



MARISTE  
POST-BAC

# COURS SAINTE MARIE DE HANN

## MARISTE POST-BAC



ANNEE ACADEMIQUE

2022-2023

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

CLASSE PRÉPARATOIRE 2<sup>ÈME</sup> ANNÉE

**THEME :**

**Production d'énergie à partir de la fusion nucléaire**

**Présenté par :**

BINETA LY

**Sous la Direction de :**

ALPHA OUSMANE TOURE

---

**Travail d'Initiative Personnelle Encadré – TIPE –**

## Remerciement

Je tiens à rendre grâce à Allah Azzawajel pour ce souffle de vie, le courage et la détermination dans tout ce que j'entreprends, particulièrement pour cette dure année de prépa. Ensuite, je tiens à remercier mon père pour la patience, l'encouragement et les conseils. Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à M. Touré Alpha Ousmane Touré pour sa disponibilité, ses conseils, sa patience et sa gentillesse surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Enfin, je tiens aussi à remercier l'ensemble du corps professoral de l'institut MARISTE POST-BAC pour leur enseignement d'envergure. Sans oublier un sincère remerciement à M. Seck, M. Sagna, Mme Lima et à tous ceux qui ont contribué à ce projet de près ou de loin en vue de nous voir parvenir à un résultat concluant. Je dédie ce rapport à ma maman, un ange reparti trop tôt au ciel. Merci, d'avoir inculqué en moi cette détermination à tout entreprendre.

## Table des matières

Introduction générale .....	2
Chapitre I : Généralités sur la fusion nucléaire .....	4
I. Etat de l'art .....	4
I . 1. Problématique .....	4
I . 2. Historique.....	4
I . 3. Situation actuelle .....	5
I . 4. Quel avenir pour la fusion nucléaire ?.....	6
II. Principe de la fusion nucléaire .....	6
II . 1. L'atome et histoire du modèle atomique .....	6
II . 1 . 1. La structure atomique .....	6
II . 1 . 1 . 1 Le noyau central.....	7
II . 1 . 1 . 2 Les éléments chimiques et les isotopes .....	7
II . 1 . 1 . 3 Le défaut de masse .....	8
II . 1 . 1 . 4 L'instabilité du noyau atomique.....	9
II . 2. La fusion nucléaire.....	10
II . 2 . 1. Les conditions de réaction .....	10
II . 2 . 1 . 1 Bilan énergétique.....	10
II . 2 . 1 . 2 Break-even .....	10
II . 2 . 1 . 3 Ignition.....	11
II . 2 . 1 . 4 En résumé .....	11
II . 2 . 2. La fusion thermonucléaire.....	11
II . 2 . 3. Les composants de la fusion nucléaire.....	12
II . 2 . 3 . 1 Les réactions .....	13
II . 2 . 3 . 2 L'énergie libérée .....	14
IV . 2 . 4. Différence entre la fusion et la fission nucléaire.....	14

IV . 2 . 5. Fusion ou fission ?.....	15
Chapitre II : Production d'énergie à partir de la fusion nucléaire .....	17
I. La fusion par confinement électrostatique .....	17
I . 1. Principe .....	17
I . 2. Méthode .....	17
II. La fusion par confinement magnétique .....	18
II . 1. Principe du confinement magnétique.....	18
II . 1 . 1. Le champ magnétique .....	18
II . 1 . 2. La particule dans un champ magnétique.....	18
II . 1 . 2 . 1 L'adaptation de la géométrie .....	19
II . 1 . 2 . 2 Les bobines .....	19
II . 1 . 2 . 2 . 1. Bobine poloïdal.....	20
II . 1 . 2 . 2 . 2. Bobine toroïdale.....	20
II . 1 . 2 . 3 Bobines ohmiques .....	21
II . 2. Le tokamak .....	21
II . 2 . 1. Généralités et principes .....	22
II . 2 . 1 . 1 Le tore .....	22
II . 2 . 2. Les éléments du tokamak .....	22
III . 2 . 1. Structures et matériaux .....	24
III . 2 . 1 . 1 La chambre à vide et ses équipements internes.....	24
III . 2 . 1 . 1 . 1. La couverture interne.....	24
III . 2 . 1 . 1 . 2. Couverture tritigène.....	25
III . 2 . 1 . 2 Le diverteur.....	26
III . 2 . 1 . 3 Bobines .....	26
III . 2 . 1 . 4 Autres composants du tokamak .....	27
III . 2 . 2. Chauffage du plasma .....	27
- Effet de joule.....	27

- Chauffage par courant .....	28
- Injection d'atomes neutres de deutérium fortement accélérés .....	28
- Emission d'ondes magnétiques .....	29
IV. La fusion par confinement inertiel .....	29
IV . 1. Principe .....	29
IV . 2. Les lasers de grandes puissances .....	29
IV . 3. Les schémas d'attaques .....	30
IV . 3 . 1. Attaque indirecte .....	30
IV . 3 . 2. Allumage rapide .....	31
Chapitre III: Technologies, méthodes de contrôle et applications .....	32
I. Technologie .....	32
I.1. Les réacteurs .....	32
I . 1 . 1. Confinement magnétique .....	32
I . 1 . 1 . 1 JET .....	32
I . 1 . 1 . 2 ITER .....	33
I . 1 . 2. Confinement inertiel .....	33
I . 1 . 2 . 1 LMJ .....	33
I . 1 . 2 . 2 NIF .....	34
I . 1 . 2 . 3 HiPER .....	34
II. Méthodes de contrôle et maintenance .....	35
III. Applications .....	35
III . 1 . 1. La mobilité .....	35
III . 1 . 2. L'industrie .....	36
III . 1 . 3. Les infrastructures et réseaux énergétiques .....	36
Chapitre V : Les enjeux et limites .....	37
I. Aspect sécuritaire .....	37
I . 1. La fusion nucléaire par confinement magnétique .....	38

I . 2. La fusion inertielle.....	40
II. Les défis scientifiques .....	41
III. Impact environnemental .....	42
IV. Le coût.....	43
V. Pourquoi la fusion nucléaire ? .....	45
VI. Cette nouvelle technologie sera-t-elle domesticable d'ici 2050 ? .....	47
VII. Les enjeux de la production d'énergie par la fusion nucléaire au Sénégal ? .....	48
Conclusion .....	50
Références .....	52

