofer).

(3 %) et de bioénergies (2 %). La France importait alors 502 MW, niveau relativement faible.

Ce record illustre la progression constante du parc de panneaux solaires en France. A la fin de l'année 2021, la puissance installée a atteint 14 000 MW (source du SDES : service des données et études statistiques).

Au cours des dernières années, ce parc a connu une très forte augmentation qui s'explique par une hausse du nombre de raccordements, mais aussi par une proportion élevée de raccordements de centrales de fortes puissances. A fin 2022, ce parc de 14 000 MW se compose de 570 000 installations, allant de petites (< 3 kW) à de très grosses (> 250 kW). Ces dernières ne représentent que 2 500 installations (0,4 % du total) mais plus de la moitié (7 700 MW) de la puissance totale installée.

La production d'électricité d'origine solaire photovoltaïque s'est élevée à 14,8 TWh au cours de l'année 2021, en hausse de 11% par rapport à 2020. Elle représente 3,1 % de la consommation électrique française sur cette période.

Ce record français du 7 août 2022 est à relativiser par rapport à la situation en Allemagne. A la même période estivale, la production d'électricité à base d'énergie solaire atteignait près de 40 000 MW soit près de quatre fois plus qu'en France (voir figure 2).

Ainsi le 3 août 2022, l'énergie solaire a produit 38 770 MW d'électricité, représentant la moitié de la production totale d'électricité en Allemagne (78 107 MW), à ce moment-là. ■ **GS**

Energie osmotique : une start-up rennaise affiche ses ambitions

L'utilisation possible de l'énergie osmotique à des fins de production d'électricité a déjà fait l'objet d'une actualité dans le numéro 2018-5 de la REE. Les performances attendues restaient cependant modestes. De nouvelles innovations liées aux nanotechnologies permettent à la start-up rennaise Sweetch Energy d'envisager une production économiquement viable à l'échelle industrielle. Une centrale pilote devrait être installée dans le delta du Rhône vers la fin de l'année 2023.

Introduction

L'énergie osmotique désigne l'énergie exploitable à partir de la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce, les deux natures d'eau étant séparées par une membrane. Lorsqu'il s'agit de membranes échangeuses d'ions, elles laissent transiter des ions de part et d'autre de la membrane pour rétablir l'équilibre des potentiels chimiques. Il s'agit ensuite de convertir ces cou-

rants ioniques en courant électrique avec un système d'électrodes. On estime que, d'un point de vue théorique, la totalité des estuaires et deltas du globe produisent 30 000 TWh par an d'énergie osmotique soit plus que la consommation mondiale d'électricité.

Jusqu'à présent, la principale technologie envisagée pour l'utilisation de l'énergie osmotique était l'électrodialyse inverse ou RED (pour *Reverse Electrodialysis*). Les puissances produites n'excédaient pas 2W/m² de membrane, la principale limitation étant liée à la résistance interne des membranes échangeuses d'ions.

Mais l'apport des nanotechnologies va changer radicalement la donne. Le point de départ de cette (r)évolution provient des travaux de Lydéric Bocquet, directeur de recherches au CNRS et professeur attaché à l'École normale supérieure, et de son équipe¹ à travers un article publié dans *Nature* en février 2013² et un brevet déposé dès octobre 2012³.

L'avancée technologique

La première phrase figurant dans le dépôt de brevet résume bien la portée du dispositif : « La présente invention concerne un dispositif pour la production d'énergie électrique comprenant deux cellules destinées à contenir deux solutions de concentration différente en au moins un soluté et séparées par au moins une membrane de séparation dans laquelle sont aménagés des canaux, chacune des cellules étant équipée d'une électrode destinée à être en contact avec la solution que contiendra ladite cellule, caractérisé en ce que les parois des canaux sont constituées d'un matériau choisi parmi le nitrure de bore, le carbone dopé avec du bore, du nitrure de bore dopé avec du carbone, ou tout autre mélange des éléments bore, carbone et azote, ainsi qu'un procédé de production d'énergie électrique mettant en œuvre un tel dispositif ».

La nouveauté introduite par le brevet réside dans le fait que les canaux aménagés dans la membrane de séparation entre les deux solutions sont des nanotubes que les auteurs désignent sous le terme de t-BNNT (*transmembrane Boron Nitride NanoTube*). Le principe du dispositif est résumé par la figure 1.

