



La crédibilité de la fusion nucléaire pour la transition énergétique

Gaspard JULIER

École de technologie supérieure

Université du Québec

JULG02119804

gaspard.julier.1@ens.etsmtl.ca

Montréal, le 19 juin 2021



Gaspard Julier, 2021

RÉSUMÉ

La fusion nucléaire nécessite des conditions de températures très élevées. De véritables défis technologiques sont à surmonter avant de produire de l'électricité grâce à la fusion nucléaire. ITER est le projet le plus avancé actuellement, il s'agit d'un titanesque projet public international. À côté de ça des petites start-ups cherchent à créer des réacteurs plus petits et plus abordables. La démonstration de la faisabilité économique de la production électrique est quant à elle pas attendue avant 2050. La fusion ne fera donc pas significativement partie du mix électrique mondiale avant 2080. À cet horizon-là la fusion apportera une source d'énergie avec de grandes réserves de combustibles, un faible impact carbone, sécuritaire et socialement responsable. La disponibilité des ressources en combustible et sa non-contribution à la prolifération d'armes nucléaires en font une énergie dont chaque pays peut disposer tout assurant leur indépendance énergétique. Cependant la fusion nucléaire ne répond pas à la transition énergétique à court-terme, elle ne réduira pas les dommages provoqués avant son arrivée. Au contraire la fusion ne doit pas être un prétexte pour ne pas agir aujourd'hui. Et enfin il est tout à fait possible que la fusion nucléaire ne soit jamais viable économiquement.

Mots-clés:

Fusion nucléaire, Transition énergétique, ITER, Mix électrique

NOMENCLATURE

Symboles utilisés

GES : Gaz à effet de serre

Tep : Tonne équivalent pétrole

PV : Photovoltaïque

IDH : Indice de développement humain

INTRODUCTION

Avec la conjugaison de la croissance de la population et de la croissance de la consommation d'énergie par personne le monde se dirige vers une consommation d'énergie plusieurs fois supérieure en 2100 par rapport à celle de 2020. La raréfaction des matières premières et la lutte contre le réchauffement climatique amènent l'humanité à trouver de nouvelles solutions pour produire son énergie. Pour répondre à ces points précédents et l'augmentation de la demande, l'utilisation de la fusion nucléaire pour la production électrique semble prometteuse.

L'objectif est ici de comprendre s'il est raisonnable de parier sur la fusion nucléaire pour fournir en électricité l'humanité. Il s'agit de faire un état de l'art de la fusion nucléaire, d'identifier les principaux obstacles à surmonter et de faire un point sur l'avancement des projets actuels et le calendrier de la technologie. Ensuite une discussion prendra place sur quelle sera la place de la fusion dans le mix électrique et quelles sont les limites de sa contribution à l'humanité.

ETAT DE L'ART DE LA FUSION NUCLEAIRE

LA FUSION NUCLÉAIRE

La fusion est une réaction nucléaire. Elle est présente naturellement au cœur des étoiles comme le soleil. Les rayons solaires frappant la Terre sont donc le résultat de fusions nucléaires.

La fusion nucléaire est fondamentalement différente de la fission nucléaire. La fission nucléaire consiste à casser un noyau lourd pour créer des atomes plus légers. Les réacteurs nucléaires produisant de l'électricité dans le monde utilisent de l'uranium pour faire de la fission. À l'inverse la fusion consiste à fusionner des atomes légers pour créer un atome plus lourd. La masse des produits étant plus faible que la masse des réactifs cette différence est transformée en énergie par la formule $E=mc^2$ [1]. La figure 1



suivante présente la réaction de fusion du deutérium et du tritium. L'atome d'hélium formé de 2 protons et 3 neutrons n'est pas stable, il va éjecter un de ces neutrons.

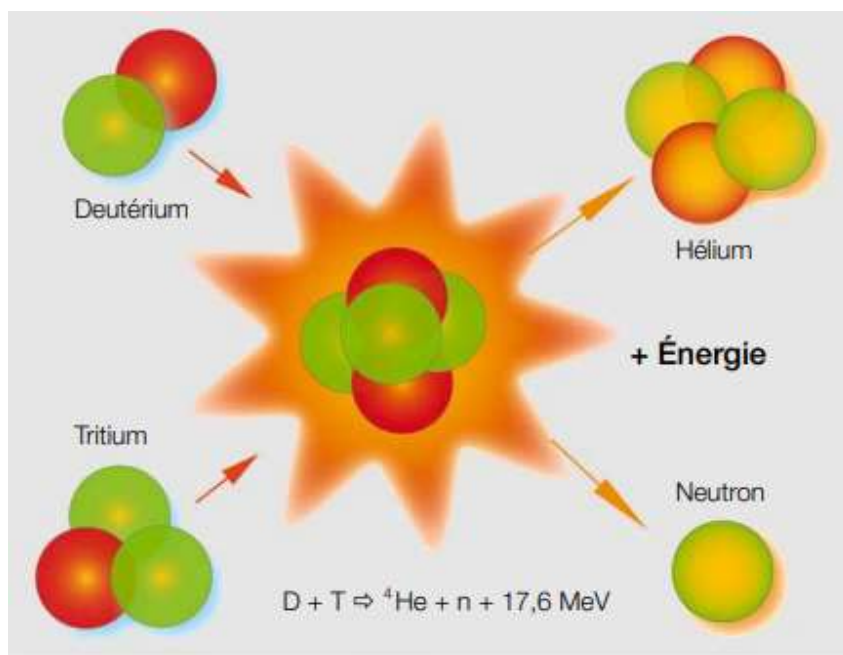


Figure 1 : Fusion du deutérium et du tritium, EPFL[2]