## **Table des tableaux**

**Tableau 1- Les différents espèces qui réagissent**

13

## INDEX

• <b>AIEA</b>	
Agence internationale de l'énergie atomique.....	48
• <b>EnR</b>	
Energies non renouvelables .....	4
• <b>FAS</b>	
Federation of American Scientists.....	46
• <b>Fermions</b>	
En physique des particules, un fermion est une particule de spin demi-entier. Elle obéit à la statistique de Fermi-Dirac. ....	7
• <b>GES</b>	
Gaz à effet de serre .....	35
• <b>Hélium 4</b>	
est constitué de particules $\alpha$ provenant des réactions de fusion ayant capté des électrons du plasma .....	26
• <b>HiPER</b>	
High Power laser Energy Research facility .....	34
• <b>IEC</b>	
Inertial electrostatic confinement .....	17
• <b>ITER</b>	
International Thermonuclear Experimental Reactor .....	5
• <b>JET</b>	
Joint European Torus.....	32
• <b>Lasers CO<sub>2</sub></b>	
L'émission s'effectue à 10,6 $\mu\text{m}$ et 9.6 $\mu\text{m}$ .....	30
• <b>Les lasers à iode</b>	
Il met en oeuvre des composés gazeux de l'iode (CF <sub>3</sub> , C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> I, C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> I).....	30
• <b>Les lasers chimiques</b>	
On part d'un mélange de gaz et les réactions électrochimiques forment la molécule HF à l'état excité.....	30
• <b>LLNL</b>	
National Ignition Facility du laboratoire Lawrence Livermore .....	5
• <b>MJ</b>	
mégajoules .....	32
• <b>MW</b>	
mégawatts.....	33
• <b>NAS</b>	
National Academy of Sciences .....	46
• <b>NIF</b>	
National Ignition Facility .....	33
• <b>tokamak</b>	
est un mot russe signifiant (Toroidalnaja Kamera Magnetnaja Katuska chambre toroïdale à confinement magnétique). ....	22
• <b>TOTAMAK</b>	
toroidalnaïa kamera s magnitnymi katouchkami.....	5
• <b>TW</b>	
Terawatts.....	34
• <b>W/cm<sup>2</sup></b>	



Le watt par mètre carré (symbole  $\text{W.m}^2$  ou  $\text{W/m}^2$  ) est l'unité du système international (SI) de densité surfacique de puissance .....29

- $\mu\text{m}$

Micromètre.....29

## Table des équations

(1) Nombre de protons .....	7
(2) Défaut de masse .....	8
(3) Bilan énergétique .....	10
(4) Break-even.....	10
(5) Pertes .....	11
(6) Puissance chauffage .....	11
(7) Limite Ignition.....	11
(8) Ignition .....	11
(9) Equation bilan 1 .....	13
(10) Equation bilan 2 .....	13
(11) Equation bilan 3 .....	13
(12) Equation bilan 4 .....	13
(13) Equation bilan 5 .....	13
(14) Equation bilan 6 .....	13
(15) Equation bilan 7 .....	13
(16) Energie libérée .....	14
(17) Inéquation de la pente de fusion et de la pente de fission .....	16
(18) Inéquation du gain de protons pour la fusion nucléaire .....	16
(19) Force de lorentz .....	18
(20) Champ magnétique au sein d'un tore .....	19
(21) Effet Bootstrap.....	21
(22) Equation bilan 8 .....	25
(23) Equation bilan 9 .....	25
(24) Equation bilan 10 .....	25

## Table des figures

<b>Figure 1- Constituants d'un atome, exemple de l'aluminium [4]</b>	7
<b>Figure 2- Tableau périodique des éléments [4]</b>	8
<b>Figure 3- Les isotopes de l'hydrogène [4]</b>	8
<b>Figure 4- Vallée de la stabilité [5]</b>	10
<b>Figure 5- Les réactions à l'origine du rayonnement solaire et la photo du soleil [8]</b>	12
<b>Figure 6 - Courbe d'Aston [9]</b>	14
<b>Figure 7- Fission nucléaire [10]</b>	15
<b>Figure 8- Courbe d'énergie de la Fusion et de la fission [11]</b>	15
<b>Figure 9- Farnsworth-Hirsch fusor [13]</b>	17
<b>Figure 10-Trajectoire d'une particule dans un champ magnétique [9]</b>	18
<b>Figure 11- Bobines d'un tokamak [16]</b>	20
<b>Figure 12- Bobine poloïdal [17]</b>	20
<b>Figure 13- Bobine toroïdal [18]</b>	21
<b>Figure 14-Bobinage ohmique [18]</b>	21
<b>Figure 15- Principe de confinement magnétique d'un plasma dans un tokamak [19]</b>	22
<b>Figure 16- Le tore [20]</b>	22
<b>Figure 17 - Schéma d'un tokamak [21]</b>	23
<b>Figure 18- Tokamak [22]</b>	24
<b>Figure 19-Chambre à vide et équipements internes de l'installation ITER [14]</b>	24
<b>Figure 20-Différents types de couvertures tritigènes [19]</b>	25
<b>Figure 21-Bipasse dans le circuit du combustible afin d'éviter les rejets toxiques dans l'environnement [19]</b>	26
<b>Figure 22- Les deux types d'allumage [25]</b>	31

## **Introduction générale**

Les prévisions parlent d'une augmentation de la population d'un milliard d'ici 2050, environ 9.7 milliards d'après l'ONU [1]. Cette croissance exponentielle de la population, l'optimisation des technologies ainsi que l'amélioration du niveau de vie, s'accompagneront d'une hausse en demande d'énergie. Théoriquement, le mix énergétique qui se présente comme une combinaison d'énergies fossiles et d'énergies renouvelables, pourraient ainsi répondre aux besoins. Néanmoins, cette dernière présente un défi majeur : celui d'approvisionner le marché en énergie, tout en prenant en compte la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la conservation des ressources naturelles et la lutte contre le changement climatique. Un tel problème suscite ainsi une motivation, à étudier et à explorer des alternatives pour l'obtention d'une source d'énergie non polluante, inépuisable et à fort rendement : la fusion nucléaire. De ce fait l'objectif général est d'étudier la fusion nucléaire pour une production d'énergie propre. Afin de mieux l'explicitier, l'objectif général est scindé en quatre objectifs spécifiques.

D'abord une vue d'ensemble sera donnée, tout en expliquant les principes et les paramètres mis en jeu lors de la fusion nucléaire, et ses moyens de production d'énergie seront identifiées. Ensuite, ses technologies et méthodes de contrôle de la production d'énergie seront examinés. Par la suite, les différents moyens d'application de l'énergie issue de la fusion nucléaire seront étudiés. Enfin, les enjeux et les limites de la fusion nucléaire comme moyen de production d'énergie seront analysés. Pour bien mener cette étude, la méthodologie consistera à faire une synthèse bibliographique.

Par conséquent, à la fin de l'étude, les résultats de cette étude sont les suivants :

- Une synthèse sur la fusion nucléaire a été établi ;
- Des moyens de production d'énergie de la fusion nucléaire ont été identifiés ;
- Des technologies et méthodes de contrôle de la production ont été examinés ;
- Des moyens d'application de l'énergie issue de la fusion nucléaire ont été examinés ;
- Un dispositif sécuritaire a été élaboré ;
- L'impact environnemental de la fusion nucléaire comme moyen de production d'énergie a été étudié ;

- Les enjeux et les limites de la fusion nucléaire comme moyen de production d'énergie ont été analysés ;

En définitive, dans l'optique de bien mener ce projet d'étude, ce présent manuscrit est subdivisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre présente les concepts généraux de la fusion nucléaire. D'abord, par une synthèse bibliographique, son historique sera survolé. Ensuite, en sous parties, le principe de la fusion nucléaire sera détaillé.