Les performances obtenues, dont certaines sont reproduites sur la figure 2, constituent une avancée décisive par rapport aux solutions préexistantes et l'impact du pH des solutions utilisées a été clairement mis en évidence. Cette avancée s'explique en partie par le

1 A l'époque des publications mentionnées, Lydéric Bocquet était professeur à l'Université Lyon 1.

2 A. Siria et al., "Giant osmotic energy conversion measured in a single transmembrane boron nitride nanotube", *Nature*, Vol 494, 28 Feb. 2013, pp 455-458.

3 Brevet intitulé « Procédé et dispositif de production d'énergie », déposé le 16 Oct. 2012 à l'INPI par l'Université Claude Bernard Lyon 1 et le CNRS sous le numéro 2996780 ; inventeurs : Lydéric Bocquet, Anne-Laure Bianco, Philippe Poncharal et Alessandro Siria.

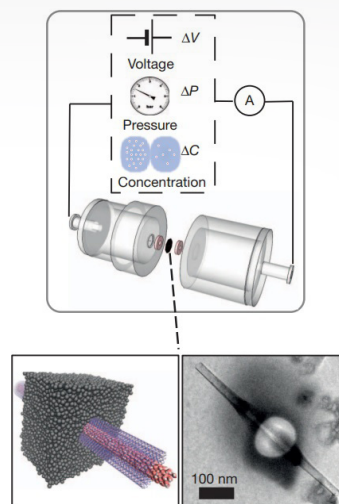


Figure 1 : En haut : schématisation du dispositif expérimental pour réaliser les mesures à travers un nanotube. En bas : esquisse d'un t-BNNT (à gauche) et sa réalisation expérimentale imagée au microscope électronique (à droite). Figure extraite de l'article de *Nature* déjà cité dans la note 2.

fait que, malgré un diamètre des tubes (de taille nanométrique) immense par rapport aux tailles des ions, le nanopore reste sélectif. Les flux ioniques générés sont ainsi bien supérieurs dans des « gros » tubes (nanotubes) que s'il fallait utiliser une maille à taille ionique (picomètre). On espère d'un point de vue opérationnel des densités de puissance d'au moins plusieurs dizaines de W par m² de membrane soit un gain d'un facteur entre 10 et 100 par rapport aux solutions actuelles.

Une première centrale pilote

La start-up Sweetch Energy travaille depuis 2015 à l'exploitation des travaux de laboratoire précédemment évoqués. Sa technologie baptisée INOD (pour *Ionic Nano Osmotic Diffusion*) utilise désormais des matériaux biosourcés. Elle espère devenir un leader dans la production de cette énergie 100% renouvelable et potentiellement bon marché issue des travaux de la recherche publique française. En partenariat avec la Compagnie Nationale du Rhône, une centrale pilote devrait être installée d'ici à la fin 2023 dans le delta du Rhône. Mais sans attendre les résultats de cette expérimentation à l'échelle industrielle, Sweetch Energy a signé le 16 Juin 2022 un accord de coopération avec EDF Hydro, la filiale hydroélectrique d'EDF pour le développement de cette source d'énergie en France et à l'étranger. ■ JC

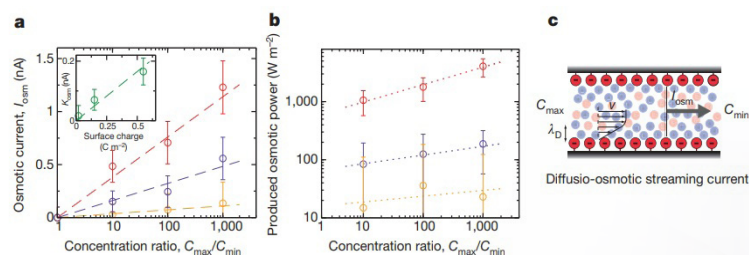


Figure 2 : a : courant osmotique en fonction du rapport de concentration en sel entre les 2 solutions. La courbe jaune (resp. bleue, resp. rouge) est pour un pH de 5,5 (resp. 9,5, resp. 11). b : densité de puissance correspondante pour les 3 pH envisagés. c : schématisation de l'écoulement osmotique lié à la différence de concentration saline. Figure extraite de l'article de *Nature* déjà cité dans la note 2.