



Département Génie Industriel

Projet Bibliographique

L'énergie de fusion, entre rêve et réalité

Réalisé par :

Louay Elmelki
Mehdi Ghrabli
Marwen Bahri

Encadrant :

M. Marouane Ben Miled

1^{ère} Année Techniques avancées

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de la rédaction de ce rapport. Tout d'abord nous adressons nos remerciements à notre professeur M. Marouane Ben Miled, qui nous a communiqué toutes les connaissances nécessaires pour réussir la rédaction de cette mémoire, pour ses conseils et sa disponibilité, Mme Jamila Guiza pour ses conseils pratiques et les connaissances techniques qu'elle nous a communiqué. Nous remercions aussi Mme Hedia Chaker pour son encouragement et son sérieux tout au long de la réalisation du projet. Nous remercions également les anciens étudiants de la technique avancées pour leur aide à la réalisation de ce projet.

Table des matières

Introduction	6
1 État énergétique actuel	7
1.1 Introduction	7
1.2 Les principales sources d'énergies	7
1.2.1 Inconvénients	8
1.3 Besoin d'une nouvelle source d'énergie	9
1.4 Conclusion	10
2 Intérêt de la fusion comme alternative énergétique	11
2.1 Introduction	11
2.2 Le soleil	11
2.3 La réaction de fusion nucléaire	13
2.3.1 Aspects théoriques	13
2.3.2 Rendement énergétique	14
2.4 Conclusion	14
3 Différentes approches techniques de la fusion	16
3.1 La fusion inertielle	16
3.1.1 Principe de la méthode	16
3.1.2 Problèmes techniques	17
3.2 La fusion magnétique	18
3.2.1 La création et le chauffage du plasma	19
3.2.2 Mécanismes de perte ; bilan énergétique	19
3.3 Conclusion	20
4 De la théorie à l'application	21
4.1 Le projet HiPER	21
4.1.1 Principes du projet	21
4.1.2 Objectifs et défis	21
4.1.3 Phases du projet	22

4.1.4	Un projet à l'échelle international	23
4.1.5	Conclusion	24
4.2	Le reacteur ITER	24
4.2.1	Historique	24
4.2.2	Objectifs	24
4.2.3	Principe du fonctionnement	25
4.2.4	Défis	25
4.2.5	Conclusion	27
5	La fusion demain	28
5.1	Filière énergétique crédible ?	28
5.1.1	L'acceptation publique	28
5.1.2	La sécurité	30
5.1.3	La non-prolifération	31
5.1.4	L'effet sur l'environnement	32
5.1.5	Le coût	33
5.2	Conséquences géopolitiques scientifiques et industrielles	35
5.2.1	Conséquences géopolitiques	35
5.2.2	Conséquences scientifiques et industrielles	35
5.3	Quand le premier réacteur ?	36
	Conclusion générale	38
	Bibliographie	39

«J'aimerais que la fusion nucléaire devienne une source d'énergie pratique. Elle fournirait un approvisionnement inépuisable d'énergie, sans pollution ni réchauffement climatique. »

Stephen Hawking

1. Stephen William Hawking, né le 8 janvier 1942 à Oxford et mort le 14 mars 2018 à Cambridge, est un physicien théoricien et cosmologiste britannique

Introduction

L'académie nationale d'ingénierie des Etats-Unis a reconnu l'électrification comme la plus grande réussite d'ingénierie du XXe siècle ce qui est très remarquable vu que le XXe siècle est aussi le siècle des ordinateurs, lasers, avions et d'autres moyens technologiques omniprésents. Une telle déclaration ne peut être qu'indicative du rôle de l'électricité dans l'amélioration de notre qualité de vie. Par conséquent, l'utilisation global d'électricité devrait augmenter pendant les années prochaines. Une croissance de la consommation d'électricité est attendue en particulier dans les pays en développement qui souhaitent répondre à leurs besoins en électricité et qui visent moderniser et industrialiser leurs économies.[40] Face à cette croissance, le problème du réchauffement climatique est remis en cause vu la forte corrélation entre la production d'électricité et l'émission des gazes a effets de serre, d'ailleurs la production de l'électricité contribue à 28% de l'émission de ces gazes aux États-Unis en 2017, et c'est la seconde source d'émission juste après la transportation avec un taux de 29%.[13] Un changement de stratégie devient nécessaire vu l'état écologique alarmant. Plusieurs formes d'énergies propres sont apparus qui certes répondent au problème écologique mais présentent d'autres comme le problème d'intermittence² pour les énergies renouvelables. Ainsi que le problème de durabilité de l'énergie nucléaire de fission où la quantité d'uranium sur terre est très limitée.[11] Face à ces problèmes, beaucoup de scientifiques se détournent vers l'énergie nucléaire de fusion. Vu son aspect durable et écologique, cette nouvelle forme d'énergie semble prometteuse. Mais le problème majeur de l'énergie de fusion est que la recherche n'a pas encore aboutit à des moyens de productions économiquement viables. Compte tenu de ce dilemme :

- La fusion constituera-t-elle une alternative énergétique ?

2. La disponibilité varie fortement sans possibilité de contrôle.

Chapitre 1

État énergétique actuel

1.1 Introduction

L'énergie est un enjeu vital au niveau mondial et aujourd'hui nos besoins augmentent plus que jamais. La croissance attendue de la demande mondiale d'énergie d'ici 2040 selon le scénario central de L'AIE¹ est de l'ordre de 37%[27] tandis que l'OPEC² estime à 60%[45] cette croissance. Dans les deux cas, le taux de croissance est très élevé. Dans la suite on donnera un aperçu sur les principales sources d'énergie en cours d'utilisation leurs inconvénients et une vision pour le futur de l'humanité en ce qui concerne les sources énergétiques.

1.2 Les principales sources d'énergies

Il existe trois sources majeurs d'énergie qui permettent de produire de l'électricité ce sont : les énergie fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon), l'énergie hydraulique et l'énergie nucléaire. La contribution de chaque source à la production mondiale de l'énergie varie énormément. Soit une proportion de 86,7% pour les énergies fossiles, 4,2% pour le nucléaire et 6,7% pour l'hydraulique en 2013. Le reste est fourni par les énergies renouvelables tels que l'éolienne et la photo-voltaïque.[46]

1. L'Agence internationale de l'énergie

2. Organisation des pays exportateurs de pétrole

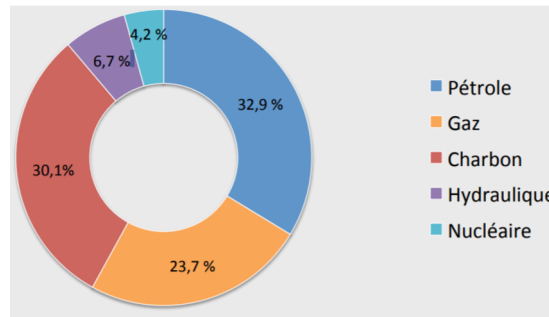


FIGURE 1.1 – Répartition par source en 2013. Source : Examen statistique BP de l'énergie mondiale

1.2.1 Inconvénients

Les inconvénients diffèrent en nombre et en gravité pour chaque source d'énergie. On va donc citer seulement les inconvénients les plus graves. Commençant d'abord par les énergies fossiles puisque elles répondent à la quasi-totalité de la consommation mondiale de l'énergie. Les deux grands inconvénients pour ces sources sont :

1. Elles sont trop polluantes. En effet, selon une recherche faite par Greenpeace Asie du Sud-Est et CREA ³ la pollution d'air causée par les énergies fossiles coûte à l'économie mondiale environ 8 milliards de dollars par jour et est responsable du décès prématuré de plus de 4.5 million de personne chaque année.[5]
2. Elles existent en quantités limitées sur la planète. En effet, en mesurant le rapport R/P ⁴ on trouve qu'avec le taux actuel de production (11 millions tonnes par ans), le pétrole sera épuisé dans 53 années , le gaz naturel dans 54 et 110 années pour le charbon . Et avec l'augmentation de la population mondiale et l'industrialisation des pays sous-développés ces nombres pourraient même baisser encore plus.[16]

En ce qui concerne les inconvénients du nucléaire, les plus inquiétants sont :

- les déchets radioactifs ayant une très longue durée de vie (700 millions d'années de demi-vie pour le Uranium-235 et qui constitue le carburant principal des réacteurs à fission nucléaire [15]) et qui peuvent être utilisés pour la production des armes nucléaires.
- la dangerosité des accidents possibles qui peuvent menacer le monde en entier comme le cas de Tchernobyl et qui affaiblies l'acceptation publique de la

3. Le Centre de recherche sur l'énergie et l'air pur

4. Le rapport Réserves (en tonnes) sur Production annuelle (en tonnes/an)

fission nucléaire même si qu'on la maîtrise.[40]

L'hydraulique, quant à elle, est non polluant mais admet quand même des désavantages. En effet, la construction d'un barrage dans un cours d'eau perturbe tout un écosystème. De plus, cette forme d'énergie nécessite un terrain propice ce qui n'est pas facile à avoir. En effet la plupart des terres exploitables pour l'énergie hydraulique ont déjà été équipées [39]. Finalement, l'inconvénient majeur des énergies renouvelables c'est que leur rendement n'est pas constant puisqu'il dépend des situations géographiques et orographiques⁵. En effet, en France, l'éolien produit de l'électricité environ 2600 heures par an (30% du temps) tandis que la photovoltaïque produit environ 1200 heures par an (15% du temps). [28]

1.3 Besoin d'une nouvelle source d'énergie

Après avoir analysé les sources d'énergie conventionnelles, il est devenu clair qu'aucune de ses sources ne garantit un avenir durable, d'où la nécessité d'une alternative énergétique. Une alternative qui doit cependant vérifier plusieurs critères [40] :

- Il faut que cette forme d'énergie soit verte, d'ailleurs selon plusieurs sources comme business insider⁶, Inc⁷ etc. le problème du réchauffement climatique est le problème majeur de notre époque. Vu que 86,7% des gazes à effet de serre sont émis suite à la production de l'énergie, une source d'énergie verte va lutter énormément contre ce problème écologique [33].
- Une source d'énergie sans risques : Les accidents de Fukushima et de Tchernobyl ont changé drastiquement la perception du monde de l'énergie nucléaire de fission. Une source d'énergie qui ne soit pas sécurisée ne va pas attirer les investisseurs et ne sera certainement pas utilisée par les états[40].
- Un coût relativement faible pour que cette énergie soit à la fois économiquement rentable et accessible pour tout le monde[40].
- La non-prolifération⁸ : Avant d'entamer une stratégie énergétique, il faut éliminer tout le risque de prolifération pour ne pas utiliser ces énergies à d'autres fins comme l'armement ce qui est le cas avec la bombe H et la bombe A. Ceci peut être évité par l'élaboration des lois qui contrôlent l'utilisation de ces source d'énergie[40].