Le deuxième chapitre est dédié à la production d'énergie à partir de la fusion nucléaire. Dans ce chapitre, seront relatés, les différents types de fusion ; différenciés par les types de confinements, les réacteurs et les méthodes d'extraction d'énergie.

Le troisième chapitre tourne autour des technologies et méthodes de contrôle.

Le quatrième chapitre est consacré aux applications de l'énergie extraite lors de la fusion nucléaire.

Le cinquième chapitre traite des enjeux et des limites de la fusion nucléaire.

## **Chapitre I : Généralités sur la fusion nucléaire**

### **I. Etat de l'art**

#### **I. 1. Problématique**

D'après l'Agence internationale de l'énergie, la production énergétique mondiale (énergie primaire) s'élevait à 606 *EJ* (exajoules) en 2019 contre 254 *EJ* en 1973, soit +139 % en 46 ans. Les énergies fossiles représentaient 80,9 % de cette production (charbon : 26,8 %, pétrole : 30,9 %, gaz naturel : 23,2 %) ; le reste de la production d'énergie provenait du nucléaire (5,0 %) et des énergies renouvelables (14,1 %, dont 9,4 % de la biomasse et des déchets, 2,5 % de l'énergie hydraulique et 2,2 % d'autres *EnR*) [2].

Ces chiffres renseignent sur l'augmentation de la consommation d'énergie de la planète. Il est sans ignorer, que la production massive a un impact négatif sur l'environnement. Effectivement, environ 81% de la production d'énergie est fossile, causant l'émission de gaz à effet de serre. Selon l'Agence internationale de l'énergie, l'émission de gaz à effet de serre en 1973 s'élevait de 15461 *Mt* de  $CO_2$  contre 33622 *Mt* de  $CO_2$  en 2019.

Cette croissance exponentielle de la production et de la consommation d'énergie, engendrant la dégradation de l'environnement terrestre pousse à se questionner sur l'avenir de la production d'énergie. Le choix d'une énergie propre, à fort rendement, inépuisable est plus que nécessaire. A cet effet, la grande question de ce débat écologique est : quelle énergie faut-il pour décarboniser, notre société ? La fusion nucléaire est -elle la solution de notre problème ?

#### **I. 2. Historique**

Dans les années 1920, sont nés les premiers vestiges des recherches sur la fusion nucléaire. Les britanniques Francis William Aston et Arthur Eddington découvrent le phénomène de la fusion nucléaire qui a eu lieu au sein du Soleil. En effet, Aston mesura le « défaut de masse » (cf page 8) de l'hélium. Ainsi, à la suite de cette découverte, Eddington suggéra que l'énergie des étoiles est d'origine subatomique, et qu'il serait possible d'extraire cette énergie pour l'utiliser à ses propres fins. Par conséquent, des recherches seront initiées dès 1938 par les américains afin de confiner un plasma chaud avec des champs magnétiques. En 1946, un brevet sera déposé par les deux scientifiques britanniques suite à la construction d'un réacteur.

Ceci est dû à un engouement, de la part de la communauté mondiale à l'égard de l'énergie nucléaire après la fin de la seconde guerre mondiale.

Dans les années 50, coïncidant avec la guerre froide, les grandes nations se sont mises à la conquête de la fusion nucléaire. Des recherches importantes ont alors débuté. Cependant, elles sont restées secrètes. De ce fait, en 1952, les Etats-Unis font exploser la première bombe H, réalisant ainsi la 1<sup>re</sup> réaction de fusion thermonucléaire humaine : Le rendement énergétique de la fusion nucléaire est supérieur à celle de la fission.

Du coté des russes, leurs scientifiques, ont pu obtenir des résultats fiables sur la maîtrise de la fusion nucléaire. Ainsi, en 1968, le premier TOTAMAK un réacteur à fusion produit un plasma d'une dizaine de millions de degrés, réalisé grâce la fusion de deux atomes d'hydrogène. La technique du confinement voit alors le jour.

Après cette découverte, en 30 ans, le monde scientifique est spectateur d'avancées fulgurantes sur la fusion nucléaire et les TOTAMAK. A la fin des années 1990, on a pu réaliser, dans les tokamaks JET et JT60-U, des plasmas de deutérium dont le bilan énergétique est proche de l'équilibre, c'est-à-dire où la puissance fusion qui serait dégagée en utilisant un mélange équiréparti de deutérium et de tritium est de l'ordre de la puissance injectée dans le plasma pour le chauffer. Parallèlement à cette progression de la performance, la durée des décharges dans les grands tokamaks a été étendue jusqu'à deux minutes (TORE SUPRA), ouvrant ainsi la voie vers le fonctionnement continu d'un futur réacteur. Un autre résultat majeur est la production concrète de 17 MW de puissance fusion, à partir de plasmas d'un mélange deutérium-tritium, obtenue dans le JET, en 1997.

### **I . 3. Situation actuelle**

En 2007, voit le jour le projet ITER, un projet international réalise par plus de 35 pays. Son but est de prouver la faisabilité technique de la production d'énergie à partir d'un réacteur de fusion nucléaire à confinement magnétique. Pour l'instant, c'est le projet scientifique mondial. En parallèle, en 2020, la Chine lança le HL-2M, le plus performant de ses réacteurs ce qui lui permet de l'inscrire dans le projet ITER.

En Décembre 2022, le LLNL a pour la première fois réalisée un « *break-even* » (cf. page 10) avec l'installation de fusion nucléaire à confinement inertiel.

#### **I . 4. Quel avenir pour la fusion nucléaire ?**

D'après l'agenda d'ITER, les premiers essais se feront d'ici 2025 [3]. Cependant, plusieurs startups, universités sont aussi à la charge et ont plus d'indépendance par rapport à ITER. De ce fait, si les recherches avancent normalement, la production d'énergie à partir de la fusion nucléaire sera domesticable d'ici 2050.

### **II. Principe de la fusion nucléaire**

La fusion nucléaire est un procédé visant la production d'énergie. Son principe consiste à assembler deux noyaux légers pour former un noyau lourd.

#### **II . 1. L'atome et histoire du modèle atomique**

Un atome est la plus petite entité d'un corps simple pouvant se combiner chimiquement avec un autre.

L'atome peut être défini selon plusieurs modèles :

- D'après Démocrite : l'atome est une ultime parcelle de matière, il est compact et indivisible ;
- D'après Thomson en 1902, contrairement au premier modèle, l'atome n'est plus indivisible, il est composé d'électrons chargés négativement, disposés à l'intérieur d'une sphère compacte chargée d'électricité positive. Par conséquent, l'ensemble est électriquement neutre ;
- D'après Rutherford en 1911, Les électrons, chargés négativement, tournent autour d'un noyau compact portant une charge positive. L'ensemble est électriquement neutre, et comporte beaucoup de vide : c'est le modèle lacunaire de l'atome ;
- D'après Bohr en 1913, l'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons sur des couches plus ou moins éloignées (K, L, M, N, etc.) ;
- Enfin, depuis 1927, l'atome est constitué par un noyau chargé positivement autour duquel gravitent des électrons mais dont on ne connaît pas la position mais plutôt la probabilité de présence.