Pour que la réaction de fusion se fasse il faut que les atomes légers soient dans des conditions spécifiques. Plusieurs combinaisons de combustibles sont possibles pour avoir une réaction nucléaire. Selon la nature des réactifs les contraintes de températures et de pressions nécessaires pour enclencher la réaction vont être différentes. Pour la production d'électricité il est primordial d'avoir le meilleur gain possible, c'est-à-dire le meilleur rapport de l'énergie récupérée sur l'énergie consommée. Plus la pression et la température demandées vont être élevées plus l'énergie consommée pour lancer la réaction de fusion sera grande. La fusion du deutérium et du tritium est la combinaison la plus prometteuse, elle permet de récupérer une grande énergie tout en nécessitant des conditions physiques relativement faibles. [2]

La fusion du deutérium et du tritium nécessite de rapprocher les deux noyaux alors qu'ils se repoussent naturellement. Pour les forcer à se rapprocher il faut leur transmettre une grande excitation. Cette fusion nécessite une température de l'ordre de 200 millions de °C [1]. Le deutérium et le tritium sont également mis sous la pression de seulement un millionième de la pression atmosphérique. Un courant électrique va être injecté dans le mélange ionisant les éléments et créant un plasma. Les noyaux alors débarrassés de leurs électrons vont fusionner entre eux dégageant de l'énergie sous forme de chaleur [2]. La suite du processus pour arriver à la génération d'électricité est ensuite la même que pour les centrales thermiques ou à fission. La chaleur va passer par un ou plusieurs circuits de fluide caloporteur, ce même fluide va entraîner une turbine qui reliée à un alternateur va produire de l'électricité [2]. Au-delà de la simplicité apparente au premier abord de la réaction, celle-ci nécessite des conditions physiques extrêmes pour le réacteur. Ce sont ces conditions qui amènent plusieurs obstacles technologiques avant d'atteindre la production d'électricité.

LES CONTRAINTES TECHNOLOGIQUES

Le développement de la fusion nucléaire pour la génération d'électricité a plusieurs obstacles technologiques majeurs que les chercheurs et les ingénieurs cherchent actuellement à résoudre. Ces problèmes sont pour la plupart dus à la très grande chaleur atteinte dans l'enceinte du réacteur. Dans cette partie l'étude se limitera aux réacteurs à confinement magnétique, les autres technologies de confinement sont écartées car moins développées.

En effet aucun matériau ne résiste à ces températures-là. La solution est de faire en sorte que le plasma ne soit pas en contact avec les parois. Pour cela le plasma va être en lévitation entre les parois grâce à l'utilisation d'un champ magnétique. Celui-ci était à l'origine créé par des bobines en cuivre mais les progrès en supraconductivité font que les aimants supraconducteurs sont aujourd'hui utilisés. Les aimants supraconducteurs sont régulièrement espacés et placés en série afin de garantir le champ magnétique voulu [2]. Pour avoir cette uniformité la réaction a lieu dans une pièce torique appelée tokamak.





Pour réduire la transmission de chaleur entre le plasma et les parois par conduction ou convection la réaction a lieu sous vide. Il règne alors dans le Tokamak seulement un millionième de la densité atmosphérique [1].

L'obstacle suivant concerne le chauffage du combustible. Le courant passant dans le plasma (nécessaire à l'ionisation) ne suffit pas à chauffer par effet Joule, la résistance est faible mais non négligeable cependant la résistivité baisse avec la température. Le chauffage par effet Joule ne suffit donc pas pour atteindre les températures requises [2].

Une des solutions est de chauffer le plasma avec des micro-ondes. Les particules présentes dans le plasma ont des fréquences de résonance spécifiques. La puissance portée par l'onde à la bonne fréquence est transmise à la particule selon le même principe que les fours à micro-ondes.

Un procédé complémentaire de chauffage est l'injection de matière. Cela consiste à injecter dans le plasma des particules neutres à très grande vitesse. De cette manière l'énergie du faisceau va être transmise au plasma par collision.

Enfin un des derniers problèmes qui a trait à la physique pure est le comportement des plasmas. Les turbulences du plasma de deutérium-tritium sont en effet pour l'instant mal compris. Une meilleure compréhension de ces phénomènes permettrait un meilleur gain énergétique.

Ces obstacles technologiques font que l'exploitation économique d'un réacteur à fusion n'est pas viable aujourd'hui. De gros budgets sont dépensés en recherche pour surmonter ces problèmes, il y a notamment des progrès notables sur les aimants supraconducteurs. Les différentes solutions de recherche à ces obstacles sont testées dans le cadre de différents projets de réacteur présentés à la suite. Le calendrier est quant à lui dicté par les progrès de la recherche dans ces domaines-là.