5. Orographie : le relief terrestre

6. Business Insider est un site web d'information américain créé en 2007

7. Inc. est un magazine mensuel américain consacré aux entreprises en croissance rapide

8. La prolifération est l'augmentation du nombre des nations accédant à une capacité nucléaire militaire indépendante.

- L'acceptation publique : Il faut que l'alternative énergétique soit acceptée par le public pour ne pas créer des conflits en ce qui concerne l'exploitation des ressources, l'utilisation des terrains etc...[40].

1.4 Conclusion

Les défis auxquels nous sommes confrontés que ce soit sur le plan énergétique ou environnemental nous obligent à changer nos méthodes traditionnelle et trouver une nouvelle façon efficace pour répondre aux besoins des populations tout en préservant notre planète. L'une des alternatives prometteuses est la fusion nucléaire et c'est grâce aux ses différentes caractéristiques favorables que nous allons aborder dans la suite. Qu'elle est donc l'origine de l'énergie de fusion ? Quels sont les processus à appliquer pour avoir cette forme d'énergie ? Et à quel point vérifie-t-elle nos exigences futurs ?

Chapitre 2

Intérêt de la fusion comme alternative énergétique

2.1 Introduction

La fusion était déjà à l'œuvre aux débuts de l'univers. C'est grâce à elle que les éléments les plus légers, comme l'hélium et les isotopes de l'hydrogène, sont apparus au sein du plasma primordial. C'est encore la fusion, source d'énergie des étoiles, qui synthétise en leur cœur tous les autres éléments jusqu'au fer. C'est encore et toujours la fusion qui permet à notre étoile, le Soleil, de briller et de nous chauffer. Dans ce chapitre on va d'abord expliquer comment la fusion se manifeste dans la nature ensuite nous expliquerons ce qui fait de la fusion nucléaire une source riche d'énergie.

2.2 Le soleil

«La source d'énergie qui fait vivre le Soleil est la fusion. Le Soleil est une étoile de masse moyenne (les autres étoiles ont une masse comprise entre 0,08 et 120 fois la sienne) dotée d'un champ magnétique. Sa structure peut être décrite en termes de couches, caractérisées par des températures et des densités différentes et par conséquent par des processus physiques différents.»[18]

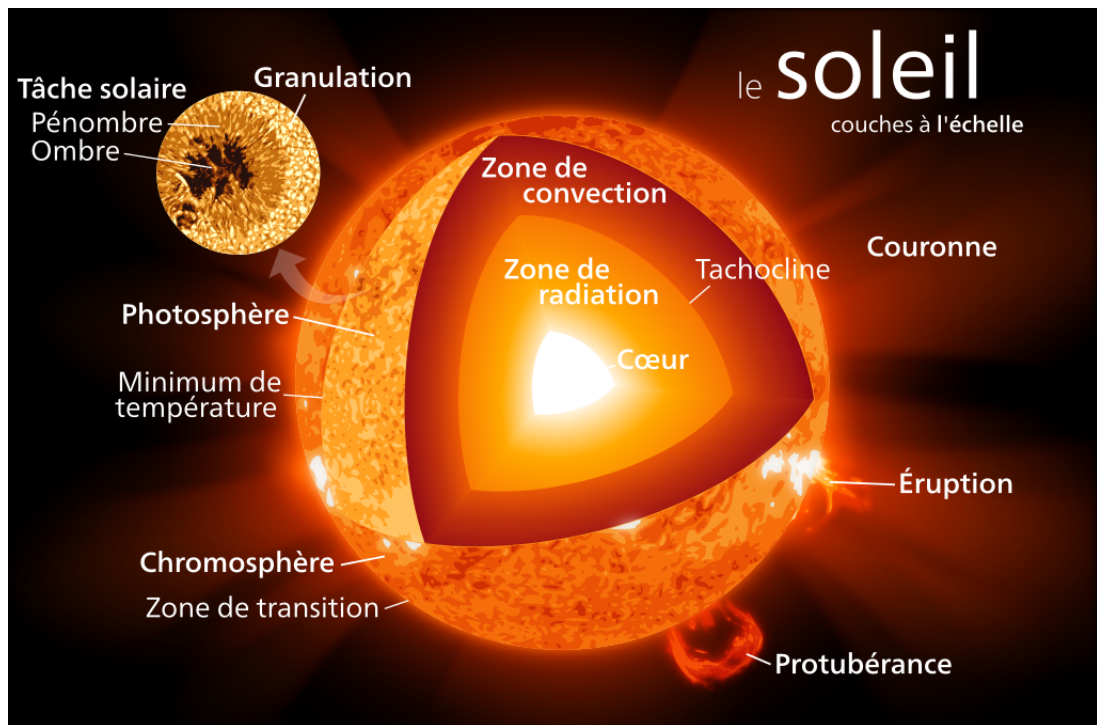


FIGURE 2.1 – Structure du Soleil [49]

On s'intéresse au cœur du soleil là où les réactions de fusion auront lieu. Le cœur de l'astre s'étend à environ 0,2 fois son rayon et possède une densité de 150g/cm^3 (150 fois la densité de l'eau sur terre) ainsi qu'une température de 15 millions de kelvins. Dans les étoiles on trouve 2 types de réactions qui assurent la fusion l'une est la chaîne de réactions proton-proton l'autre est le cycle carbone-azote-oxygène, celle qui assure la fusion au cœur du soleil est la chaîne de réactions proton-proton qui va donner naissance à des noyaux d'hélium à partir de noyaux d'hydrogène.[18] « Dans ce processus une interaction différente de l'interaction forte intervient : l'interaction nucléaire dite faible qui conduit quelques protons à se muer en neutrons, lesquels en s'accouplant à d'autres protons vont donner naissance à des noyaux de deutérium¹. Ceux-ci fusionnent avec un proton en donnant naissance aux noyaux d'hélium 3² Deux particules d'hélium 3 se fusionnent à leurs tours pour donner un noyau d'hélium 4 ou particule alpha³ avec expulsion de deux protons. Le soleil est donc un chaudron thermonucléaire qui brûle son combustible de manière très lente, ce qui lui assure une durée de vie d'environ 5 milliards d'années. »[18]

1. Le deutérium est un isotope naturel stable de l'hydrogène. Son noyau atomique possède un proton et un neutron

2. isotope de l'hélium, constitué de 2 protons et 1 neutron

3. constitué de 2 protons et 2 neutrons

2.3 La réaction de fusion nucléaire

2.3.1 Aspects théoriques

A l'échelle atomique on constate un phénomène étonnant : dans un noyau la masse totale des particules liées est inférieure à la somme des masses des particules séparées [12]. Pour mieux comprendre ce phénomène, considérons deux particules, par exemple un proton de masse m_p et un neutron de masse m_n . Imaginons maintenant que nous relions ces deux particules pour créer un élément F de masse m_f . Intuitivement, on pense que m_f serait égale à $m_p + m_n$, mais ce n'est pas le cas. On trouve que la somme des masses des réactifs est supérieure à la masse du produit F [12]. Ce qui semble contradictoire avec le principe de la conservation de la masse. En réalité ce défaut de masse est converti en énergie. C'est l'énergie de fusion [12]. Elle est directement liée à la fameuse équation d'Einstein $E = mc^2$, où c est la célérité de la lumière, m dans est le défaut masse et E est l'énergie. En résumé, au cours d'une réaction de fusion, la masse du noyau produit est inférieure à la somme des masses des noyaux légères d'origine d'où l'émission de l'énergie. La question maintenant est comment peut-on prévoir la valeur de cette énergie ? Pour répondre à cette question, on doit examiner une caractéristique clé de la matière nucléaire appelée l'énergie de liaison. C'est l'énergie requise pour arracher un nucléon (neutron ou proton) d'un noyau d'un atome et c'est exactement l'énergie qui est produite au cours d'une réaction de fusion [19]. Elle peut être calculée en faisant la différence entre la somme des masses des nucléons considérés séparément et la masse totale du noyau considéré. Prenons un exemple d'illustration :

Soit un élément ayant Z protons et N neutrons et un noyau de masse M
, la formule qui permet de calculer l'énergie de liaison est la suivante [23] :

$$B = (Zm_p + Nm_n - M)c^2$$

B : énergie de liaison

m_p : masse de proton

m_n : masse de neutron

c : célérité de la lumière

Donc si on fusionne Z protons et N neutrons pour produire un élément de masse M , la valeur de l'énergie de fusion sera égale à la valeur de l'énergie de liaison.[23] De même si on considère une réaction nucléaire qui, à partir des éléments X_n , produit des éléments Y_n , l'énergie de fusion serait égale à la somme des énergies de liaison des produits moins la somme des énergies de liaison des réactifs[23], soit :

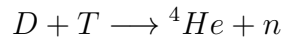
$$E = \sum B(Y_n) - \sum B(X_n)$$

Il existe cependant des réactions plus privilégiées que d'autres à cause de certaines caractéristiques autres que l'énergie de liaison [23], parmi lesquelles on distingue «

la section efficace » qui est définie comme la probabilité qu'un noyau atomique ou une particule subatomique donnée présente une réaction spécifique par rapport à une espèce particulière de particule incidente [43]. Mais est-ce que on a vraiment intérêt à en construire un ?