##### **II . 1 . 1. La structure atomique**

L'atome contient un noyau très petit où toute la masse et la charge positive (les neutrons et les protons) sont concentrées entourées par un grand nuage électronique. En effet, l'atome est composé de trois « briques » : les protons, les neutrons et les électrons.



### II . 1 . 1 .1 Le noyau central

Le noyau central est constitué de nucléons qui sont un assemblage de protons et de neutrons. Le mot nucléons vient du mot grec « nucleus » qui signifie noyau.

Protons et neutrons sont constitués de particules encore plus élémentaires : les quarks.

Les électrons, appartenant à la famille des fermions, sont chargés négativement. De ce fait, par loi d'attraction, ils sont à proximité du noyau, qui, lui est chargé positivement. Individuellement, ils ne sont pas vraiment des corpuscules, mais forment un nuage électronique où leurs énergies plus ou moins grandes leur confèrent une agitation plus ou moins intense. Ils sont comme étalés dans l'espace, mais on peut calculer la probabilité de les détecter en tel ou tel endroit [4].

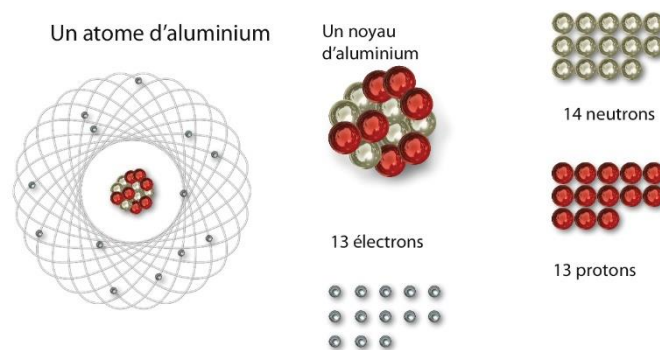


Figure 1- Constituants d'un atome, exemple de l'aluminium [4]

### II . 1 . 1 .2 Les éléments chimiques et les isotopes

Pour un atome donné, le nombre  $Z$  de protons, qui est aussi celui des électrons, est son numéro atomique. Le nombre de ses neutrons est noté  $N$ . La somme :

$$N + Z = A \quad (1)$$

comptabilise donc les nucléons et est appelée nombre de masse. Ces nombres définissent les éléments chimiques. Chacun est désigné par un symbole et son numéro atomique ; par exemple,  $^1H$  pour l'hydrogène qui n'a qu'un proton,  $^{26}Fe$  pour le fer qui en a 26. Imaginé en 1869 par Dimitri Mendeleïev afin de classer les atomes en fonction de leur masse et de leurs propriétés chimiques, son tableau a progressivement pris sa forme actuelle. On trouve sur Terre 94 éléments chimiques.