L'AVANCEMENT DES TECHNOLOGIES ET LE CALENDRIER

Le projet ITER

Les solutions à ces obstacles technologiques vont être testées à travers le plus gros projet de fusion nucléaire à travers le monde, ITER. Ce réacteur nucléaire est en phase de construction à Cadarache dans le sud de la France. Il est le fruit d'une collaboration scientifique et d'un financement mondial, incluant l'Europe, les États-Unis, le Japon, la Corée du Sud, l'Inde, la Russie et la Chine. L'objectif d'ITER est de valider la faisabilité scientifique et technologique d'un réacteur à fusion nucléaire. Un des objectifs principaux en plus de pouvoir étudier le comportement d'une grande quantité de plasma et de réaliser un gain d'énergie conséquent. La puissance injectée est de 50 MW et il est attendu une puissance produite de 500 MW, soit un facteur de gain de 10 [2]. Ce réacteur n'est en revanche pas un démonstrateur pour la production d'électricité. Le temps de fusion du plasma de quelques minutes ne permet pas de récupérer l'énergie de la fusion pour entrainer une turbine. La fusion de quelques minutes sera cependant suffisante pour explorer le régime encore inconnu de chauffage du plasma par ses propres réactions de fusion, permettant d'avoir un meilleur gain.

ITER promet de faire un grand pas en avant en matière de performances comparé aux réacteurs expérimentaux précédents. Pour la technologie de fusion par confinement magnétique le réacteur le plus performant précédent avait seulement atteint une puissance de sortie de 16 MW avec un gain de 0,67 donc une perte [3].

Il est important de noter que dans l'ensemble des technologies de fusion nucléaire une seule a à ce jour réussi à produire plus d'énergie que d'énergie consommée. Il s'agit de la technologie de confinement inertiel par laser. Le National Ignition Facility (NIF) du Lawrence Livermore National Laboratory a annoncé dans la revue Nature [4] avoir réussi en 2014 à obtenir un facteur de gain de 1,7. Cette étape est encourageante mais il est important de noter que cette expérience était à toute petite échelle environ 1 cm cube. La technologie de chauffage ici présente consiste à utiliser des lasers pour exciter la matière. Ce concept est assez différent de l'utilisation de chauffage par micro-onde et injection de matière que ITER vise. Toute technologie de fusion nucléaire confondue ITER promet une véritable avancée en performance de gain.

Des start-ups pour diversifier les approches

ITER n'est pas le seul projet de réacteur expérimental avec des objectifs de gains énergétiques. ITER a par son envergure un temps relativement long avant l'opération (2035 pour le premier plasma deutérium-tritium). Frustrées par la lenteur du projet ITER les compagnies privées tentent d'autres approches. Ces projets plutôt de l'ordre de 100 MW (cinq fois moins que ITER) vont être construits dans les prochaines années.





Jeff Bezos a annoncé en juin 2021 le financement de la construction d'un réacteur à fusion près de Londres [5]. Ce projet de 400 millions de dollars vise 2025 comme date d'opération, il s'agit d'un partenariat entre l'entreprise canadienne General Fusion et l'autorité publique UK Atomic Energy Authority. La technologie retenue ici est de démarrer le processus de fusion par des pistons pneumatiques qui vont comprimer le plasma. Cette technologie a l'avantage de déjà exister dans l'industrie.

D'autre part le MIT et la compagnie privée Commonwealth Fusion Systems se sont associés pour construire SPARC un réacteur à fusion nucléaire [6]. D'une puissance estimée à 100 MW son innovation tient par l'utilisation d'aimants supraconducteurs récents et performants.

Ces multiples projets sont une aubaine pour la recherche d'une fusion nucléaire viable car comme le dit Greenwald chercheur au département des plasmas du MIT [6] « Fusion is way too important for only one track » (La fusion est bien trop importante pour s'engager dans une seule voie [traduction libre]). Le financement public même s'il permet de créer de véritables bonds en avant technologique (le programme Apollo par exemple) n'est pas la seule option. Récemment les entreprises privées ont montré qu'une bureaucratie plus légère et une vision neuve sur un sujet pouvait créer une innovation disruptive majeure (Space X une entreprise privée est en train de révolutionner le domaine des lanceurs longtemps le monopôle des organismes gouvernementaux).

Le calendrier provisionnel

Ces deux démonstrateurs ainsi que ITER même s'ils promettent de produire plus d'énergie qu'ils en consomment, ne sont pas prévus pour produire de l'électricité. Si les résultats sont probants la prochaine étape est de construire un démonstrateur commercial. Celui-ci servira notamment à prouver la rentabilité économique de la fusion. Comme le dit Steven Cowley, le directeur de United Kingdom Atomic Energy Authority (présent à la fois sur le projet ITER et le projet avec General Fusion) il va être relativement facile de provoquer la fusion [7]. La vraie question à laquelle personne ne peut répondre est quand est-ce qu'elle sera viable économiquement.

Dans la lignée d'ITER le projet DEMO prévoit à l'horizon 2050 de produire de l'électricité à grande échelle. DEMO bénéficiera des retours d'expériences d'ITER et sera vraisemblablement financé par les mêmes acteurs. En cas de succès la construction commerciale des réactions à fusions pourra avoir lieu. Les réacteurs à fusion nucléaire pourraient donc au mieux faire partie du mix énergétique électrique mondiale en 2070-2080.