2.3.2 Rendement énergétique

Pour se convaincre de l'utilité d'avoir un réacteur à fusion, on a intérêt à comparer le rendement énergétique de l'énergie de fusion avec une source d'énergie conventionnelle comme le charbon qui constitue 30.1% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2013, comme l'on a déjà vu dans le premier chapitre. Considérons la réaction entre le Deutérium 2H et le Tritium 3H qui produit l'Hélium 4He [19] :



n : neutron

L'énergie libérée par cette réaction est $E = B(^4He) - B(D) - B(T) = 17.60 MeV$ [19] Supposons maintenant que l'on dispose d'une tonne de Deutérium, cette quantité est abordable puisque l'eau de mer en est riche [6]. Si on fusionne cette tonne de Deutérium avec une tonne de Tritium. l'énergie libérée sera de l'ordre de 8.410^{20} Joules. Comparant à l'énergie contenue dans une même quantité de charbon qui est de l'ordre 2.910^{10} Joules on trouve alors qu'une tonne de Deutérium a l'équivalent énergétique de 29 milliards de tonnes de charbon[23]. Donc Si nous réussissons un jour à exploiter efficacement la fusion nucléaire, nous serons en mesure de répondre à nos besoins énergétiques pendant des millions d'années. Alors, quelles sont les approches possibles pour créer un réacteur à fusion fonctionnel ?

2.4 Conclusion

Cette petite recherche dans la nature et dans la théorie nous a montré le rôle fondamental de la fusion en faisant de notre soleil une véritable usine à éléments chimiques et son énorme apport en énergie qui la rend une alternative énergétique très intéressante. Dans le Soleil, les conditions nécessaires à la fusion sont remplies grâce à l'énorme quantité de matière présentée sous l'effet de son propre poids, cette masse colossale, d'une part, produit au cœur de l'astre une température et une densité si élevées que les réactions de fusion peuvent s'enclencher. D'autre part, elle assure la cohésion du Soleil (qui n'explose pas), ce qui permet aux réactions de fusion de se poursuivre pendant plusieurs milliards d'années (c'est ce qu'on

4. Le tritium est l'un des isotopes de l'hydrogène. Son noyau possède un proton et deux neutrons.

appelle le confinement gravitationnel). Sur Terre, il n'est évidemment pas question de disposer des conditions physiques du Soleil et, si l'on veut réaliser la prophétie

« *d'utiliser un jour l'énergie des étoiles* » Arthur Eddington⁵

Il faut trouver un substitut à la gravitation. Nous allons donc revenir sur Terre et passer en revue les différentes approches possibles pour essayer de maîtriser la fusion et d'en faire une source d'énergie.

5. Arthur Stanley Eddington, né à Kendal le 28 décembre 1882 et décédé à Cambridge le 22 novembre 1944 à l'âge de 61 ans, est un astrophysicien britannique, l'un des plus importants du début du XX^e siècle.

Chapitre 3

Différentes approches techniques de la fusion

3.1 La fusion inertielle

«Le principe du confinement inertiel par laser consiste à comprimer adiabatiquement une petite sphère, de l'ordre du milligramme, du mélange d-t¹, jusqu'à augmenter sa densité de $\sim 10^4$, et à atteindre des températures de l'ordre de 10 keV². Le coeur de la sphère s'allume pendant un temps de l'ordre de 10^{-10} s puis s'explode. On appelle ignition le régime où les conditions de température et de densité du coeur permettent l'allumage du mélange d-t.» [35]

3.1.1 Principe de la méthode

Un mélange de deutérium et tritium solide confiné dans une sphère de volume de l'ordre du mm^3 est éclairé uniformément par un rayonnement d'un ensemble de laser très puissant pendant des temps très court (de l'ordre de nanoseconde). Il se produit une ablation de la périphérie de la sphère et la formation d'une couronne de plasma. Le faisceau de laser pénètre dans le plasma jusqu'à le porter à une densité critique. Les électrons du milieu se mettent à osciller a cause du champ laser et par conséquent transmettent de l'énergie au plasma par collisions avec les ions. L'énergie se transporte vers les zones froides du centre de la sphère par conduction thermique et rayonnement X et UV. En même temps que l'ablation de la périphérie de la sphère il y a production d'une onde choc qui comprime et chauffe la partie centrale du mélange deutérium tritium ,qu'on appelle le coeur.[35]

1. d : deutérium t : tritium

2. 1 Kev = 11604525.0061657 Kelvin

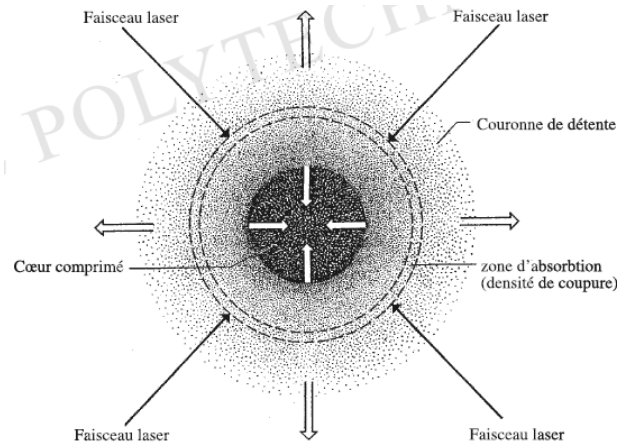


FIGURE 3.1 – Schéma de fusion induite par laser. La sphère de d-t interagit avec les faisceaux lasers et se vaporise superficiellement. Par réaction, la couronne comprime le coeur central.[35]

«Soumis à cette implosion³, le coeur est comprimé d'un facteur de mille à dix mille, soit des densités de 10^{31} m^{-3} , et il est porté à des températures de l'ordre de 10 keV. Dans ces conditions la fusion des noyaux de deutérium et de tritium se produit abondamment. Le cœur brûle pendant un temps de l'ordre de 10^{-11} s , sa cohésion étant maintenue par inertie, puis il explose sous l'effet de l'énergie thermonucléaire libérée. L'énergie laser sert principalement à comprimer le mélange deutérium-tritium, l'énergie nécessaire à son chauffage étant, en majeure partie, prélevée sur l'énergie de fusion libérée. Il en résulte une réduction de l'énergie laser à investir pour faire brûler la cible.»[35]

3.1.2 Problèmes techniques

L'obstacle majeur de la fusion thermonucléaire inertielle par laser est la réalisation de l'uniformité de l'éclairement du laser à la surface de la sphère pour assurer des performances optimales aboutissant à l'inflammation du mélange deutérium tritium. On distingue deux modes d'irradiation[35] :

- «L'irradiation directe ou "attaque directe" de la cible. Les faisceaux du laser, de 10 à 100, pointes et focalisées avec précision se recouvrent les uns les autres pour envelopper la cible, leur cohérence spatio-temporelle étant atténuée et leur profil d'intensité choisi pour que l'éclairement soit uniforme à mieux de 1%»[26]

3. Irruption très brutale d'un fluide, d'un gaz dans une enceinte dont la pression est beaucoup plus faible que la pression extérieure.

- «L'irradiation indirecte après conversion du rayonnement laser en rayonnement X qui implose la cible afin de gagner en uniformité ou "attaque indirecte". Le rayonnement laser monochromatique est converti en rayonnement X , proche de celui d'un corps noir à une température de 200 à 400 eV, dans une cavité au centre de laquelle est placée la cible sphérique à imploser. Dans ce second mode, le rayonnement X est absorbé sur une plus grande épaisseur comparée à celle du premier où le rayonnement laser dépose son énergie au voisinage de la densité de coupure, et à nombre de faisceaux donnés, l'uniformité de l'éclairement serait plus aisée à réaliser. Mais l'énergie laser à investir est a priori plus importante puisqu'elle fait intervenir une conversion d'énergie et donc un rendement supplémentaire.»[26]

3.2 La fusion magnétique

«La méthode de confinement magnétique consiste à utiliser un champ magnétique pour contenir le plasma. Les tokamaks sont des dispositifs toroïdaux dans lesquels le plasma, confiné par un fort champ magnétique toroïdal qui le maintient dans le tube, superposé à un champ magnétique poloïdal qui le lie horizontalement, est chauffé par un champ électromagnétique.»[35]

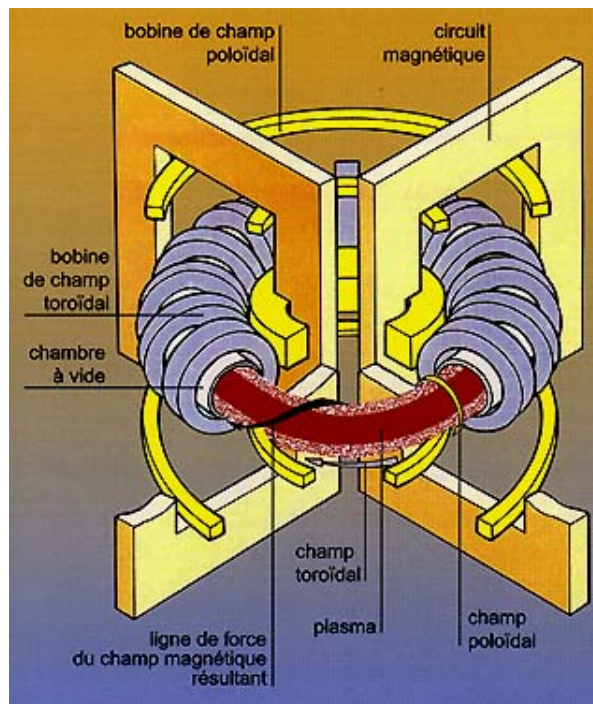


FIGURE 3.2 – Schéma d'un Tokamak [14]

Dans la configuration tokamak montré, le champ toroïdal, créé par des bobinages extérieurs, est symétrique de révolution par rapport à la verticale. Le champ poloïdal provient d'un courant intense, plusieurs millions d'ampères, qui circule dans l'anneau du plasma.[35]

3.2.1 La création et le chauffage du plasma

On remplit une enceinte étanche de forme toroïdale par un mélange hydrogène-deutérium (puis tritium dans le réacteur) avec une densité de 10^{14} particules par centimètre cube. Le gaz subit une ionisation rapide et s'ionise complètement en quelques millisecondes. Ensuite on procède pour le chauffage du gaz, pour atteindre les températures souhaitées (plusieurs keV) plusieurs techniques sont utilisées[35] :

