

Le traitement parallèle : la voie vers la commercialisation de l'énergie de fusion

Par : Sally M. Benson et Costa Samaras

Energy Team, Bureau de la politique scientifique et technologique, Bureau exécutif du président

Quoi?! Une voie vers la commercialisation de l'énergie de fusion ? L'énergie de fusion – qui alimente les étoiles – n'a pas encore été développée ici sur Terre d'une manière qui produit plus d'énergie qu'il n'en faut pour soutenir la réaction de fusion. Pas encore. Mais comme nous l'avons entendu lors du Sommet sur la fusion de la Maison Blanche[1] en mars, l'année écoulée a été une année record pour la fusion – avec des réalisations techniques majeures dans la technologie de fusion qui se succèdent rapidement :

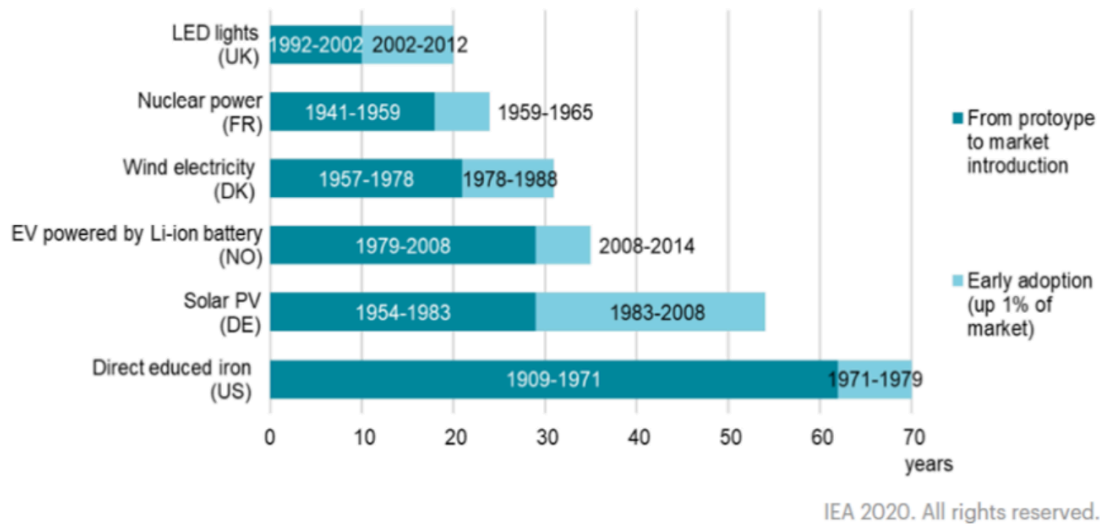
- une société de fusion américaine financée par des fonds privés a fait la démonstration de son prototype d'aimant supraconducteur à haute température de 20 teslas, ouvrant la voie à une nouvelle approche compacte et à haut champ de l'énergie de fusion commerciale[2],
- le premier aimant solénoïde central a été livré pour l'expérience de fusion collaborative internationale ITER, illustrant la capacité de fabrication à l'échelle de la fusion de l'industrie américaine[3],
- le Joint European Torus (JET) au Royaume-Uni a doublé son record vieux de 24 ans avec une impulsion de cinq secondes à haute puissance, limitée uniquement par le matériel expérimental et non par la stabilité du plasma[4],
- Le National Ignition Facility (NIF) du Lawrence Livermore National Laboratory en Californie a atteint un rendement énergétique huit fois supérieur à son précédent record et a atteint le point d'allumage, nous offrant une deuxième approche de fusion avec des performances physiques similaires à celles du tokamak[5].
- Le tokamak supraconducteur expérimental avancé (EAST) chinois a soutenu des réactions de fusion pendant 17 minutes à 126 millions de

degrés Fahrenheit, soit cinq fois plus chaud que le soleil[6].

Anticipant ces percées à venir, le Comité consultatif scientifique sur l'énergie de fusion[7] et les Académies nationales des sciences et de l'ingénierie[8] ont recommandé au gouvernement d'accélérer ses programmes de recherche et développement pour développer une usine pilote de fusion. Les innovateurs et les investisseurs du secteur privé se sont mis au travail – levant plus de 4 milliards de dollars au total, dont environ 2 milliards de dollars rien qu'en 2021, dans le but de faire des démonstrations de validation de concept avant la fin de la décennie.