Cette échéance bien que lointaine implique tout de même d'analyser et de discuter de quelle place aura la fusion nucléaire à cette époque-là. Il s'agit notamment de déterminer quelles en seront les avantages possibles pour l'humanité tout en analysant les effets pervers de cette technologie.

ANALYSE ET DISCUSSION

AVANTAGES CERTAINS POUR LES MIX ÉLECTRIQUES DU FUTUR

Une indépendance énergétique des pays

Les projets de réacteurs à fusion les plus avancés utilisent du deutérium et du tritium comme réactifs. Les quantités de réactifs utilisés par le réacteur sont faibles comparées à d'autres types de centrales électriques. Pour une centrale de 1 GW la fusion va nécessiter environ 2 à 3 tonnes de combustibles à comparer avec 100 tonnes d'uranium pour une centrale à fission et 2,5 millions de tonnes pour une centrale à charbon [1].

Le deutérium est présent naturellement dans l'eau de mer à hauteur de 20g par mètre cube d'eau. Il est donc très abondant sur Terre et il suffit que le pays ait une bande côtière pour que son approvisionnement en deutérium soit assuré. Le tritium lui à cause de sa faible durée de vie est assez rare. Cependant injecter du lithium pendant la fusion va faire une réaction et produire du tritium. Les réserves de lithium sont estimées en 2020 par l'United States Geological Survey (USGS) à 17 millions de tonnes [8]. Ce qui correspond à faire fonctionner 1000 réacteurs de 1 GW pendant 1000 ans si comme cité plus haut le réacteur utilise 2 à 3 tonnes de combustibles au total. Les réserves de Lithium sont réparties sur la planète avec les plus grosses réserves aux USA, Argentine, Australie, Chine et Chili. Cependant la consommation de lithium est appelée à augmenter à cause notamment de la production de voitures électriques. Face à une possible concurrence entre les deux besoins vers la fin du siècle il faut souligner que le lithium peut aussi être extrait de l'eau de mer [1]. Tout cela rend compte des grands volumes de ressources disponibles comparés à la consommation. Et surtout ce sont des ressources assez bien répartie sur la planète permettant à une majorité de pays de pouvoir contrôler son propre approvisionnement énergétique.





Pour comparer la durée des ressources de la fusion à celles de la fission il faut noter que les réserves d'uranium vont durer entre 100 et 1000 ans au rythme actuel. Or selon les scénarios du GIEC la production par fission peut rester stable ou être jusqu'à multiplié par 5 d'ici 2050 [9].

Dans tous les cas les réserves de la fission seront épuisées bien avant les réserves pour la fusion.

En révolutionnant le secteur de la production électrique, la fusion pourrait aussi faire évoluer les manières d'utiliser l'énergie.

Comme l'explique Daniel T. Allen président de la firme international de financement Aliier, l'arrivée d'une source d'électricité abondante peut permettre de passer à une économie basée sur l'hydrogène [10]. La faible efficacité des électrolyseurs ne serait pas un problème pour produire de l'hydrogène propre. La fusion pourrait alors permettre une décarbonation des transports si elle n'est pas déjà atteinte en proposant de l'hydrogène à bas coûts.

Un réacteur à fusion nucléaire a aussi l'avantage de ne pas participer à la prolifération des armes nucléaires. Contrairement aux réacteurs à fission qui peut servir à enrichir de l'uranium et créer une bombe atomique à fission. C'est une des raisons qui explique pourquoi l'énergie nucléaire est assez peu déployé aujourd'hui. Les bombes nucléaires à fusion existent bien (bombe thermonucléaire) mais la réaction de fusion du tritium et du deutérium nécessite préalablement une réaction de fission.

L'utilisation d'une centrale à fusion n'aide pas un pays à obtenir l'arme nucléaire. Les réacteurs à fusion pourront donc être implanté dans chaque pays sans craintes pour la paix dans le monde.

Une source pilotable à la fois environnementale et sociale

Du point de vue des émissions de gaz à effets de serre (GES) un réacteur à fusion nucléaire ressemble beaucoup à un réacteur à fission nucléaire. En effet les deux technologies ne produisent pas CO₂ lors des réactions. L'hélium produit par la fusion de deutérium et de tritium n'est pas un GES [11]. Les émissions de GES de ces technologies sont alors dues aux cycles de vie des combustibles et cycles de vie des centrales. La figure 2 ci-dessous présente les différentes émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie selon les sources d'électricité. La fission et la fusion nucléaire sont considérées comme ayant la même empreinte carbone, celle-ci est inférieure à toutes les sources d'énergies même si elle est du même ordre de grandeur que les autres énergies renouvelables.