- le chauffage ohmique : le courant intense parcourant le plasma lui confère une chaleur par effet Joule. Ce type de chauffage permet d'atteindre des températures de 2 à 3 keV.[35]
- Pour chauffer davantage et atteindre les 10 à 20 keV nécessaires pour la fusion, on injecte des atomes neutres rapides. Tout d'abord des ions de même nature que celle du plasma sont accélérés à haute énergie en dehors du tokamak puis neutralisés par capture d'électrons ensuite les atomes neutres résultant franchissent la barrière magnétique et cèdent leur énergie au milieu et sont ionisés par le plasma.[35] chauffage par micro-ondes à haute fréquence. Des antennes placées sur la paroi intérieure de la chambre à vide envoient des ondes qui injectent des puissances de l'ordre de 10 mégawatts, la puissance maximale installée sur le tokamak européen JET⁴ (Joint European Torus) est de 40 mégawatts.[35]

3.2.2 Mécanismes de perte ; bilan énergétique

« Les pertes par rayonnement proviennent essentiellement de l'émission de raies des atomes incomplètement ionisés. Pour l'essentiel, ces atomes sont des impuretés d'oxygène, de carbone, de fer, de nickel. Les pertes provoquées par ce type de rayonnement représentent dans les appareils actuels de 10 à 50 % du bilan énergétique. On en minimise les effets par un conditionnement préalable des parois de la chambre à vide et par un contrôle de la qualité des plasmas de bord, tous deux destinés à prévenir la production d'impuretés par les parois de la chambre. Le maintien de la concentration des impuretés à un niveau minimal est une condition nécessaire pour un bilan de fusion positif. Les pertes d'énergie par

4. Le JET est le plus grand tokamak existant, situé au Culham Science Center, à Abingdon, près d'Oxford au Royaume-Uni

*bremsstrahlung*⁵ des électrons sur les ions de deutérium et de tritium, constituent une limite supérieure physique pour que le système atteigne l'ignition. Elles requièrent, à densité donnée, une température du plasma suffisante.»[35]

3.3 Conclusion

Toute cette théorie compliquée derrière la fusion va nécessiter des moyens précis et très développés afin de concrétiser ces méthodes. Dans le chapitre qui suit, nous allons étudier deux réacteurs principaux sous le nom de HiPER et ITER.

5. Le rayonnement continu de freinage ou bremsstrahlung est un rayonnement électromagnétique à spectre large créé par le ralentissement de charges électriques. On parle aussi de rayonnement blanc

Chapitre 4

De la theorie a l'application

4.1 Le projet HiPER

4.1.1 Principes du projet

Le projet HiPER (du nom anglais High Power laser for Energy Research project) est un projet inclus par ESFRI¹ dans le plan Européen de l'infrastructure de recherche en 2006. Le projet concerne l'étude puis la réalisation d'une installation laser haute énergie afin de produire de l'énergie en utilisant la fusion inertielle[4].

4.1.2 Objectifs et défis

HiPER vise construire et mettre en travail un réacteur nucléaire à fusion qui répond à la question de la faisabilité scientifique et technique de la fusion nucléaire comme source d'énergie du futur où la réaction est initiée par un laser. Pour ce faire, il faut tout d'abord acquérir de nouvelles connaissances sur les bases de la physique d'ignition puis démontrer l'ignition par choc avec LMJ² et enfin développer les éléments clés pour les technologies IFE³. Cependant, de nombreuses contraintes surtout du type technique s'imposent pour passer de l'expérience aux réacteurs, principalement le réacteur doit tout d'abord avoir une performance élevée (un facteur du gain d'énergie supérieur à 5), produire de la masse à la cible à la vitesse requise, assurer la propagation du laser etc...[4]

1. European Strategy Forum on Research Infrastructure

2. Laser Mégajoule

3. inertial fusion energy

4.1.3 Phases du projet

Le programme proposé suit une approche à trois phases de haut niveau pour que HiPER soit conduit par les partenaires de L'union européenne[4].

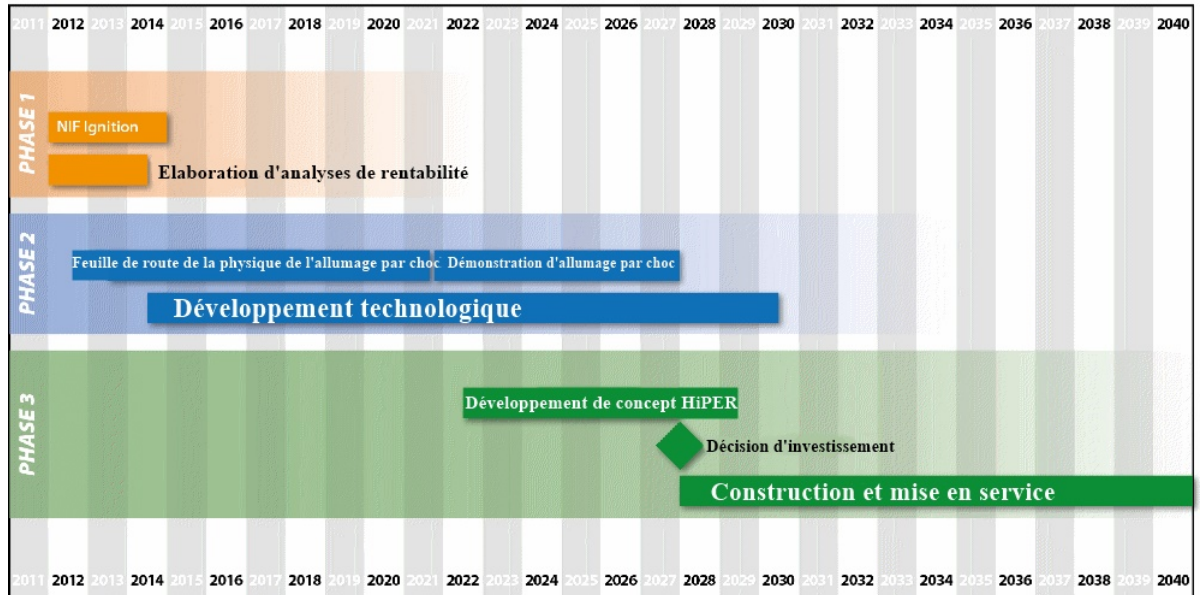


FIGURE 4.1 – Les phases du projet

[4]

4.1.3.1 Phase 1 : Programme d' Ignition avec LMJ

La planification des expériences sous-jacents et la modélisation ont commencés en 2013, phase 1 commence avec une campagne d'ignition comportant des expériences de sous-ignition conduits dans des installations européennes et possiblement américaines (LULI 200, Orion, VULCAN, Petal et Omega) dans le but d'atteindre l'ignition dans LMJ entre 2020 et 2025. En même temps, une stratégie économique est suivie afin d'optimiser les gains pour que l'énergie laser soit économiquement viable.[4]

- Source de financement : National avec contribution de L'UE[4].
- Accès aux installations : installations existants jusqu'à 2016 suivi par l'accès à laser MégaJoule[4].

4.1.3.2 Phase 2 : Développement des technologies

Le développement des technologies a commencé en 2014 avec des programmes financés au niveau national avec le soutien de la commission européenne dans les domaines à potentiel commercial élevé à court terme. Ces technologies comprennent : le développement des nouvelles générations de laser par la France et le Royaume-Uni, les matériaux avancés et les chambres de fusion par la France et l'Espagne, La construction de communautés par la Grèce etc... Le programme du développement principal va commencer en 2022 où le financement va croître à mesure que le risque diminue[4].

- Coûts : estimé à environ 500 Millions d'euros (+50% -50%) [4].
- Durée : 12 à 13 ans[4].
- Source de financement : National avec possibilité d'investissement/contribution de l'UE [4].

4.1.3.3 Phase 3 : Développement d'un prototype d'usine : évaluation des investissements et construction

- Commencement : environs 2022 avec des décisions d'investissement ciblés en 2027[4].
- Début de construction probable en 2027 pour durer 12 ans[4].
- coûts : estimés de 7 à 12 Billions d'Euros[4].
- Source de financement : investissement privé ou partenariat privé-public[4].

4.1.4 Un projet à l'échelle internationale

Le programme européen de l'énergie de laser va s'appuyer sur les capacités existantes et exploitera des partenaires internationaux stratégiques, évitant ainsi la duplication tout en gardant l'option de passer à des constructions futures sur des bases européennes s'il est nécessaire[4]. HiPER implique plus que 70 chercheurs de 11 pays européens (République tchèque, France, Allemagne, Grèce, Italie, Pologne, Portugal, Russie, Espagne, Suède et Royaume-Uni) et a établi des liens forts avec les Etats-Unis, le Japon, la Chine, la Corée du Sud et le Canada[4]. Un effort scientifique et technologique coordonné pour achever HiPER existe entre des laboratoires de recherche majeurs comme Laser MégaJoule, le PETawatt Aquitaine Laser (PETAL), Orion, le Extreme Light Infrastructure (ELI) et le Prague Asterix Laser System (PALS) où chaque laboratoire conduit des recherches sur des éléments discrets selon leurs intérêts[4].

4.1.5 Conclusion

Le projet HiPER semble être dans ses premiers stades et un résultat à court terme est presque impossible vu les entraves techniques et technologiques. Il est donc légitime de dire que HiPER est un projet à vision à long terme qui nécessite beaucoup de recherche et de financement. Ceci dit, beaucoup de laboratoires et d'organismes économiques de différents pays ont montré leur enthousiasme à l'égard de ce projet et leur volonté de collaborer avec beaucoup d'autres parties. Après avoir vu le progrès de HiPER, il serait intéressant d'étudier un autre projet assez important appelé ITER.