**Tableau périodique des éléments**

groupe 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

1 H hydrogène 1,00794

2 He hélium 4,00260

3 Li lithium 6,941

4 Be béryllium 9,01218

5 B bore 10,811

6 C carbone 12,0107

7 N azote 14,0064

8 O oxygène 15,9994

9 F fluor 18,9984

10 Ne néon 20,1797

11 Na sodium 22,98976

12 Mg magnésium 24,304

13 Al aluminium 26,981538

14 Si silicium 28,0855

15 P phosphore 30,97376

16 S soufre 32,06

17 Cl chlore 35,45

18 Ar argon 39,948

19 K potassium 39,0983

20 Ca calcium 40,078

21 Sc scandium 44,95591

22 Ti titane 47,88

23 V vanadium 50,9415

24 Cr chrome 51,9961

25 Mn manganèse 54,93804

26 Fe fer 55,845

27 Co cobalt 58,93319

28 Ni nickel 58,6934

29 Cu cuivre 63,546

30 Zn zinc 65,38

31 Ga gallium 69,723

32 Ge germanium 72,630

33 As arsenic 74,9216

34 Se sélénium 78,96

35 Br brome 79,904

36 Kr krypton 83,798

37 Rb rubidium 85,4678

38 Sr strontium 87,62

39 Y yttrium 88,90584

40 Zr zirconium 91,224

41 Nb niobium 92,90638

42 Mo molybdène 95,94

43 Tc technétium 98

44 Ru ruthénium 101,07

45 Rh rhodium 102,9055

46 Pd palladium 106,42

47 Ag argent 107,8682

48 Cd cadmium 112,411

49 In indium 114,818

50 Sn étain 118,710

51 Sb antimoine 121,757

52 Te tellure 127,60

53 I iode 126,905

54 Xe xénon 131,29

55 Cs césium 132,90545

56 Ba baryum 137,327

57 La lanthane 138,9047

58 Ce cerium 140,12

59 Pr praseodyme 140,90765

60 Nd néodyme 144,242

61 Pm prométhée 144,9127

62 Sm samarium 150,36

63 Eu europium 151,964

64 Gd gadolinium 157,25

65 Tb terbium 158,92535

66 Dy dysprosium 162,500

67 Ho holmium 164,93032

68 Er erbium 167,259

69 Tm thulium 168,934

70 Yb ytterbium 173,045

71 Lu lutécium 174,967

72 Hf hafnium 178,49

73 Ta tantale 180,94788

74 W tungstène 183,84

75 Re rhenium 186,207

76 Os osmium 190,23

77 Ir iridium 192,222

78 Pt platine 195,083

79 Au or 196,966569

80 Hg mercure 200,59

81 Tl thallium 204,3833

82 Pb plomb 207,2

83 Bi bismuth 208,9804

84 Po polonium 209

85 At astatine 210

86 Rn radon 222

87 Fr francium 223

88 Ra radium 226

89 Ac actinium 227

90 Th thorium 232,0377

91 Pa protactinium 231,03688

92 U uranium 238,02891

93 Np neptunium 237

94 Pu plutonium 244

95 Am américium 243

96 Cm curium 247

97 Bk berkelium 247

98 Cf californium 251

99 Es einsteinium 252

100 Fm fermium 257

101 Md mendelevium 258

102 No nobélium 259

103 Lr lawrencium 262

104 Rf rutherfordium 261

105 Db dubnium 262

106 Sg seaborgium 266

107 Bh bohrium 264

108 Hs hassium 277

109 Mt meitnerium 268

110 Ds darmstadtium 271

111 Rg roentgenium 272

112 Cn copernicium 285

113 Nh nihonium 284

114 Fl flerovium 289

115 Mc moscovium 288

116 Lv livermorium 293

117 Ts tenness 294

118 Og oganesson 294

119 Uu 295

120 Uu 296

121 Uu 297

122 Uu 298

123 Uu 299

124 Uu 300

125 Uu 301

126 Uu 302

127 Uu 303

128 Uu 304

129 Uu 305

130 Uu 306

131 Uu 307

132 Uu 308

133 Uu 309

134 Uu 310

135 Uu 311

136 Uu 312

137 Uu 313

138 Uu 314

139 Uu 315

140 Uu 316

141 Uu 317

142 Uu 318

143 Uu 319

144 Uu 320

145 Uu 321

146 Uu 322

147 Uu 323

148 Uu 324

149 Uu 325

150 Uu 326

151 Uu 327

152 Uu 328

153 Uu 329

154 Uu 330

155 Uu 331

156 Uu 332

157 Uu 333

158 Uu 334

159 Uu 335

160 Uu 336

161 Uu 337

162 Uu 338

163 Uu 339

164 Uu 340

165 Uu 341

166 Uu 342

167 Uu 343

168 Uu 344

169 Uu 345

170 Uu 346

171 Uu 347

172 Uu 348

173 Uu 349

174 Uu 350

175 Uu 351

176 Uu 352

177 Uu 353

178 Uu 354

179 Uu 355

180 Uu 356

181 Uu 357

182 Uu 358

183 Uu 359

184 Uu 360

185 Uu 361

186 Uu 362

187 Uu 363

188 Uu 364

189 Uu 365

190 Uu 366

191 Uu 367

192 Uu 368

193 Uu 369

194 Uu 370

195 Uu 371

196 Uu 372

197 Uu 373

198 Uu 374

199 Uu 375

200 Uu 376

201 Uu 377

202 Uu 378

203 Uu 379

204 Uu 380

205 Uu 381

206 Uu 382

207 Uu 383

208 Uu 384

209 Uu 385

210 Uu 386

211 Uu 387

212 Uu 388

213 Uu 389

214 Uu 390

215 Uu 391

216 Uu 392

217 Uu 393

218 Uu 394

219 Uu 395

220 Uu 396

221 Uu 397

222 Uu 398

223 Uu 399

224 Uu 400

225 Uu 401

226 Uu 402

227 Uu 403

228 Uu 404

229 Uu 405

230 Uu 406

231 Uu 407

232 Uu 408

233 Uu 409

234 Uu 410

235 Uu 411

236 Uu 412

237 Uu 413

238 Uu 414

239 Uu 415

240 Uu 416

241 Uu 417

242 Uu 418

243 Uu 419

244 Uu 420

245 Uu 421

246 Uu 422

247 Uu 423

248 Uu 424

249 Uu 425

250 Uu 426

251 Uu 427

252 Uu 428

253 Uu 429

254 Uu 430

255 Uu 431

256 Uu 432

257 Uu 433

258 Uu 434

259 Uu 435

260 Uu 436

261 Uu 437

262 Uu 438

263 Uu 439

264 Uu 440

265 Uu 441

266 Uu 442

267 Uu 443

268 Uu 444

269 Uu 445

270 Uu 446

271 Uu 447

272 Uu 448

273 Uu 449

274 Uu 450

275 Uu 451

276 Uu 452

277 Uu 453

278 Uu 454

279 Uu 455

280 Uu 456

281 Uu 457

282 Uu 458

283 Uu 459

284 Uu 460

285 Uu 461

286 Uu 462

287 Uu 463

288 Uu 464

289 Uu 465

290 Uu 466

291 Uu 467

292 Uu 468

293 Uu 469

294 Uu 470

295 Uu 471

296 Uu 472

297 Uu 473

298 Uu 474

299 Uu 475

300 Uu 476

301 Uu 477

302 Uu 478

303 Uu 479

304 Uu 480

305 Uu 481

306 Uu 482

307 Uu 483

308 Uu 484

309 Uu 485

310 Uu 486

311 Uu 487

312 Uu 488

313 Uu 489

314 Uu 490

315 Uu 491

316 Uu 492

317 Uu 493

318 Uu 494

319 Uu 495

320 Uu 496

321 Uu 497

322 Uu 498

323 Uu 499

324 Uu 500

325 Uu 501

326 Uu 502

327 Uu 503

328 Uu 504

329 Uu 505

330 Uu 506

331 Uu 507

332 Uu 508

333 Uu 509

334 Uu 510

335 Uu 511

336 Uu 512

337 Uu 513

338 Uu 514

339 Uu 515

340 Uu 516

341 Uu 517

342 Uu 518

343 Uu 519

344 Uu 520

345 Uu 521

346 Uu 522

347 Uu 523

348 Uu 524

349 Uu 525

350 Uu 526

351 Uu 527

352 Uu 528

353 Uu 529

354 Uu 530

355 Uu 531

356 Uu 532

357 Uu 533

358 Uu 534

359 Uu 535

360 Uu 536

361 Uu 537

362 Uu 538

363 Uu 539

364 Uu 540

365 Uu 541

366 Uu 542

367 Uu 543

368 Uu 544

369 Uu 545

370 Uu 546

371 Uu 547

372 Uu 548

373 Uu 549

374 Uu 550

375 Uu 551

376 Uu 552

377 Uu 553

378 Uu 554

379 Uu 555

380 Uu 556

381 Uu 557

382 Uu 558

383 Uu 559

384 Uu 560

385 Uu 561

386 Uu 562

387 Uu 563

388 Uu 564

389 Uu 565

390 Uu 566

391 Uu 567

392 Uu 568

393 Uu 569

394 Uu 570

395 Uu 571

396 Uu 572

397 Uu 573

398 Uu 574

399 Uu 575

400 Uu 576

401 Uu 577

402 Uu 578

403 Uu 579

404 Uu 580

405 Uu 581

406 Uu 582

407 Uu 583

408 Uu 584

409 Uu 585

410 Uu 586

411 Uu 587

412 Uu 588

413 Uu 589

414 Uu 590

415 Uu 591

416 Uu 592

417 Uu 593

418 Uu 594

419 Uu 595

420 Uu 596

421 Uu 597

422 Uu 598

423 Uu 599

424 Uu 600

425 Uu 601

426 Uu 602

427 Uu 603

428 Uu 604

429 Uu 605

430 Uu 606

431 Uu 607

432 Uu 608

433 Uu 609

434 Uu 610

435 Uu 611

436 Uu 612

437 Uu 613

438 Uu 614

439 Uu 615

440 Uu 616