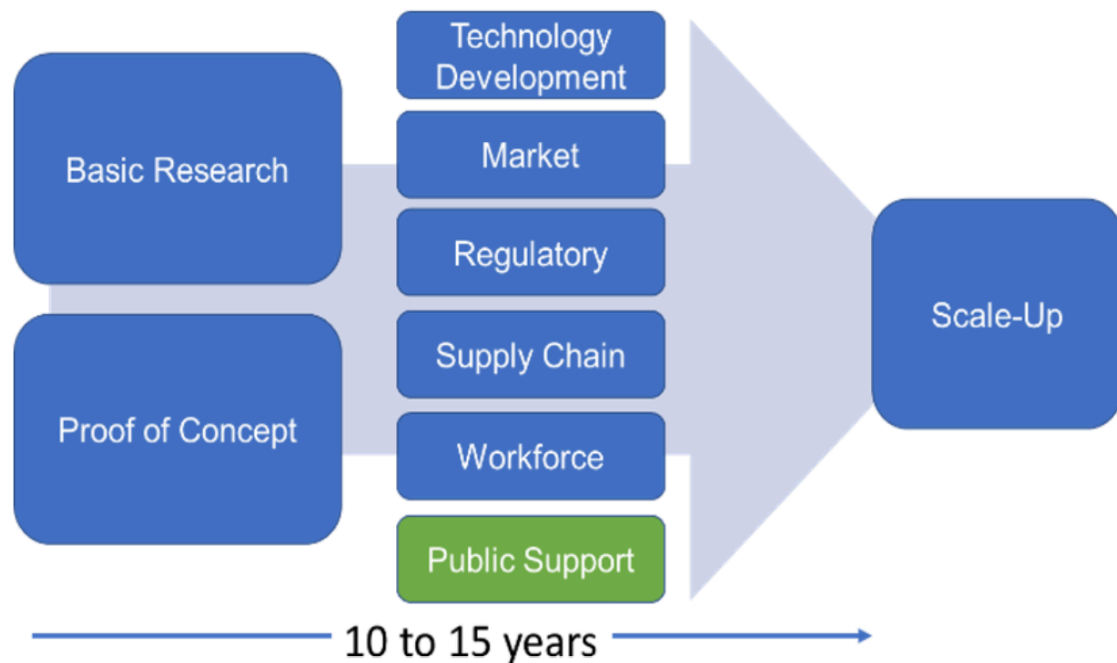
Au Sommet sur la fusion à la Maison-Blanche co-organisé par le Bureau de la politique scientifique et technologique et le ministère de l'Énergie, le secrétaire Granholm a annoncé la création d'une initiative à l'échelle du département pour lancer un plan d'action décennal audacieux pour accélérer le développement de l'énergie de fusion. Cette semaine, Scott Hsu, le chef de la nouvelle initiative, organise un atelier pour obtenir des commentaires sur les partenariats public-privé, un élément clé de la stratégie décennale. L'un des sujets est de savoir comment faciliter la commercialisation – de sorte qu'une fois que la technologie est prête à être mise en œuvre, elle puisse être mise à l'échelle rapidement.

Les technologies énergétiques sont notoirement lentes à passer de la preuve de concept à la commercialisation, en moyenne d'environ 30 à 50 ans[9] (Figure 1). Dans un monde qui lutte contre les dangers du changement climatique et où la demande d'énergie des économies en développement du monde entier augmente, nous n'avons tout simplement pas le temps d'attendre. Nous avons besoin de toutes les technologies propres que nous pouvons obtenir, dès que cela est humainement possible. La fusion est l'une des technologies essentielles qui, si elle réussit, changerait la donne pour résoudre ces problèmes.



Graphique 1. Temps écoulé entre la validation de principe et la commercialisation précoce des technologies énergétiques (AIE, 2020).

Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles le chemin vers la commercialisation de la technologie est souvent lent : la R&D nécessaire à la maturation de la technologie et à la réduction des coûts ; élaborer des exigences réglementaires et des mécanismes de conformité ; développement des marchés ; le développement de la chaîne d'approvisionnement ; le développement de la main-d'œuvre ; et le soutien du public à l'adoption de la technologie. Tous ces éléments doivent être en place avant que la mise à l'échelle rapide puisse commencer. Historiquement, ces activités se déroulaient de manière séquentielle, ce qui explique pourquoi le long chemin de la preuve de concept à la commercialisation est si lent. Si nous voulons réussir à faire en sorte que la fusion soit lancée plus rapidement, nous devons faire les choses différemment. Nous devons effectuer toutes ces étapes critiques simultanément (Figure 2). Tout comme un ordinateur qui exécute plusieurs processeurs simultanément pour gérer différentes parties d'un gros problème, nous pouvons utiliser le traitement parallèle pour accélérer la commercialisation de l'énergie de fusion. En d'autres termes, nous devons prendre les multiples mesures nécessaires aujourd'hui pour réussir le développement de l'énergie de fusion, afin d'être prêts à passer à l'échelle dès que la technologie répondra aux normes de sécurité, de coût, de performance et de fiabilité attendues des nouvelles technologies énergétiques. Cette semaine, le DOE recueillera les commentaires des parties prenantes sur les mesures de concrétisation qui peuvent être prises pour poursuivre cette stratégie de traitement parallèle, et l'administration se lancera dans l'élaboration d'un plan décennal pour la commercialisation de la fusion.