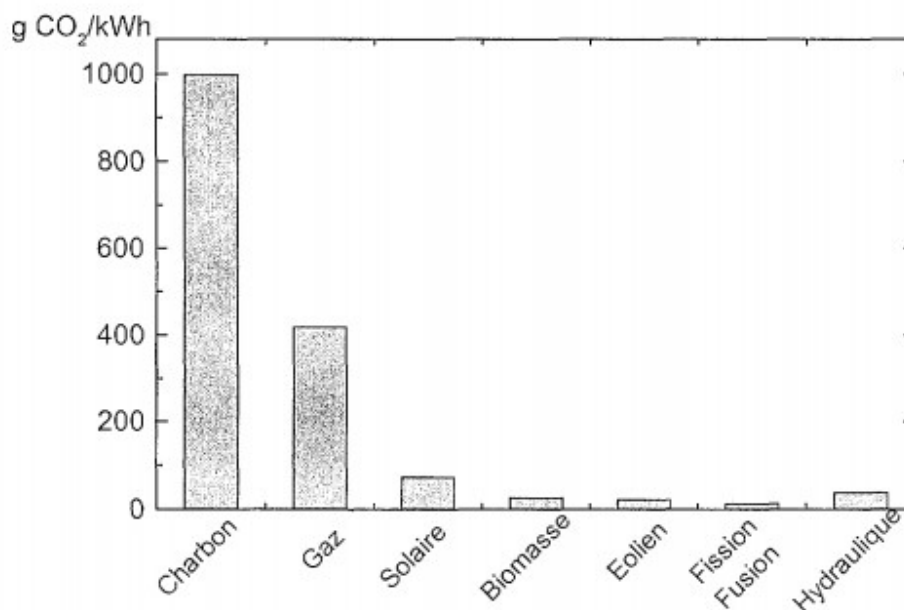


Figure 2 : Émission de CO₂ totale par énergie produite selon les sources [1]

Une centrale à fusion est semblable à une centrale à fission. Les ordres de grandeurs de l'énergie produite et la surface au sol sont les mêmes. L'emprise au sol ramenée à l'énergie produite est donc comme pour une centrale à fission très faible contrairement aux éoliennes et panneaux solaires. Avoir des sources d'énergies à haute densité surfacique d'énergie est d'autant plus important que la croissance de la population va amener un plus grand besoin de surface utilisée par l'humanité.

Dans le tokamak seulement le combustible nécessaire pour les prochaines dix secondes de réactions est présent [2]. En cas d'anomalie la réaction s'arrête donc rapidement et ne peut pas s'emballer. Les conditions de température nécessaires à la fusion font que stopper le chauffage du plasma interrompt la réaction. En plus de l'impossibilité d'avoir un accident nucléaire aucun déchet radioactifs de haute activité à vie longue n'est créé. Cette sécurité lors du fonctionnement et la faible radioactivité des déchets font de la fusion une technologie relativement respectueuse de l'environnement et surtout socialement acceptable.





L'opinion publique si elle est bien informée pourrait donc permettre un déploiement rapide et sans trop d'opposition sociale. Les gouvernements prendraient alors peu de risque politique à construire des centrales à fusion. A noter qu'informer l'opinion publique n'est pas chose facile spécialement sur le sujet du nucléaire. Au niveau mondial 53% de la population considère que les centrales nucléaires rejettent du CO₂ contre 66% pour les centrales à gaz [12]. Il est difficilement concevable que la population change radicalement d'idées préconçues entre la fission et la fusion nucléaire.

La sécurité et les déchets des réacteurs à fusion ne sont donc pas des problèmes majeurs, mais la population doit être bien informée sur le sujet pour permettre un déploiement rapide.

Stabilisation du réseau et pénétration des énergies renouvelables intermittentes

La fission nucléaire apportera aux mix électriques une source pilotable décarbonée. L'éolien et le photovoltaïque ont selon la synthèse du rapport de RTE [13] le plus gros potentiel de développement par rapport aux autres énergies renouvelables. Le mix électrique à l'horizon 2080 sera composée en grande partie des deux sources là. Or leur trop grande pénétration peut poser des problèmes. En effet les centrales électriques « conventionnelles » ont de gros rotors tournant de manière synchronisée avec le réseau. L'inertie de ces rotors permet alors d'absorber les légers changements de fréquence du réseau avant que d'autres mesures soient prises. L'éolien et le photovoltaïque sont eux des moyens de productions non synchrones, ils ne peuvent donc pas participer à l'inertie du réseau. Un des grands problèmes de la pénétration des ENR sur les réseaux est donc une diminution de la stabilité. Des solutions y répondant ont été développées à petite échelle mais le succès d'une mise en place et les coûts associés ne sont pas encore bien évalués.

Le réacteur à fusion nucléaire peut justement améliorer la stabilité du réseau. Le réacteur peut être considérée comme une centrale électrique conventionnelle car le principe est de chauffer un fluide caloporteur entraînant ensuite un alternateur. Les rotors des réacteurs à fusion amèneraient alors de l'inertie sur les réseaux.

Au-delà de tous ces avantages certains, l'échéance lointaine, l'abondance promise et la complexité de la technologie peuvent induire des effets pervers à l'humanité.

UN HORIZON TROP LOINTAIN ET INCERTAIN

Effets psychologiques

La possibilité que la fusion nucléaire puisse être un jour exploitable commercialement peut amener les populations et les gouvernements à réduire leurs efforts dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Une des barrières psychologiques est l'idéologie du salut technologique [14]. Le progrès technologique est alors considéré comme un allié. Cela amène les citoyens à se déresponsabiliser de la lutte contre le réchauffement climatique car c'est donc aux chercheurs et ingénieurs de trouver des solutions. Ici la fusion nucléaire peut-être perçue comme le salut technologique de l'humanité. Les citoyens n'ont donc qu'à attendre que la solution soit déployée sans qu'ils aient à changer leur mode de vie.