441 Uu 617

442 Uu 618

443 Uu 619

444 Uu 620

445 Uu 621

446 Uu 622

447 Uu 623

448 Uu 624

449 Uu 625

450 Uu 626

451 Uu 627

452 Uu 628

453 Uu 629

454 Uu 630

455 Uu 631

456 Uu 632

457 Uu 633

458 Uu 634

459 Uu 635

460 Uu 636

461 Uu 637

462 Uu 638

463 Uu 639

464 Uu 640

465 Uu 641

466 Uu 642

467 Uu 643

468 Uu 644

469 Uu 645

470 Uu 646

471 Uu 647

472 Uu 648

473 Uu 649

474 Uu 650

475 Uu 651

476 Uu 652

477 Uu 653

478 Uu 654

479 Uu 655

480 Uu 656

481 Uu 657

482 Uu 658

483 Uu 659

484 Uu 660

485 Uu 661

486 Uu 662

487 Uu 663

488 Uu 664

489 Uu 665

490 Uu 666

491 Uu 667

492 Uu 668

493 Uu 669

494 Uu 670

495 Uu 671

496 Uu 672

497 Uu 673

498 Uu 674

499 Uu 675

500 Uu 676

501 Uu 677

502 Uu 678

503 Uu 679

504 Uu 680

505 Uu 681

506 Uu 682

507 Uu 683

508 Uu 684

509 Uu 685

510 Uu 686

511 Uu 687

512 Uu 688

513 Uu 689

514 Uu 690

515 Uu 691

516 Uu 692

517 Uu 693

518 Uu 694

519 Uu 695

520 Uu 696

521 Uu 697

522 Uu 698

523 Uu 699

524 Uu 700

525 Uu 701

526 Uu 702

527 Uu 703

528 Uu 704

529 Uu 705

530 Uu 706

531 Uu 707

532 Uu 708

533 Uu 709

534 Uu 710

535 Uu 711

536 Uu 712

537 Uu 713

538 Uu 714

539 Uu 715

540 Uu 716

541 Uu 717

542 Uu 718

543 Uu 719

544 Uu 720

545 Uu 721

546 Uu 722

547 Uu 723

548 Uu 724

549 Uu 725

550 Uu 726

551 Uu 727

552 Uu 728

553 Uu 729

554 Uu 730

555 Uu 731

556 Uu 732

557 Uu 733

558 Uu 734

559 Uu 735

560 Uu 736

561 Uu 737

562 Uu 738

563 Uu 739

564 Uu 740

565 Uu 741

566 Uu 742

567 Uu 743

568 Uu 744

569 Uu 745

570 Uu 746

571 Uu 747

572 Uu 748

573 Uu 749

574 Uu 750

575 Uu 751

576 Uu 752

577 Uu 753

578 Uu 754

579 Uu 755

580 Uu 756

581 Uu 757

582 Uu 758

583 Uu 759

584 Uu 760

585 Uu 761

586 Uu 762

587 Uu 763

588 Uu 764

589 Uu 765

590 Uu 766

591 Uu 767

592 Uu 768

593 Uu 769

594 Uu 770

595 Uu 771

596 Uu 772

597 Uu 773

598 Uu 774

599 Uu 775

600 Uu 776

601 Uu 777

602 Uu 778

603 Uu 779

604 Uu 780

605 Uu 781

606 Uu 782

607 Uu 783

608 Uu 784

609 Uu 785

610 Uu 786

611 Uu 787

612 Uu 788

613 Uu 789

614 Uu 790

615 Uu 791

616 Uu 792

617 Uu 793

618 Uu 794

619 Uu 795

620 Uu 796

621 Uu 797

622 Uu 798

623 Uu 799

624 Uu 800

625 Uu 801

626 Uu 802

627 Uu 803

628 Uu 804

629 Uu 805

630 Uu 806

631 Uu 807

632 Uu 808

633 Uu 809

634 Uu 810

635 Uu 811

636 Uu 812

637 Uu 813

638 Uu 814

639 Uu 815

640 Uu 816

641 Uu 817

642 Uu 818

643 Uu 819

644 Uu 820

645 Uu 821

646 Uu 822

647 Uu 823

648 Uu 824

649 Uu 825

650 Uu 826

651 Uu 827

652 Uu 828

653 Uu 829

654 Uu 830

655 Uu 831

656 Uu 832

657 Uu 833

658 Uu 834

659 Uu 835

660 Uu 836

661 Uu 837

662 Uu 838

663 Uu 839

664 Uu 840

665 Uu 841

666 Uu 842

667 Uu 843

668 Uu 844

669 Uu 845

670 Uu 846

671 Uu 847

672 Uu 848

673 Uu 849

674 Uu 850

675 Uu 851

676 Uu 852

677 Uu 853

678 Uu 854

679 Uu 855

680 Uu 856

681 Uu 857

682 Uu 858

683 Uu 859

684 Uu 860

685 Uu 861

686 Uu 862

687 Uu 863

688 Uu 864

689 Uu 865

690 Uu 866

691 Uu 867

692 Uu 868

693 Uu 869

694 Uu 870

695 Uu 871

696 Uu 872

697 Uu 873

698 Uu 874

699 Uu 875

700 Uu 876

701 Uu 877

702 Uu 878

703 Uu 879

704 Uu 880

705 Uu 881

706 Uu 882

707 Uu 883

708 Uu 884

709 Uu 885

710 Uu 886

711 Uu 887

712 Uu 888

713 Uu 889

714 Uu 890

715 Uu 891

716 Uu 892

717 Uu 893

718 Uu 894

719 Uu 895

720 Uu 896

721 Uu 897

722 Uu 898

723 Uu 899

724 Uu 900

725 Uu 901

726 Uu 902

727 Uu 903

728 Uu 904

729 Uu 905

730 Uu 906

731 Uu 907

732 Uu 908

733 Uu 909

734 Uu 910

735 Uu 911

736 Uu 912

737 Uu 913

738 Uu 914

739 Uu 915

740 Uu 916

741 Uu 917

742 Uu 918

743 Uu 919

744 Uu 920

745 Uu 921

746 Uu 922

747 Uu 923

748 Uu 924

749 Uu 925

750 Uu 926

751 Uu 927

752 Uu 928

753 Uu 929

754 Uu 930

755 Uu 931

756 Uu 932

757 Uu 933

758 Uu 934

759 Uu 935

760 Uu 936

761 Uu 937

762 Uu 938

763 Uu 939

764 Uu 940

765 Uu 941

766 Uu 942

767 Uu 943

768 Uu 944

769 Uu 945

770 Uu 946

771 Uu 947

772 Uu 948

773 Uu 949

774 Uu 950

775 Uu 951

776 Uu 952

777 Uu 953

778 Uu 954

779 Uu 955

780 Uu 956

781 Uu 957

782 Uu 958

783 Uu 959

784 Uu 960

785 Uu 961

786 Uu 962

$m_p$ : masse du proton ;

A : nombre de nucléons (A-Z représente donc le nombre de neutrons) ;

$m_n$ : masse du neutron ;

$M_X$  : masse du noyau ;

Par définition, on a :  $\Delta M > 0$  .

#### **II . 1 . 1 . 4 L'instabilité du noyau atomique**

La règle d'or pour ce qui est de la stabilité d'un noyau (règle d'ailleurs valable pour tout système physique) est d'adopter l'état le plus bas en énergie potentielle. Si un noyau trouve la possibilité d'évoluer vers un état d'énergie inférieure, donc plus stable, il le fera inévitablement. Un noyau qui se situe au-dessus de la ligne de stabilité est un noyau pour lequel Z (nombre de protons) est plus élevé que la normale. Il présente donc un excès de protons. Un isotope de ce type tend à être instable : Il aura toujours tendance à rejoindre la stabilité par le chemin le plus court possible. L'instabilité peut également provenir d'un excès de neutrons (N). Autrement dit la ligne dite de stabilité n'est pas uniforme. Sur cette ligne, la région du fer est la plus basse en énergie et constitue, sans avoir peur des mots, une sorte « d'eldorado » du nucléaire vers lequel tendent à se diriger tous les noyaux, y compris les isotopes qui sont soit trop lourds, soit trop légers. Les noyaux trop lourds (excès de protons) ont un moyen simple de rejoindre la région du fer. Leur problème étant de devenir plus légers qu'ils ne sont, il s'agit pour eux de se briser en plusieurs morceaux par le phénomène dit de fission. Ce phénomène est spontané : Tout noyau lourd qui trouve la possibilité de se transformer en un noyau plus léger en éliminant une partie de sa masse le fera inévitablement. Les noyaux légers (excès de neutrons) ont aussi intérêt à devenir plus lourds, ce qu'ils ne peuvent bien sûr faire par eux-mêmes. Du lourd peut facilement s'alléger en éliminant. Du léger ne peut devenir lourd à moins que (seule possibilité) plusieurs noyaux s'agglomèrent pour - ensemble - en former un plus massif, ce qu'on appelle la fusion. La fusion n'a rien de spontané dans des conditions physiques normales. Elle est même fortement contrariée par la barrière coulombienne (ou répulsion électrostatique) qui s'oppose au rapprochement de deux objets de charge positive. Il faut énormément d'énergie à ces deux objets pour s'approcher très près l'un de l'autre, tellement près que la force d'attraction nucléaire, de courte portée, entre en jeu et l'emporte sur la répulsion coulombienne.