4.2 Le reacteur ITER

ITER (du nom International Thermonuclear Experimental Reactor) est un projet qui vise construire le plus grand tokamak jusqu'à présent pour démontrer l'énergie de fusion à l'aide du confinement magnétique. Plus de 35 pays sont aussi en collaboration sous le nom de ITER pour tester des ressources, des technologies et des régimes de plasma afin de produire de l'électricité à des perspectives commerciales.[3]

4.2.1 Historique

Le début de ce projet ambitieux remonte à 1985, lorsque Ronald Reagan⁴ et Mikhaïl Gorbatchev⁵ se rencontrent pour la première fois à Genève. La réalisation du projet a connu plusieurs obstacles liés principalement à des raisons politiques car c'est une collaboration entre nations. Il est programmé d'être opérationnel en 2025, 40 ans après la naissance de l'idée.[18]

4.2.2 Objectifs

ITER a plusieurs objectifs :

- Produire 500 MW de puissance de fusion pour 400 s[2]
- Démontrer le fonctionnement intégré des technologies d'une centrale de fusion électrogène[2]
- Réaliser un plasma deutérium-tritium auto-entretenu[2]

4. Ronald Wilson Reagan, né le 6 février 1911 à Tampico et mort le 5 juin 2004 à Los Angeles, est un acteur et homme d'État américain, président des États-Unis du 20 janvier 1981 au 20 janvier 1989

5. Mikhaïl Sergueïevitch Gorbatchev ou Gorbatchov, né le 2 mars 1931 à Privolnoïe dans l'actuel kraï de Stavropol, est un homme d'État soviétique et russe qui dirigea l'URSS entre 1985 et 1991.

- Expérimenter la production de tritium[2]
- Démontrer la sûreté d'un dispositif de fusion[2]

4.2.3 Principe du fonctionnement

La mission d'ITER est de produire de l'électricité à partir de la réaction de fusion. Une fois mis en marche le réacteur sert à collisionner les noyaux des atomes d'hydrogènes à des températures et pression extrêmes pour former des atomes d'hélium. Lors du procédé, le gaz à l'intérieur de la chambre du réacteur est porté à haute température pour dissocier les électrons des noyaux et transforme le gaz en plasma[7].*«De puissantes pompes vont évacuer l'air et les impuretés du réacteur pour maintenir une très basse température. Les bobines supraconductrices vont ensuite être activés pour préserver et contrôler le plasma. Un combustible gazeux va être injecté dans la chambre à vide. Un courant électrique déclenche un claquage, puis après ionisation, les gaz sont transformés en plasma. Les électrons et les ions du plasma entrent en collision et la température du plasma augmente. Il y a ensuite la fusion qui va entraîner une grande quantité d'énergie et une grande chaleur»*[7] qui va ensuite être utilisé pour créer de la vapeur et faire tourner des turbines pour créer de l'électricité.[7] Au sein de l'ITER 3 conditions sont indispensables pour réaliser la fusion.

- haute température (environ 150millions de degrés).[7]
- grande densité de particules afin qu'il y est de nombreuses collisions[7]
- un temps de confinement de l'énergie long afin d'accroitre autant que possible la vitesse de collision des particules.[7]

4.2.4 Défis

4.2.4.1 Financières

Le projet ITER a largement surpassé ces couts totaux dans l'étude primaire du projet. Les coûts s'élèvent de 5 milliards d'euros à 13 milliards. Par conséquent les collaborateurs du projet ont commencé de se poser la question s'ils vont continuer de financer le projet ou l'abandonner car sa faisabilité demeure incertaine. En outre certaines associations soulignent que le projet ITER ne répond pas aux besoins énergétiques d'aujourd'hui et il serait mieux d'utiliser ces énormes sommes d'argent dans le développement des énergies renouvelables. Afin de remettre le coût du projet en perspective, rappelons que la facture énergétique européenne dépasse chaque année les 400 milliards d'euros.[3]

4.2.4.2 Technologiques

Matériaux et composants : Au centre du plasma d'Iter, la température atteindra cent millions de kelvins. À moins de 10 mètres de là, elle sera de 4,5 kelvins dans les bobines supraconductrices.[32] La première surface vue par le plasma, la chambre à vide, reçoit 20 MW/m^2 a une température de surface entre 1200 et 1500 C et 1 à 5 MW/m^2 ailleurs. Il y a un véritable défi dans la capacité de supporter de tels flux de chaleur ainsi que dans la conception de matériaux qui doivent être peu activables sous l'effet des neutrons de haute énergie.[32] Des solutions dérivées du klystron⁶ sont entrain d'être étudiées pour évacuer le flux de chaleur. Le problème de l'usure des matériaux par l'impact des particules est un champ de négociation.il faut trouver un compromis entre performance du plasma et vitesse d'usure des matériaux.[32]

Les bobines supraconductrices :

Dans la chambre du réacteur ITER on trouve 3 types de bobines qui servent au confinement et chauffage du plasma[32] :

- 18 bobines toroïdales produisant un champ fixe et qui ont pour but le confinement du plasma.
- 6 poloïdales produisant un champ variable pour la stabilisation du plasma.
- un noyau central produisant un champ variable pour la création du courant dans le plasma.

Les bobines doivent permettre l'accès à un plasma de longue durée avec un consommation d'électricité raisonnable (Les courants mis en jeu sont de plusieurs dizaines de kiloampères dans des conducteurs de type câble en conduit) donc le choix optimal est d'utiliser un matériau supraconducteur qui s'agit du niobium étain pour le cas d'ITER car il supporte les champs élevés (de l'ordre de 13 teslas).[32] Pour assurer un bon fonctionnement la machine doit operer a une température de 4,5 kelvins qui sera assuré par une circulation forcée d'hélium liquide ou supercritique.[32] La conception de ces bobines se fait sur plusieurs étapes ; il faut d'abord dimensionner ces bobines en considérant les efforts énormes subit par le système et la thermohydraulique de la circulation de l'hélium ensuite la conception du matériau et la géométrie des enroulements et enfin tester les performances magnétiques et électriques par des modèles représentatives en laboratoire. Par ailleurs il existe d'autres problèmes techniques comme les connexions de courant et la circulation de l'hélium .[32]

La robotique :

Les conditions de fonctionnement d'ITER vont solliciter fortement les matériaux, les user, entraînant le changement de composants internes. Alors une fois que la

6. Le klystron est un tube à vide qui permet de réaliser des amplifications de moyenne et forte puissance à bande étroite en hyperfréquences.

machine aura fonctionné l'intervention des opérateurs humains directement est impossible à cause des conditions hostile dans le réacteur comme la température et la forte radiation d'où la nécessité de conception de robots spécialisés. Ces robots vont servir à plusieurs missions différentes comme l'inspection, maintenance ou manipulation de pièces dans l'enceinte.[32] Pour assurer un bon fonctionnement des robots il est impératif de tenir compte de plusieurs agents dans leur conception comme la résistance des composants électroniques à la température et à la radiation ainsi que la propreté dans l'intervention pour garantir une meilleure performance du plasma.[32] Dans certaines régions de la chambre du réacteur la télémanipulation des robots sera presque impossible à cause des hauts niveaux de radiations. Pour résoudre ce problème le système de supervision fera appel à la réalité virtuel. Un calculateur recréera de manière virtuelle l'espace d'évolution du robot pour, d'une part, fournir une vision à l'opérateur et, d'autre part, aider aux mouvements précis de manipulation. D'où la nécessité de création d'une interface de supervision qui aura pour but le contrôle du robot et son étalonnage.[32]

4.2.5 Conclusion

ITER se révèle comme étape préindustrielle qui a pour objectif de montrer la faisabilité d'un réacteur nucléaire à base de fusion. Dans le cas du succès d'ITER l'étape suivante est le réacteur DEMO qui a pour but de montrer la production continue d'énergie car DEMO va assurer la production du tritium à l'intérieur du réacteur par contraste à ITER qui aura un flux extérieur de tritium, et si tout se passe comme prévu DEMO inaugurera l'ère de la fusion nucléaire industrielle.

Chapitre 5

La fusion demain

5.1 Filière énergétique crédible ?

Après avoir vu les processus derrière la production de l'énergie de fusion, il faut justifier le choix d'entamer ou non cette approche énergétique. Pour ce faire on va avoir recours aux critères définies en 1^{er} chapitre qui sont l'acceptation publique, la sécurité, la non-prolifération, le respect de la nature et le coût, pour pouvoir situer l'énergie de fusion dans le plan énergétique du futur[40].

5.1.1 L'acceptation publique

Pour pouvoir utiliser l'énergie de fusion, il faut qu'il existe un consensus général sur cette forme d'énergie. Non seulement pour satisfaire aux besoins publics d'une manière convenable mais aussi pour garantir les investissements et l'engagement[40]. Afin d'évaluer l'opinion publique à l'égard de la recherche et développement dans l'énergie de fusion, nous allons dans un premier temps donner les principaux contributeurs dans cette recherche ainsi que leurs dépenses totales jusqu'à présent, puis nous allons présenter une recherche conduite par l'ICEP¹ sous la forme d'un questionnaire mené dans 4 pays : Finlande, l'Espagne, le Royaume-Uni et l'Autriche[44].

1. Les dépenses sur l'énergie de fusion : Beaucoup d'organismes économiques ont montré leur enthousiasme en ce qui concerne la recherche et développement dans l'énergie de fusion, que ce soit les start-ups privées comme General fusion, TAE Technologies, commonwealth ou bien les gouvernements (plus que 35 pays travaillent ensembles sous le projet ITER en europe)[1]. La contribution de ces organismes a atteint à peu près 10 billion d'euros en Europe en 1990 et le budget consacré au projet ITER vaut 13 billion d'euros

1. International Conference on Environmental Psychology

pour être dépensée entre 2008 et 2020[1]. Il est estimé que les dépenses dans la recherche et développement vont atteindre à peu près 70 billions d'euros jusqu'à l'implémentation de l'électricité fournie par l'énergie de fusion, selon un rapport publié par bundestag.de² en 2002[17]. Il est à noter que l'engagement de plusieurs hommes d'affaires comme Jeff bezos, fondateur de amazon, peter thiel co-fondateur de paypal et paul allen co-fondateur de microsoft va influencer positivement l'opinion publique et instaurera de la confiance avec leurs projets respectives General Fusion, Helion Energy et Tri Alpha Energy[42]. Bezos a réussi d'attirer 20 millions de dollar d'investissement du gouvernement canadien et 74 millions du capital risque, tandis que helion energy touche 30 millions et tri alpha a collecté plus de 200 millions[?].