La lutte contre le réchauffement climatique est maintenant

Comme souligné précédemment il n'est pas raisonnable de penser que les réacteurs à fusion nucléaire auront une part importante dans le mix énergétique mondial avant les années 2080. Il pourrait donc être tentant d'attendre que les réacteurs à fusion se développent pour pouvoir agir contre le réchauffement climatique. La figure 3 ci-dessous présente la hausse de la température moyenne de la planète entre 2020 et 2100 selon différents scénarios. Il montre notamment qu'en ne changeant pas nos habitudes avant 2080 la hausse des températures attendra déjà les 5 et 6°C quand la fusion sera déployée. Ce qui est bien au-delà des 2°C qui sont considérés comme un point de non-retour au niveau des effets environnementaux.



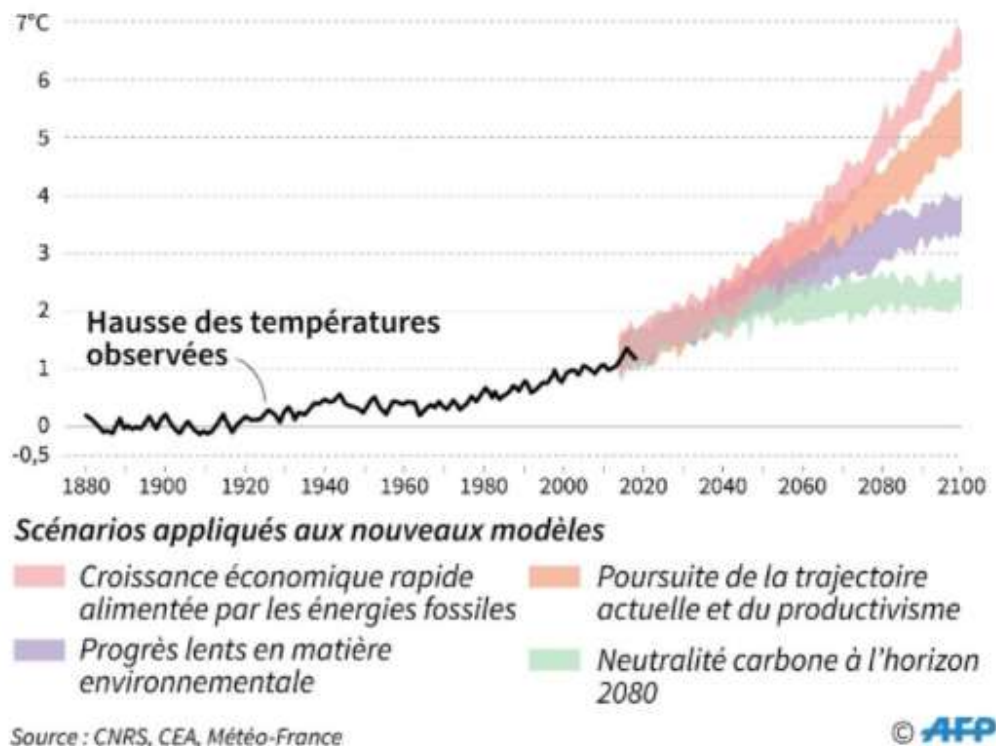


Figure 3 : La hausse de températures d'ici 2100 [15]

Or les émissions faites entre d'aujourd'hui et 2080 ne vont pas seulement provoquer un réchauffement de 5-6°C en 2080 mais aussi sur une période beaucoup plus longue. Le CO₂ qui représente la majorité des GES produit par l'Homme a une durée de vie d'une centaine d'année dans l'atmosphère [11]. Donc les effets de la baisse d'émission de CO₂ dû à la fusion vont au mieux permettre de stabiliser la hausse de température à 5-6°C entre 2080 et 2180. De plus à cause des émissions directes de GES par l'humanité jusqu'en 2080 certaines boucles de rétroaction positive peuvent s'enclencher augmentant encore l'envoi de GES dans l'atmosphère. Par exemple la fonte du pergélisol à cause du réchauffement climatique libère du CO₂ et du méthane dans l'atmosphère, ce qui a son tour accentue le réchauffement mondial. La lutte contre le réchauffement climatique doit donc sérieusement commencer dès maintenant, ce sont les émissions d'aujourd'hui qui conditionnent la hausse de température sur les 100 prochaines années.

Effet rebond

Le paradoxe de Jevons (ou effet rebond) énonce que l'apparition de technologies plus efficace en matière de production d'énergie amène à augmenter la consommation totale. Ici la fusion consommant des combustibles accessibles un peu partout sur Terre et en grande quantité va donc probablement amener un effet rebond. La consommation d'énergie augmenterait alors encore. La question est de savoir si ce rebond est souhaitable pour l'humanité. La figure 4 ci-dessous présente les indices de développement humains des pays en fonction de la consommation énergétique par personne. Si l'augmentation de la consommation par tête est jusqu'à 3 Tep corrélée avec l'IDH il atteint ensuite un plateau. En partant de ce postulat l'effet rebond n'apportera donc pas de hausse de l'IDH (qui peut être considéré comme un indicateur du bien-être des citoyens).