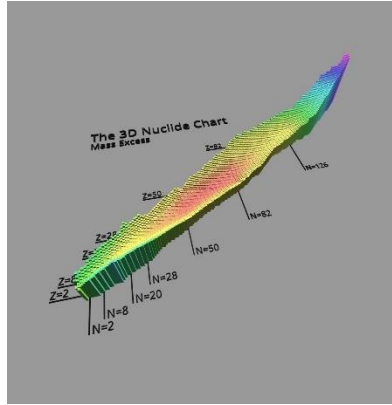


Figure 4- Vallée de la stabilité [5]

## II . 2. La fusion nucléaire

### II . 2 . 1. Les conditions de réaction

#### II . 2 . 1.1 Bilan énergétique

Considérons un plasma de Tokamak. Réalisons un bilan de puissance avec les sources d'énergie suivantes :  $P_{chauffage}$ ,  $P_\alpha$  et les pertes d'énergie  $P_{pertes}$ .

$P_{neutrons}$  n'intervient pas dans le bilan car le plasma ne perd pas cette puissance car il n'en possèdè pas avant la réaction à fusion .

Ainsi :

$$P_{chauffage} + P_\alpha = \frac{dW}{dt} = \frac{W}{T_E} \text{ (dans le cas d'un régime stationnaire)} \quad (3)$$

#### II . 2 . 1.2 Break-even

La réalisation d'une réaction de fusion nécessite des conditions à satisfaire comme le *break-even* caractérisée par le gain :

$$Q = \frac{P_r}{P_e} \quad (4).$$

- $P_r$  : Puissance apportée par les réactions de fusion
- $P_e$  : Puissance apportée à l'extérieur

Plus  $Q$  est élevé, plus le réacteur sera performant. Lorsque  $Q = 1$ , le *break-even* est atteint. C'est un premier pallier. Jusqu'à récemment, aucune expérience n'avait réussi à obtenir un gain supérieur à 1. Le record pour la fusion par confinement magnétique, était de 0,65 dans le tokamak JET en 1997, et le NIF avait obtenu un gain de 0,7 en août 2021.

### II . 2 . 1 .3 Ignition

L'ignition est le second palier à atteindre. Elle fait partie des conditions pour la réalisation de la fusion nucléaire. Il est réalisé lorsqu'il n'est plus nécessaire d'apporter de l'énergie au système. Il est alors dans un régime de fonctionnement auto-entretenu. Cela se traduit par l'équation :

$$P_{\alpha} = P_{pertes} \quad (5)$$

$$P_{chauffage} = 0 \quad (6)$$

D'où :

$$Q \rightarrow \infty \quad (7)$$

Si le NIF n'a pas encore atteint l'ignition, les chercheurs ont réussi à produire 1,35 MJ d'énergie en utilisant 1,9 MJ d'énergie laser, soit un Q de 0,7 avec :

$$Q = \left( \frac{E_{fusion}}{E_{laser}} \right) \quad (8)$$

L'ignition est définie comme un Q de 1. On est donc proche du but de ce travail effectué depuis une douzaine d'années.

### II . 2 . 1 .4 En résumé

Le « facteur d'amplification » est un paramètre-clé dans le cadre de l'exploitation de l'énergie de fusion. Il exprime le rapport de la puissance résultant des réactions de fusion sur la puissance apportée pour chauffer le plasma associé. Ce facteur est donc un bon indicateur de la rentabilité des réactions de fusion. Lorsqu'il est égal à 1, c'est le « *break-even* » : l'énergie résultant de la réaction est égale à celle dépensée pour chauffer le plasma. Lorsque la réaction de fusion est auto-entretenu (l'énergie résultant des réactions suffit à elle-seule à maintenir le plasma dans les conditions nécessaires à entretenir la réaction de fusion), le seuil de l'ignition est atteint et le facteur d'amplification est infini. Le facteur d'amplification dépend de la combinaison de 3 variables physiques : la densité, la température et la durée de confinement du plasma [6].

## II . 2 . 2. La fusion thermonucléaire

La fusion est le mariage de noyaux légers qui donne naissance à des noyaux plus lourds comme l'hélium, par exemple. Elle s'accompagne d'une très forte libération d'énergie. Cette réaction est difficile à réaliser car les forces nucléaires qui lient les nucléons n'agissent qu'à très faible distance alors que la force électrique crée une barrière répulsive qui empêche les

noyaux des atomes, qui sont chargés positivement, de s'approcher assez près les uns des autres. Pour passer cette barrière, les noyaux doivent se trouver dans un état d'agitation thermique très grand. C'est le cas lorsqu'ils sont portés à très haute température. La fusion existe naturellement dans les environnements extrêmement chauds que sont les étoiles, comme le Soleil. Il y a, au cœur du Soleil, une température de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de degrés qui permet la fusion de noyaux légers comme ceux d'hydrogène en hélium. Ces réactions de fusion thermonucléaire libèrent beaucoup d'énergie et expliquent la très haute température de cet astre qui atteint en surface les 5700 °C. Une très petite partie de l'énergie rayonnée par le Soleil atteint la Terre et permet la vie sur celle-ci.

Dans des étoiles plus massives que le Soleil, des températures encore plus hautes permettent la fusion de noyaux plus lourds que ceux de l'hydrogène. Ces réactions produisent, entre autres, des noyaux de carbone, d'oxygène et même de fer au cœur des étoiles les plus chaudes [7].