2. La recherche ICEP : ICEP a mené un questionnaire dans les 4 pays cités précédemment sur un nombre N d'individus dans chaque pays, voici la répartition[44] :

Variable	Categorie	Autriche (%)	Finland (%)	Espagne (%)	Royaum-uni (%)
	N	921	944	969	943
Sexe	Femelle	51.7	49.3	47.9	47.7
	Male	48.2	50.6	52.0	52.1
AGE	18-29	17.8	19.3	16.4	17.9
	30-39	16.0	16.0	21.1	16.3
	40-49	21.1	20.7	20.7	19.4
	50-64	27.1	22.9	22.9	24.4
	65+	18.0	20.0	18.9	22.0
EDUCATION	< 1er cycle	75.6	74.6	46.7	65.6
	≥ 1er cycle	24.4	25.4	53.3	34.4
RESIDENCE	< 100,000	60.9	48.5	44.4	61.3
	≥ 100,000	39.1	51.5	55.6	38.7

FIGURE 5.1 – La répartition des individus [44]

Ce questionnaire contient plusieurs questions qui touchent différents aspects évaluant la tendance publique. On ne s'intéresse ici que des résultats majeurs seulement, représentés dans le graphe ci-dessous sur une échelle de 1 à 5[44] :

2. Le Bundestag est l'assemblée parlementaire de la République fédérale d'Allemagne

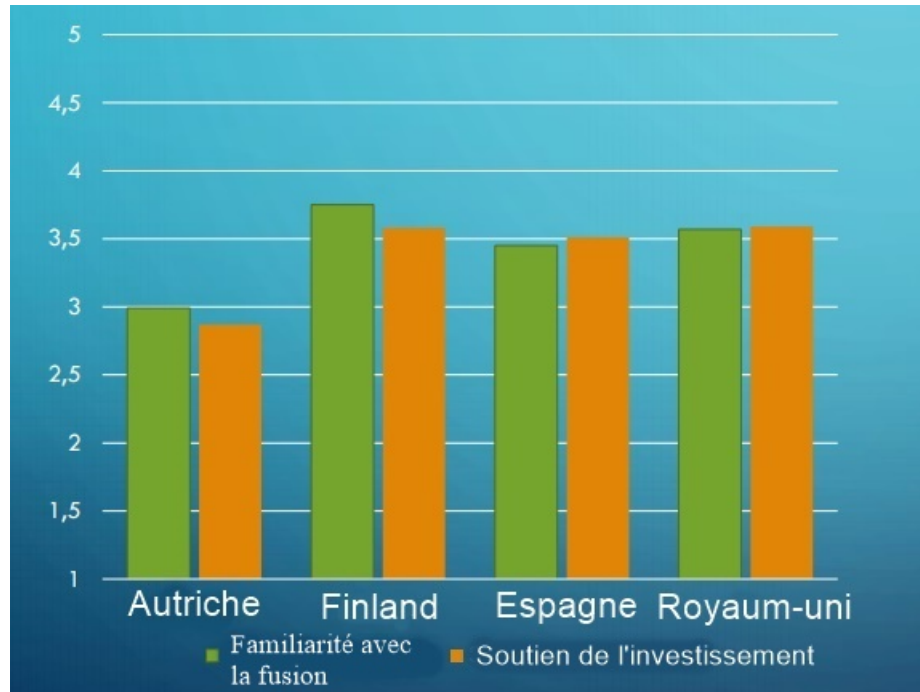


FIGURE 5.2 – Les résultats du questionnaire [44]

Les majeures conclusions à tirer de cette recherche sont :

- Les pays ont une familiarité moyenne avec la fusion[44].
- la majorité des interrogés (54-80%) dans les 4 pays acceptent le développement de la fusion mais le soutien de l'investissement public est largement plus faible (35-58%) [44].
- Les réponses varient significativement entre les 4 pays [44].
- L'évolution de l'énergie de fission a une influence positive sur l'opinion publique de l'énergie de fusion[44].
- La plupart des enthousiastes des énergies renouvelables ont montré leur soutien pour la recherche dans l'énergie de fusion [44].

5.1.2 La sécurité

Lorsqu'on parle de réacteurs nucléaires, de nombreuses accidents arrivent en tête, notamment celui de Tchernobyl, il est légitime donc de se poser des questions à propos la sécurité des réacteurs nucléaires à fusion[40].

- En premier lieu, le carburant nécessaire pour la réaction de fusion n'est disponible que pour une période très courte à chaque instant contrairement

aux réacteurs de fission où le carburant reste dans le cœur du réacteur pour plusieurs années[34]. En second lieu, les réactions de fusion ont lieu à des hautes températures et le principe de la fusion n'est pas basé sur la multiplication des réactions à partir de la propulsion des neutrons, ce qui fait qu'un mal fonctionnement va provoquer l'arrêt immédiat de la réaction[34].

- La radioactivité : Les réactifs (D et Li) et le produit direct (He) de la réaction de fusion ne sont pas radioactifs, toutefois, un réacteur doit avoir une protection de radiation vu qu'il contient du tritium et des matériaux activés par les neutrons[34]. Cependant, des études menées par R.W.Conn et J.Reader de l'université de California ont montré qu'un choix adéquat de ces constituants peut minimiser la radioactivité induite et le recyclage doit devenir possible après quelques décennies . Ainsi, la radioactivité n'est pas inhérente à la fusion nucléaire contrairement à la fission[34].
- Autres risques : les concepteurs des réacteurs doivent minimiser des risques non nucléaires comme la libération des toxines chimiques comme le Béryllium Be, la perte soudaine des liquides refroidissants etc. . . mais aucun problème ne s'est avéré grave pour être considéré pour le moment[34].

5.1.3 La non-prolifération

Un réacteur de fusion nucléaire produit un très grand nombre de neutrons par seconde (de l'ordre de 10^{20}) pour les réacteurs produisant une puissance à l'échelle du gigawatt, alors la possibilité de la production de la matière fissile est, sans aucune surprise, mise en question[22]. Il y a trois scenarios possibles de prolifération[22] :

1. La prolifération clandestine : Elle consiste en la production de la matière fissile dans un établissement qui ne soit pas déclaré, à partir de la réaction de fusion[22]. Pour cela, il faut que cet établissement ne soit pas détectable facilement. Dans ce propos, une étude a été conduite par Kuteev B.V. de l'institut Kourtchatov pour déterminer la taille minimale d'un dispositif qui peut être utilisé comme prototype de production[22]. Il conclut qu'un dispositif relativement compact, alimenté par approximativement 40 MW d'une façon continue peut produire 1.8MW d'énergie de fusion continuellement[22]. Avec un rapport cyclique optimiste de 85% et en supposant que 80% de neutrons sont captés, le dispositif peut produire 3.5Kg de ^{239}Pu ou ^{233}U par année, ce qui est équivalent à la moitié de l'SQ (significant quantity) définie par l'IAEA ³[22]. Si ce dispositif était capable d'opérer d'une manière clandestine pour quelques années, il peut constituer un risque de proliférations, mais l'exigence d'une source continue de 40MW de puissance, le refroidissement,

3. L'agence internationale de l'énergie atomique.

la chaîne d'alimentation, les dispositifs de convertissement de puissance et un réacteur bien protégé font qu'une telle installation devra être largement visible[22]. D'où la difficulté de la prolifération clandestine.

2. La production secrète : pour détecter la présence d'une matière fertile/fissile dans un réacteur de fusion, il suffit de détecter l'émission des particules gamma[22]. Sachant que le SQ (significant quantity) vaut 8Kg du plutonium ou uranium par an, la détection des particules gamma devient très facile comme l'illustre le tableau ci-dessous[22] :

	Uranium-238/Plutonium-239	Thorium-232/Uranium-233
Masse de la matière fertile par 1000cm ³	2.75 g de uranium	2.25 g de thorium
Masse de la matière mesurée	2.73 g de ²³⁸ U	0.7 µg de ²³² U (50% de la concentration finale)
Taux d'émission des particules gamma	220s ⁻¹ (1.001 MeV)	185 000 s ⁻¹ (2.614 MeV)
Fraction de gamma qui s'échappe	0.151 (pour 1.001 MeV gammas dans le Pb)	0.238 (pour 2.614 MeV gammas dans le Pb)
Signal de détection	0.27 comptes par seconde	350 comptes par seconde
Temps de détection	(minutes)	(secondes)

FIGURE 5.3 – Détermination d'existence des particules gamma [22]

3. Le Breakout : L'objectif ici est encore de produire 8Kg de plutonium ou uranium aussi vite que possible[22]. En se basant sur des calculs et les résultats du tableau précédent, ce processus peut durer au minimum quelques jours (en se basant sur le taux de production maximal seulement) Princeton ⁴ estime que le temps nécessaire pour reconfigurer et redémarrer le réacteur est de l'ordre de quelques mois, d'où la difficulté du Breakout [22].

5.1.4 L'effet sur l'environnement

Un grand avantage de l'énergie de fusion est qu'elle utilise des éléments qui ne sont pas radioactifs, ne polluent pas l'atmosphère et ne contribue pas à l'effet de serre ni la destruction de la couche d'ozone[24]. L'hélium est chimiquement inerte et très utile dans l'industrie [24]. De plus il n'y a pas de problèmes d'extraction de Li ou du transport des carburants, et contrairement à l'énergie solaire, l'hydroélectricité ou la biomasse, la fusion nucléaire ne présente pas de problèmes écologique, géophysiques ou d'exploitation de la terre[24]. D'après les recherches de PLANELEC ⁵ l'utilisation

4. L'université de Princeton est une université de recherche privée, située dans la ville de Princeton dans l'État du New Jersey, aux États-Unis

5. une société spécialisée dans le secteur d'activité des travaux d'installation électrique

de l'énergie de fusion va réduire l'émission du CO₂ par 10% dans la période 2040-2100[24]. La radioactivité et les autres risques liées à la nature des éléments chimiques ont été discutée dans la partie précédente et aucun problème majeur ne se présente[24].