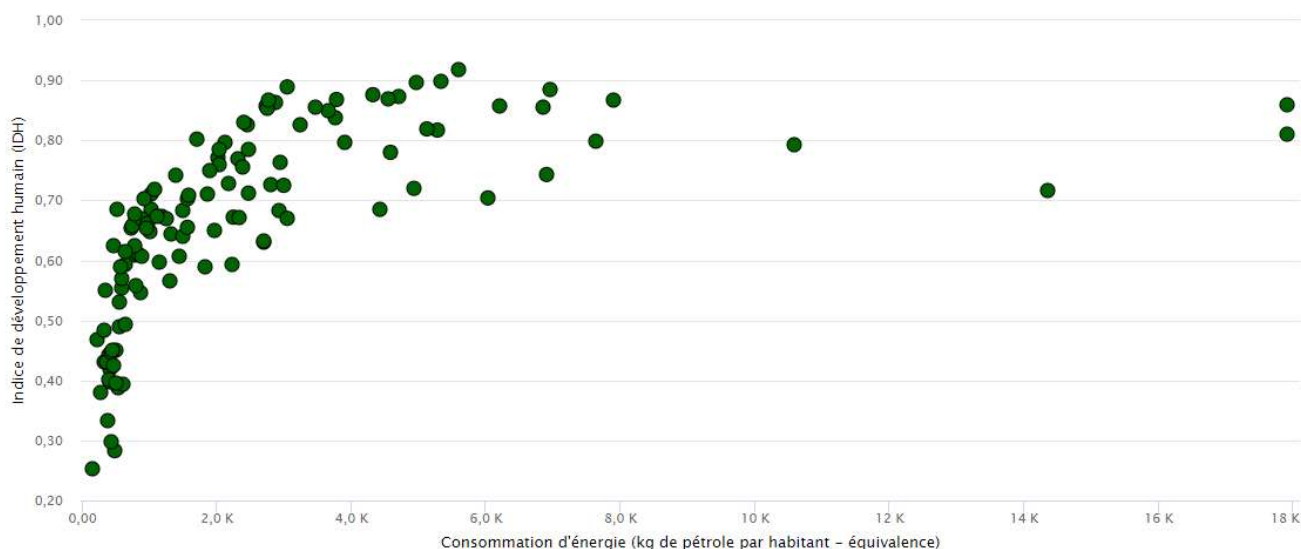


Figure 4 : Indice de développement humain en fonction de la consommation d'énergie par personne [16]

Et enfin l'effet rebond rendra éventuellement la fusion plus assez suffisante pour assurer les besoins de l'humanité. Or contrôler la fusion nucléaire revient à réussir à contrôler ce qui se passe dans le soleil. Si la fusion nucléaire ne suffit pas à absorber l'effet rebond, il est légitime de se demander quelle prochaine source d'énergie devra trouver l'humanité si celle au cœur du soleil ne suffit pas à ses besoins.

La viabilité économique n'est pas certaine

ITER le projet le plus ambitieux et le plus avancé dans le domaine a à un coût aujourd'hui estimé à près de 24 milliards d'euros. Il est financé par une multitude de pays. Ces pays-là participent aussi en fabriquant des pièces pour le réacteur. Le démonstrateur économique qui prendra la suite est prévue d'être financé et construit de la même manière. Le risque est qu'un ou des pays se désengagent des projets, au-delà de la perte de contribution financière, la conception et la construction de certaines pièces doivent donc être déplacé, engrangeant des retards et des surcoûts. Les pays restants pourraient donc à leur tour décider d'abandonner le programme et par cascade le projet pourrait ne jamais être mené à terme.

De grands noms de la physique sont aussi sceptiques sur l'investissement dans la recherche sur la fusion nucléaire. Pierre-Gilles de Gennes et Masatoshi Koshiha respectivement prix Nobel de physique 1991 et 2002 sont publiquement opposés à ce projet qu'ils jugent dispendieux et ayant peu de chance de réussite [17]. Effectivement les montants injectés pourraient servir à financer le développement dès aujourd'hui d'énergies renouvelables éprouvées et de technologies de stockages. Cela permettrait de faire baisser à plus court terme l'empreinte carbone des réseaux électriques tout en aillant un résultat moins hypothétique.