Graphique 2. Accélérer la commercialisation de l'énergie de fusion.

Développement du marché

Pour que les nouvelles technologies gagnent des parts de marché : les applications de la technologie doivent être développées, le coût auquel elles peuvent être développées doit les rendre attrayantes pour les investisseurs afin de justifier la construction des usines et des chaînes d'approvisionnement nécessaires à leur mise à l'échelle, les clients doivent vouloir les acheter et une offre suffisante doit être disponible pour répondre à la demande croissante. Pour la fusion, cela signifie penser au-delà de la production d'électricité exclusivement, pour inclure les utilisations finales qui bénéficient d'une source d'électricité et de chaleur 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Des applications telles que la production d'hydrogène, le dessalement de l'eau, la capture directe du CO_2 dans l'air, la production d'électrocarburants et de produits chimiques sont toutes de bons candidats pour l'énergie de fusion. Il est maintenant temps de commencer à imaginer et à développer les applications de l'énergie de fusion qui contribueront à la croissance rapide du marché.

Cadres réglementaires

La mise en place d'un cadre réglementaire et de processus appropriés pour autoriser la construction et l'exploitation est essentielle au déploiement et à la mise à l'échelle réussis des installations d'énergie de fusion. Nous avons besoin de règlements qui offrent un degré élevé de protection aux travailleurs, au public et à l'environnement. Dans le même temps, les

processus d'obtention des permis pour l'implantation, la construction et l'exploitation doivent être prévisibles et suffisamment rapides pour encourager un déploiement à grande échelle dans les délais nécessaires pour faire face à la crise climatique. La Commission de réglementation nucléaire sollicite actuellement les commentaires des parties prenantes pour qu'elles donnent leur avis sur l'élaboration d'une approche de réglementation de l'industrie de la fusion, reconnaissant que la fusion n'est pas une technologie, mais un processus physique. Tout comme la combustion, il existe de nombreuses façons pour la fusion de se produire. Il existe différents combustibles qui peuvent être utilisés pour la fusion ; Par exemple, la fusion peut se faire par réaction deutérium-tritium, ou une réaction deutérium-deutérium, ou une réaction bore-hydrogène. La fusion peut également se faire à l'aide de différentes technologies : les tokamaks, les stellarateurs, les configurations de champ inversé et bien d'autres sont recherchés par les innovateurs d'aujourd'hui. Éviter une approche unique qui ne tient pas compte des différentes caractéristiques et des risques des différentes approches offrira la flexibilité nécessaire pour soutenir la mise à l'échelle rapide des installations d'énergie de fusion. Mais la liste des problèmes réglementaires ne s'arrête pas là. Nous devons commencer à travailler à l'harmonisation des normes internationales en matière de licences et de processus d'octroi de permis pour soutenir les marchés d'exportation, y compris en intégrant les mesures de sauvegarde et de non-prolifération appropriées pour étayer les réglementations en matière de contrôle des exportations.

Chaînes d'approvisionnement

De nos jours, nous sommes tous parfaitement conscients de la vulnérabilité des chaînes d'approvisionnement aux perturbations géopolitiques, aux pandémies et aux pénuries de main-d'œuvre. C'est pourquoi l'administration Biden-Harris a pris des mesures^[10] pour sécuriser les chaînes d'approvisionnement pour une transition solide vers une énergie propre. La sécurité de la chaîne d'approvisionnement est également un enjeu clé pour la commercialisation de la fusion. Par exemple, une voie vers la fusion est rendue possible par des aimants supraconducteurs à haute température fabriqués avec l'yttrium, un élément de terres rares. Vous ne savez peut-être pas ce qu'est l'yttrium, mais vous devez savoir que nous importons près de 100 % de notre consommation d'yttrium d'un seul pays. Nous importons également 100 % du niobium utilisé pour générer les champs magnétiques pour d'autres voies de fusion. Des supraconducteurs à haute température à l'électronique de puissance haute tension, les États-Unis sont beaucoup trop

dépendants des chaînes d'approvisionnement avec des points de défaillance uniques. Au fur et à mesure que la technologie de fusion se développe, nous devons également identifier simultanément les vulnérabilités et les goulots d'étranglement de la chaîne d'approvisionnement, construire une chaîne d'approvisionnement résiliente pour la fusion, construire une base de fabrication de fusion solide aux États-Unis et établir des partenariats internationaux pour diversifier la production de matériaux et de composants critiques. La fusion peut faire partie d'un avenir énergétique propre fabriqué en Amérique, et nous devons construire les chaînes d'approvisionnement sécurisées qui sous-tendent la transition vers une énergie propre.