5.1.5 Le coût

Vu que l'énergie de fusion n'a pas encore atteint un stage assez avancé, il est difficile de donner avec précision ses coûts. Une recherche faite par Denis Bednyagin et Edgard Gnansounou de l'EPFL⁶ donne une estimation de ces coûts[25]. Cette recherche est basée sur trois scénarios qui dépendent de l'investissement dans la recherche, développement et démonstration (RD&D) comme le montre le tableau ci-dessous où un coût élevé correspond à un grand investissement dans la recherche et même la construction de plusieurs réacteurs DEMO (pour passer de la théorie à la pratique)[25].

	Scenario A	Scenario B	Scenario C
Coûts annuels en 2051 (Billion €)	1.2	1.6	2.0
Durée	50	50	50
Dynamiques durant 2051-2100	Reduction linéaire jusqu'à zero en 2100		

FIGURE 5.4 – Les dépenses dans chaque scénario [25]

Afin de faire le bilan, il faut évaluer les capacités des réacteurs et leurs coûts selon chaque scénario, ce qui est illustré dans les deux graphes suivants[25].

6. école polytechnique fédérale de Lausanne

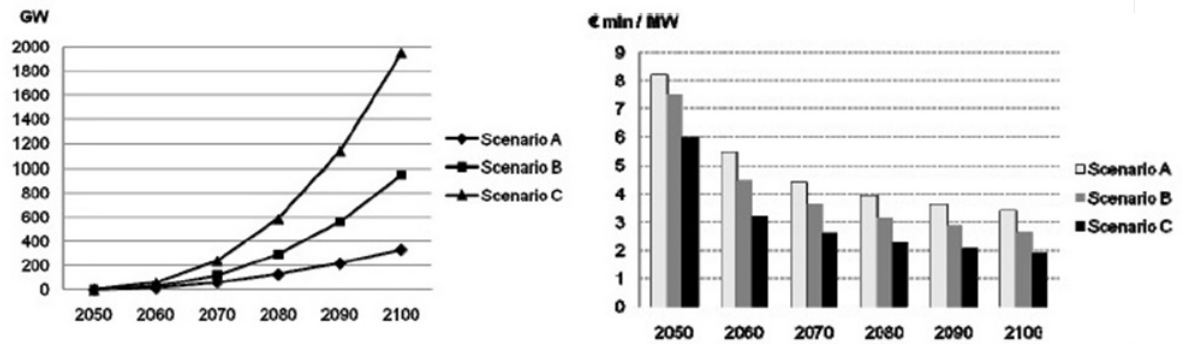


FIGURE 5.5 – Les capacités (à gauche) et les coûts (à droite) selon chaque scénario [25]

Finalement, il faut considérer le fait que les revenus de l'énergie de fusion ne sont pas capables de couvrir les dépenses à court terme, mais ça n'exclut pas le fait que les bénéfices peuvent dépasser les coûts dans le futur (au-delà de 2100 selon le rapport) d'où le recours aux prêts à court terme, et ainsi on doit de plus considérer le taux d'escompte pour calculer la VAN⁷[25].

	Taux d'escompte				
	2%	3%	4%	5%	6%
Scenario A	-122	-75	-50	-36	-27
Scenario B	562	238	95	31	3
Scenario C	2692	1226	559	253	110

FIGURE 5.6 – Le calcul de VAN à partir du taux d'escompte [25]

Pour conclure, les revenus de l'énergie de fusion dépassent considérablement les dépenses sauf dans le scénario A qui est le scénario le plus pessimiste, ce qui fait que sur le plan économique, l'investissement dans la recherche et développement de l'énergie de fusion vaut le coût et la poursuite de la recherche et la démonstration semble une stratégie économiquement viable[25].

7. Valeur actuelle nette

5.2 Conséquences géopolitiques scientifiques et industrielles

La fusion comme source d'énergie principale pourrait être une vraie révolution qui changera le monde et la façon qu'on consomme l'énergie. Ceci n'est pas encore une réalité mais pourtant on peut anticiper les retombées géopolitiques technologique et industrielles des projets conçus pour rendre ceci une réalité.

5.2.1 Conséquences géopolitiques

Lors des débats publics sur ITER, les conséquences géopolitiques étaient parmi les majeures inquiétudes. En effet ces risques existent car ITER est un projet à l'échelle international qui rassemble sept partenaires internationaux qui représentent non seulement les forces majeures dans le monde mais la moitié de la population : Les états-unis, la Chine, la Corée, l'union européenne la Russie, le Japon, l'inde etc. Il est donc probable que des tensions politiques entre ces partenaires, à cause de ce projet en commun, peuvent apparaître et influencer les relations entre les nations d'une façon négatives. Le progrès scientifique dans la fusion inertielle n'a pas seulement conduit au développement de réacteurs à base de lasers très puissants mais aussi à des armes nucléaires donc la fusion dans ce cas se situe dans le cadre de La dissuasion nucléaire qui est une stratégie militaire.[18]

5.2.2 Conséquences scientifiques et industrielles

Les projets de réacteur de fusion comme ITER ou HIPER sont très compliqués et demandent beaucoup de compétences techniques dans divers domaines, suite à ce besoin ces projets ont des conséquences industrielles socio-économique et des conséquences indirectes dans d'autres domaines.[18] En premier lieu ces projet ont des budgets importants, prenant le cas d'ITER qui a un budget de 15 milliards d'euro. L'Institut d'économie publique de Marseille a effectué des études quantitatives de l'impact du projet, les résultats montrent que les dépenses d'ITER en région bénéficieront pour moitié à l'économie locale et pour moitié à la sous-traitance industrielle. Elles représenteront un montant total d'un milliard d'euros pendant la construction et une valeur annuelle de 135 millions d'euros pendant l'exploitation. Une autre étude a été réalisée par l'INSIDE⁸ afin d'identifier le développement technologique induit par le projet ITER. La conclusion de cette étude est qu'il est fort probable qu'ITER favorise la naissance de laboratoires de recherches et d'entreprises grâce aux infrastructures déjà mises en place. Par ailleurs, la création d'emplois indirectement dus à ITER a été estimée à plus de 6000 sur les 30

8. Institut de l'innovation et du développement de l'entrepreneuriat

ans d'exploitation de la machine. Enfin, il ne faut pas négliger l'enrichissement socioculturel de la région du a l'intégration de chercheurs et d'ingénieurs provenant du monde entier.[18] En un second lieu ces projets ont des retombées indirectes sur d'autres domaines. Un exemple de telles retombés est la tomographie⁹ par résonance magnétique. Cette technique d'imagerie médicale consiste à enregistrer la vibration des atomes composant les tissus vivants lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique. Les aimants supraconducteurs nécessaires à cette technique ont été développés dans le cadre des études sur la fusion magnétique. Les recherches autour de la fusion inertielle ont déjà permis, elles aussi, des avancées dans différents domaines comme le micro-usinage, l'instrumentation optique, etc.[18]

5.3 Quand le premier réacteur ?

Depuis la première tentative de construire un réacteur de fusion en 1938, on dirait toujours que l'énergie fusion serait obtenue dans 30 ans. C'est même devenu une blague entre les physiciens [48]. Encore pire, John Holdren¹⁰ affirme pendant un entretien avec Scientific America¹¹ qu'en 1966 la la communauté scientifique pensait que d'ici 1980 la fusion serait réalisée. En 1980 c'était 20 ans, et 35 en 2000 .[31] Cependant, on peut voir ça avec un regard optimiste et dire que ce retard est une conséquence d'une meilleure compréhension de la fusion nucléaire, et avec chaque retard on devient plus conscient des exigences et des défis qui doivent être surmontés avant d'arriver à une réaction de fusion durable. On devient donc plus apte à prendre les bonnes mesures. En effet, le rythme de progrès de la fusion pendant la période entre 1970 et 2000 a été plus rapide que la loi de Moore en termes de performances des appareils [37]. Mais la question de savoir quand nous allons finalement exploiter l'énergie de fusion reste toujours ouverte. La réponse à cette question réside peut-être dans le projet ITER qui, avec sa finition estimée en 2035 [8], serait le premier réacteur de fusion, ouvrant ainsi la voie à la construction d'autres réacteurs. Mais il y en a encore des doutes. En effet, lorsque ITER a reçu son approbation officielle en 2006, il était prévu d'atteindre la fusion pour la première fois en 2016 et de coûter 5 milliards d'euros mais, comme expliqué dans le chapitre 4 il a connu des retards en raison de problèmes de construction et de conception des composants et il était réestimé d'être terminé en 2035, soit un retard de 19 ans[38]. ITER est à 65% terminé[30], mais son coût prévu est passé de 5 milliards d'euros à 20 milliards d'euros [36], 4 fois plus que la première estimation, ce qui inquiète les chercheurs et les investisseurs et les rends plus hésitant

9. La tomographie est une technique d'imagerie, très utilisée dans l'imagerie médicale

10. Directeur sortant de l'Office fédéral de la science et de la technologie

11. Scientific American est un magazine de vulgarisation scientifique américain à parution mensuelle existant depuis le 28 août 1845

à continuer de financer le projet. Les États-Unis ont même menacé d'arrêter leurs financements pour le projet en 2014 et 2015 mais, heureusement, cela ne s'est pas produit et, en fait, ils ont accepté de doubler leur contribution budgétaire prévue au projet ITER en 2018 [21] [29]. L'histoire peut donc se poursuivre. Ainsi, si nous devons compter uniquement sur ITER, l'année 2035 sera probablement l'année où l'humanité aura son premier réacteur à fusion qui produit plus d'énergie qu'il n'en faut. Mais ça reste un réacteur de démonstration seulement. La bonne nouvelle c'est que, outre que ITER, il y'a d'autres projets qui ont aussi des potentiels séduisants. On cite ici particulièrement le réacteur HL-2M de la Chine dont la construction s'est terminée en 2019 et qui deviendra opérationnel en 2020[47]. Ce tokamak devrait générer des plasmas à une température de l'ordre de 200 millions de degrés et il « permettra d'affiner encore les bases scientifiques et technologiques de la fusion magnétique dans la perspective de son exploitation industrielle » comme indiqué sur le site d'ITER [10]. De plus, la Royaume-Uni vise aussi à construire son propre réacteur à fusion d'ici 2040 avec un investissement de 237 millions d'euros [42] [41]. Au surplus, l'intervention d'entreprises privées financées par des milliardaires représente une étape charnière dans la poursuite de la fusion nucléaire comme déjà vu précédemment dans ce chapitre. Cela augmentera les efforts déployés pour créer de nouvelles techniques pour réaliser des réactions nucléaires, comme le cas de General Fusion qui a déjà inventé une nouvelle méthode pour réaliser la fusion nucléaire totalement différente de la méthode de confinement magnétique et celle de la fusion inertielle [9]. La compétition entre les startups sans doute va pousser encore plus les efforts dédiés pour maîtriser la fusion nucléaire car chaque startup vise être la première à le faire puisque ça le donnerait probablement le contrôle d'un marché de billions de dollars [20]. Nous ne pouvons donc pas être sûrs du moment où nous pourrions utiliser la fusion nucléaire pour produire de l'électricité. Mais dans la situation actuelle, ça ne sera pas avant au moins 20 ans, sauf dans le cas où une startup réussie à le faire avant les grands projets dont nous avons parlé. Avons-nous le temps d'attendre aussi longtemps ? Et si on attend, ces réacteurs tiendront-ils leurs promesses ? ne devrions-nous plutôt investir notre argent dans les énergies renouvelables ou la fission nucléaire ?