CONCLUSION

La fusion nucléaire nécessite des conditions de températures et de pressions extrêmes pour avoir lieu. Pour atteindre et contenir cette température les réacteurs doivent surmonter des défis pour confiner le plasma et le chauffer efficacement. Actuellement le projet ITER financé par plusieurs pays prévoit d'avoir un plasma producteur d'énergie en 2035. En dehors de ce mastodonte à plusieurs dizaines de milliards d'euros à financement public, de plus petits projets issus de partenariats public-privé sont mis en place. Ces projets au Royaume-Uni et aux États-Unis visent à construire des réacteurs de plus petite taille avec des technologies différentes. Il faudra attendre 2050 pour que DEMO le successeur d'ITER démontre la viabilité économique de la production d'électricité. Même parmi les plus optimistes le déploiement des centrales à fusion nucléaire ne se fera pas avant 2080. Si cette échéance paraît loin la fusion nucléaire a des atouts remarquables à faire partie du mix électrique. Les ressources en combustibles sont gigantesques comparées à la faible consommation des réacteurs. L'abondance et la répartition relativement homogène de ces ressources sur la planète permettent aux pays utilisateurs une grande indépendance énergétique. La prolifération de centrales à fusion n'est pas un risque pour la paix mondiale. La fusion permet de rejeter très peu de CO₂ et de déchets nucléaires, les risques d'accidents nucléaires sont aussi extrêmement faibles. Socialement et environnementalement parlant c'est une source d'électricité viable. La taille des alternateurs et la pilotabilité font de la fusion un facilitateur de la pénétration des énergies renouvelables intermittentes sur les réseaux. Au-delà de ces promesses la fusion peut également décourager les citoyens et les gouvernements à agir maintenant car elle donne l'illusion que la technologie sera le salut de l'humanité. Et au contraire il faut prendre garde à ne pas attendre la fusion pour réduire nos émissions de GES car elle arrivera trop tard. Paradoxalement l'arrivée d'une énergie consommant peu de ressources et à faible impact pourrait engendrer une hausse de la consommation. Or cette surconsommation d'énergie n'est pas forcément bien pour l'humanité ou la planète. Et enfin malgré les sommes investies il est tout à fait possible que la fusion ne soit jamais économiquement viable.

Toute cela amène que la fusion malgré tous ses avantages arrivera trop tard car la lutte contre le réchauffement climatique doit être faite aujourd'hui. Il serait plus judicieux d'utiliser les financements et le personnel de recherche pour étudier comment faire pénétrer en plus grandes quantités les énergies renouvelables dans les réseaux. Mieux encore améliorer l'efficacité énergétique de l'humanité entière tout en prônant la sobriété énergétique. La fusion si elle est viable économiquement un jour doit être considérée comme une bonne surprise mais elle ne doit pas constituer la seule solution de production énergétique à long-terme et elle ne doit pas faire oublier qu'avant son hypothétique arrivée il faut déjà radicalement changer les comportements de chacun.

REFERENCES

1. Costanzo, Laurent. 2001. « Thèse, Etude expérimentale des aspects topologiques du divertor ergodique de Tore Supra ». *Université de Provence (Aix - Marseille I)*
2. Yves Martin, Ambrogio Fasol. « La fusion nucléaire ». EPFL <https://www.epfl.ch/research/domains/swiss-plasma-center/wp-content/uploads/2018/10/140415_BulletinElectriciens.pdf>.
3. « ITER, c'est quoi ? » In ITER. <<http://www.iter.org/proj/inafewlines>>.
4. Mann, Adam. « We're One Step Closer to Nuclear Fusion Energy ». *Wired*. <<https://www.wired.com/2014/02/fusion-power-not-yet/>>.
5. Matt McGrath. Juin 2021 « Nuclear energy: Fusion plant backed by Jeff Bezos to be built in UK ». *BBC News*. <<https://www.bbc.com/news/science-environment-57512229>>.
6. David Chandler. « MIT and newly formed company launch novel approach to fusion power ». In *MIT News | Massachusetts Institute of Technology*. <<https://news.mit.edu/2018/mit-newly-formed-company-launch-novel-approach-fusion-power-0309>>.
7. Steven Cowley, the CEO of the United Kingdom Atomic Energy Authority and head of the Culham Centre for Fusion Energy. « Fusion is vital for our future ». In ITER. <<http://www.iter.org/newsline/189/857>>.
8. Janvier 2020. « Mineral Commodity Summaries - Lithium ». *U.S. Geological Survey* <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-lithium.pdf>>.
9. « Réchauffement planétaire de 1,5 °C ». *GIEC* <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf>.
10. Daniel T. Allen. Août 2014. « Why would financiers support ITER? » In ITER. <<http://www.iter.org/newsline/-/1972>>.
11. Jean-Marc Jancovici. Août 2007. « Quels sont les gaz à effet de serre ? ». <<https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/>>.
12. 2019. « Présentation des résultats de l'observatoire international climat et opinions publics ». *EDF-IPSOS* <https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2019-11/ipsos_pour_edf_obsop_27nov.pdf>.
13. « Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050 ». *IEA-RTE*
14. Daniel Rousse et Frédéric Coulombe. « Psychologie et changement climatique ». *ÉTS*





15. 2019. « +7°C en 2100? Des nouvelles projections scientifiques très alarmantes ». In *Sciences et Avenir*.
<https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/7-c-en-2100-des-nouvelles-projections-scientifiques-tres-alarmantes_137328>.
16. « Perspective monde » *Université de Sherbrooke*
<<https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BilanEssai/6/EG.USE.PCAP.KG.OE/2014/1/SP.POP.IDH.IN/2000/sans/sansLogUni/Vert/11px/?>>
17. 2005. « D'importants défis technologiques attendent ITER ». *Le Monde.fr*
<https://www.lemonde.fr/planete/article/2005/07/09/d-importants-defis-technologiques-attendent-iter_671246_3244.html>.