Personnel

La fusion offre la possibilité d'une toute nouvelle industrie propre, avec le potentiel d'emplois bien rémunérés qui conçoivent, construisent, exploitent et entretiennent une nouvelle source d'énergie propre pour les États-Unis et le monde. Cette main-d'œuvre doit ressembler à l'Amérique et être diversifiée, équitable et inclusive afin que chacun ait une chance de participer. L'augmentation des investissements multidisciplinaires pour former une main-d'œuvre diversifiée en matière de recherche et de technique en fusion permettra aux États-Unis de maintenir leur leadership technologique. Capturer une étoile dans une bouteille avec de l'énergie de fusion pour aider à résoudre la crise climatique a le potentiel d'enthousiasmer toute une nouvelle génération d'étudiants et de travailleurs américains de toutes compétences. Le pays bénéficiera si cette fois-ci, tout le monde est accueilli, inclus et soutenu. Cette nouvelle main-d'œuvre de fusion a également besoin d'installations expérimentales de pointe aux États-Unis avec l'équipement de pointe nécessaire pour résoudre les défis restants. De la main-d'œuvre aux installations, en passant par les centrales à fusion, il est temps de construire.

Soutien du public

Nous devons mettre en place la bonne technologie de fusion, et avec l'expertise inégalée de l'écosystème scientifique et entrepreneurial américain, nous le ferons. Mais il ne suffit pas d'utiliser la bonne technologie. L'adoption et le déploiement réussis de l'énergie de fusion nécessitent de gagner la confiance des communautés dès le début. Cela commence par faire connaître les avantages de la fusion aux communautés, écouter et répondre aux préoccupations de la communauté avec des solutions réalisables. Il faut des partenariats et un nouveau pacte social pour permettre aux

communautés de s'exprimer, de participer à cette nouvelle industrie et d'en bénéficier. Et cela nécessite d'intégrer la justice environnementale dès le début d'un développement technologique, plutôt qu'à la fin. Une approche inclusive garantira que les erreurs néfastes du développement des technologies et des infrastructures passées ne se répètent pas et que chaque communauté puisse bénéficier d'une transition vers une énergie propre. C'est à cela que ressemble l'innovation en matière d'énergie propre pour tous, et le déploiement des technologies existantes tout en innovant de manière agressive pour l'avenir représente la voie la plus rapide et la plus équitable vers une économie à émissions nettes nulles aux États-Unis. L'énergie de fusion peut jouer un rôle décisif dans cette transition vers l'énergie propre, si nous agissons avec audace aujourd'hui.

###

[1] La Maison Blanche (2022). Compte rendu du sommet de la Maison-Blanche sur le développement d'une vision décennale audacieuse pour l'énergie de fusion commerciale. <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/04/19/readout-of-the-white-house-summit-on-developing-a-bold-decadal-vision-for-commercial-fusion-energy/>

[2] MIT (2021). Le projet conçu par le MIT réalise une avancée majeure vers l'énergie de fusion. <https://news.mit.edu/2021/MIT-CFS-major-advance-toward-fusion-energy-0908>

[3] ITER (2021). 1ère livraison célébrée des deux côtés de l'Atlantique. <https://www.iter.org/newsline/-/3653>

[4] Gibney, E. (2022). Un réacteur à fusion nucléaire bat un record d'énergie. <https://www.nature.com/articles/d41586-022-00391-1>

[5] Laboratoire national Lawrence Livermore (2021). L'expérience du National Ignition Facility place les chercheurs au seuil de l'allumage par fusion. <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-experiment-puts-researchers-threshold-fusion-ignition>

[6] Gamillo, E. (2022). Le soleil artificiel de la Chine vient de battre le record de la plus longue fusion nucléaire soutenue. <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/chinas-artificial-sun-reactor-broke-record-for-nuclear-fusion-180979336/>

[7] Comité consultatif des sciences de l'énergie de fusion (FESAC) (2020).
Alimenter l'avenir : fusion et plasmas.
https://science.osti.gov/-/media/fes/fesac/pdf/2020/202012/FESAC_Report_2020_Powering_the_Future.pdf

[8] Académies nationales des sciences, de l'ingénierie et de la médecine
(2021). Amener la fusion sur le réseau américain.
<https://nap.nationalacademies.org/catalog/25991/bringing-fusion-to-the-us-grid>

[9] AIE (2020). Innovation en matière d'énergie propre.
<https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>

[10] DOE (2022). Sécuriser la chaîne d'approvisionnement en énergie propre
de l'Amérique, <https://www.energy.gov/policy/securing-americas-clean-energy-supply-chain>