Conclusion générale

Dotée d'un potentiel énergétique énorme tout en étant une source propre et sécurisé, l'énergie de fusion semble l'énergie des siècles à venir. Cependant les difficultés techniques qui résident derrière l'obtention de cette énergie rendent ce rêve énergétique difficile à atteindre. On est donc face à un vrai dilemme : doivent-on se concentrer sur les formes d'énergies plus sûrs comme les énergies renouvelables où bien aller jusqu'au bout avec l'énergie de fusion. Jusqu'à présent, le projet JET a pu atteindre 16 MW de puissance fournie (rendement inférieur à 1) tandis que l'objectif de ITER est d'atteindre 500 MW, ce qui semble un objectif peu réaliste, mais l'évolution massive de la recherche dans l'énergie de fusion la redonne de la crédibilité. En se référant à la loi de Moore, l'évolution de la recherche dans l'énergie de fusion est comparable à celle des téléphones portables. Une évolution qui, certes, nécessitait un trillion de dollar de recherche. Ce qui évoque un autre problème ; celui d'investissement. Afin de rendre l'énergie de fusion économiquement viable, il faudrait investir davantage dans la recherche et développement. À priori, selon quelques modèles économiques élaborés précédemment, le taux d'investissement actuel peut aboutir à une solution viable vers le début de 2100, mais les imprévisibilités, l'état écologique et la pénurie en énergie fossiles imposent un changement de stratégie énergétique le plutôt possible. Une prise de conscience par les investisseurs et les gouvernements devient donc indispensable. Pour mettre les choses en perspective, les dépenses militaires des états unis dépassait 700 billions de dollars en 2019 tandis que le coût total du projet ITER est de 20 billions. Nous sommes donc à la veille de l'obtention d'une source si efficace, qu'un seul verre d'eau de mer peut produire l'équivalent d'un baril de pétrole, à condition de mobiliser les ressources et garder la volonté de la communauté scientifique.

Bibliographie

- [1] Fusion for energy-bringing the power of the sun to earth. <https://www.f4e.europa.eu/>.
- [2] Les objectifs d'iter. <https://www.iter.org/fr/sci/Goals>.
- [3] Iter. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/iter>, 2012.
- [4] Final report summary - hiper (european high power laser energy research facility (preparatory phase study)). <https://cordis.europa.eu/project/id/211737/reporting>, 2015.
- [5] Aidan Farrow, Kathryn A Miller et Lauri Myllyvirta. Toxic air :the price of fossil fuels, 2020.
- [6] Anonyme. Deutérium. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Deutérium>.
- [7] Anonyme. Fonctionnement de l'iter. <http://1ere-tpe-nucleaire.e-monsite.com/pages/ii-garder-le-nucleaire-sain/fonctionnement-de-l-iter.html>.
- [8] Anonyme. Frequently asked questions. https://www.iter.org/FAQ#collapsible_7.
- [9] Anonyme. General fusion. https://en.wikipedia.org/wiki/General_Fusion.
- [10] Anonyme. Les tokamaks au cEur de la recherche. <https://www.iter.org/fr/sci/tkmkresearch>.
- [11] Anonyme. Problèmes du nucléaire. <http://gigadou.e-monsite.com/pages/problemes-du-nucleaire.html/>.
- [12] Anonyme. Résolution de la production d'énergie des étoiles. <https://fr.wikipedia.org/wiki/E%3Dmc2>.
- [13] Anonyme. Sources of greenhouse gas emissions. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions/>.
- [14] Anonyme. Tokamak. <https://www.cidehom.com/tokamak-201.html>.

- [15] Anonyme. Uranium. <https://www.laradioactivite.com/site/pages/uranium238et235.htm>.
- [16] Anonyme. When will fossil fuels run out ? <https://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels/>.
- [17] Armin Grunwald, Reinhard Grünwald, Dagmar Oertel, Herbert Paschen. Thermonuclear fusion, 2002.
- [18] Alessandra Benuzzi-Mounaix. *La fusion nucléaire un espoir pour une énergie propre et inépuisable*. BELIN, 2008.
- [19] Matthew Bergstresser. Binding energy curves nuclear energy. <https://study.com/academy/lesson/binding-energy-curves-nuclear-energy.html>.
- [20] Bryan Borzykowski. Why bezos and microsoft are betting on this \$10 trillion energy fix for the planet. <https://www.cnbc.com/2019/03/06/bezos-microsoft-bet-on-a-10-trillion-energy-fix-for-the-planet.html>, 2019.
- [21] Adrian Cho. Senate subcommittee moves to pull u.s. out of iter fusion project. <https://www.sciencemag.org/news/2015/05/senate-subcommittee-moves-pull-us-out-iter-fusion-project/>.
- [22] Cleo B. Chou, Janam Jhaveri, Jane W. Baldwin, Phillip M. Hannam, Kyle Keller, Wei Peng, Sam Rabin, Arvind P. Ravikumar, Annette M. Trierweiler, Xingchen T. Wang et Robert Socolow. An energy technology distillate from the andlinger center for energy and the environment at princeton university, 2016.
- [23] Robert W. Conn. Nuclear fusion. <https://www.britannica.com/science/nuclear-fusion>.
- [24] Denis Bednyagin,Edgard Gnansounou. Potential role of fusion power generation in a very long term electricity supply perspective : Case of western europe.
- [25] Denis Bednyagin,Edgard Gnansounou. Real options valuation of fusion energy rd programme, 2011.
- [26] R. Dautray et J.P. Watteau, editor. *La fusion thermonucléaire inertielle par laser*. Eyrolles. Page 25.
- [27] Hayat Gazzane et Service Infographie. La consommation mondiale d'énergie bondira de près de 40% d'ici 2040, 2014.
- [28] Clément Fournier. Les Énergies renouvelables sont-elles vraiment une solution viable ? <https://youmatter.world/fr/energie-renouvelable-solution-viable-probleme/>.
- [29] Geert de Clercq. Iter nuclear fusion project avoids delays as u.s. doubles budget, 2018.

- [30] Nathaniel Gronewold. World's largest nuclear fusion experiment clears milestone. <https://www.scientificamerican.com/article/worlds-largest-nuclear-fusion-experiment-clears-milestone/>.
- [31] Fred Guterl. Is fusion energy in our future? <https://www.scientificamerican.com/article/is-fusion-energy-in-our-future/>.
- [32] CHRISTIAN GUYARD. Les trois défis technologiques d'iter. <https://www.industrie-techno.com/article/les-trois-defis-technologiques-d-iter.14489>.
- [33] Tim Herzog. Greenhouse gases and where they come from. <https://www.wri.org/blog/2006/10/greenhouse-gases-and-where-they-come>.
- [34] J Ongena et G Van Oost. Energy for future centuries—will fusion be an inexhaustible, safe and clean energy source ?, 2001.
- [35] James Rich et Michel Spiro Jean-Louis Basdevant. *Énergie nucléaire*. ÉCOLE POLYTECHNIQUE, 2002. page 241-248.
- [36] David Kramer. Iter disputes doe's cost estimate of fusion project. <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.2.20180416a/full/>.
- [37] Michel Laberge. Nuclear fusion within reach | michel laberge | tedxkc. <https://www.youtube.com/watch?v=b-LCfx9v4YQ>, 2014.
- [38] Matthieu Legouge. Iter : l'avenir de la fusion nucléaire se joue en france avec le tokamak. <https://www.clubic.com/energie-renouvelable/article-851159-1-iter-avenir-fusion-nucleaire-joue-france-tokamak.html>.
- [39] Adeline M. Énergie hydraulique : avantages et inconvénients.
- [40] Massachusetts Institute of Technology. The future of nuclear power, 2003.
- [41] Niall McCarthy. The iter nuclear fusion experiment : Who is providing the funding?
- [42] Matt McGrath. Nuclear fusion is 'a question of when, not if'. <https://www.bbc.com/news/science-environment-50267017>.
- [43] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Cross section. <https://www.britannica.com/science/cross-section-physics>.
- [44] University of Plymouth. International conference on environmental psychology. <https://www.plymouth.ac.uk/schools/psychology/international-conference-on-environmental-psychology>.
- [45] Organization of the Petroleum Exporting Countries. World oil outlook. www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2014.pdf, 2014.

- [46] Mines ParisTech. Consommation mondiale d'énergie. <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/res/S3-T1-ST1-1.pdf>.
- [47] Laurent Sacco. Fusion contrôlée : la chine dans la course pour rattraper son retard avec un soleil artificiel, 2019.
- [48] Nathaniel Scharping. Why nuclear fusion is always 30 years away, 2018.
- [49] TrustMyScience. structure-soleil. <https://trustmyscience.com/details-inedits-structure-couronne-solaire/structure-soleil/>.