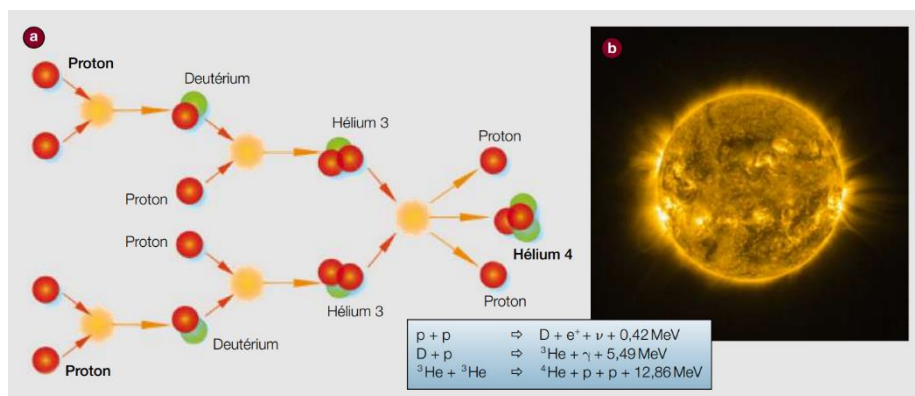


Figure 5- Les réactions à l'origine du rayonnement solaire et la photo du soleil [8]

### II . 2 . 3. Les composants de la fusion nucléaire

Diverses associations d'isotopes d'éléments légers sont susceptibles de produire une réaction de fusion. Toutefois, dans les machines de fusion, c'est la réaction deutérium-tritium qui se révèle la plus efficace sur Terre :

- Deutérium ( $^2\text{H}$ ) : est l'un des deux isotopes stables de l'hydrogène (l'autre étant le protium  $^1\text{H}$ ). Le noyau d'un atome de deutérium, appelé deutéron, contient un proton et un neutron. Le deutérium est présent à l'état naturel en quantité importante dans les océans. Pour obtenir du deutérium, il suffit de distiller de l'eau, qu'il s'agisse d'eau douce ou d'eau de mer ;
- Tritium ( $^3\text{H}$ ) : est un isotope instable de l'hydrogène. Le noyau du tritium, appelé triton, contient un proton et deux neutrons. À la différence du protium et du deutérium, cet

isotope est radioactif. Le tritium n'existe pour ainsi dire pas à l'état naturel ; mais peut toutefois être produit par l'interaction d'un neutron et d'un atome de lithium.

### II . 2 . 3 .1 Les réactions

#### - Les espèces qui réagissent :

Ce tableau ci-dessous présentent les différentes espèces qui réagissent lors des différentes réactions :

*Tableau 1- Les différents espèces qui réagissent*

Éléments	Isotope(s)	Constitution
<b>Hydrogène</b>	Hydrogène (H)	1 p (Prépondérant)
	Deutérium (D)	1 p et 1n
	Tritium (T)	1 p et 2n
<b>Helium (He)</b>	Hélium 4 ( $^4\text{He}$ )	2 p et 2n (Prépondérant)
	Hélium 3 ( $^3\text{He}$ )	2 p et 1n
<b>Lithium (Li)</b>	Lithium 7 ( $^7\text{Li}$ )	3 p et 4n (Prépondérant)
	Lithium 6 ( $^6\text{Li}$ )	3 p et 3n

#### - L'équation bilan :

Les équations bilans sont les suivantes :

$$D + T = {}^4\text{He} (3,52 \text{ MeV}) + n(14,1 \text{ MeV}) \quad (9)$$

$$D + D = T(1,01 \text{ MeV}) + p(3,02 \text{ MeV}) \quad (10)$$

$$D + D = {}^3\text{He} (0,82 \text{ MeV}) + n(2,45 \text{ MeV}) \quad (11)$$

$$D + {}^3\text{He} = {}^4\text{He} (3,07 \text{ MeV}) + p(14,07 \text{ MeV}) \quad (12)$$

$${}^7\text{Li} + n = {}^4\text{He} + T + n(-2,47 \text{ MeV}) \quad (13)$$

$${}^6\text{Li} + n = {}^4\text{He} (2,05 \text{ MeV}) + T(2,73 \text{ MeV}) \quad (14)$$

Il est à noter que :

- Les équations (3) et (4) se produisent proportionnellement ;
- Dans un réacteur, les réactions (2) et (7) conduisent à l'équation bilan :

$$D + {}^6\text{Li} = 2 {}^4\text{He} + \text{Energie} \quad (15)$$

### II . 2 . 3 .2 L'énergie libérée

La réaction (1) sera considérée. Après la pesée du Deutérium et du Tritium et de  $^4\text{H}_e$  et de  $n$ , les résultats suivants sont obtenus :

- D et T pèsent  $4,992722 * mp$  ;
- $^4\text{H}_e$  et  $n$  pèsent  $4,973974 * mp$ .

De ce fait une différence de masse  $dm = 0,018747 * mp$  .D'où une énergie libérée :

$$E = dm * c^2 \quad (16)$$

$$E = 2,818.10^{-12} J = 17,59 MeV.$$

### IV . 2 . 4. Différence entre la fusion et la fission nucléaire

Si on trace l'énergie de liaison (comptée négativement) en fonction du nombre de masse pour différents atomes, on obtient une courbe en forme de « vallée » qu'on appelle la courbe d'Aston. De la même façon qu'en faisant couler de l'eau du haut d'un barrage vers la vallée on peut récupérer de l'énergie (dans ce cas de l'énergie gravitationnelle) pour faire tourner des turbines et produire de l'électricité, on peut récupérer de l'énergie nucléaire en faisant « tomber » les noyaux dans le puits de la courbe d'Aston, là où ils sont le plus liés, et donc où leur énergie est minimale. Il y a deux possibilités selon que l'on part de la gauche ou de la droite du puits : la fusion de noyaux légers ou la fission de noyaux lourds [9].

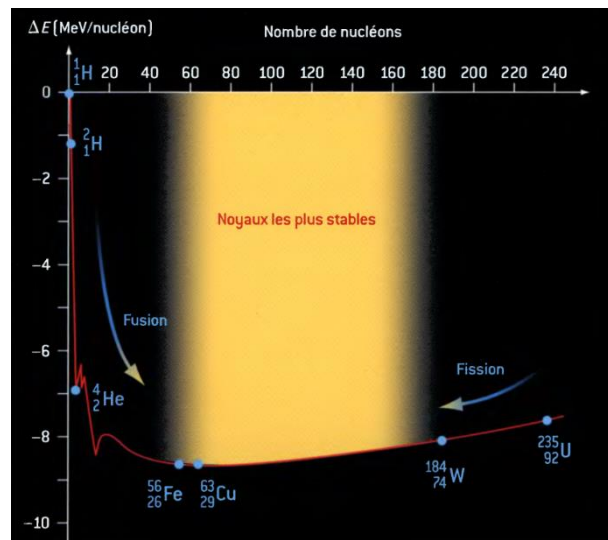


Figure 6 - Courbe d'Aston [9]

Les phénomènes de fusion nucléaire et de fission nucléaire ont pour unique point commun : l'atome. Le processus de la fission, comme son nom l'indique, traduit la division d'un atome



lourd en 2 atomes légers. Avec la fusion, c'est le phénomène inverse : deux atomes légers fusionnent pour constituer un plus gros atome.

La fission se produit lors de la projection d'un neutron sur un atome lourd et instable. Cette collision va générer l'éclatement de ce dernier en deux atomes plus légers. Lors de ce processus, une quantité importante et stable d'énergie est libérée et de nouvelles fissions d'atomes vont être provoquées en continu, c'est la réaction en chaîne. Dans cette opération, le combustible utilisé est l'uranium 235. Sa composition et ses propriétés physiques correspondent parfaitement au processus de fission. Le noyau atomique de l'uranium 235 est capable de se casser en deux sous l'impact [10].

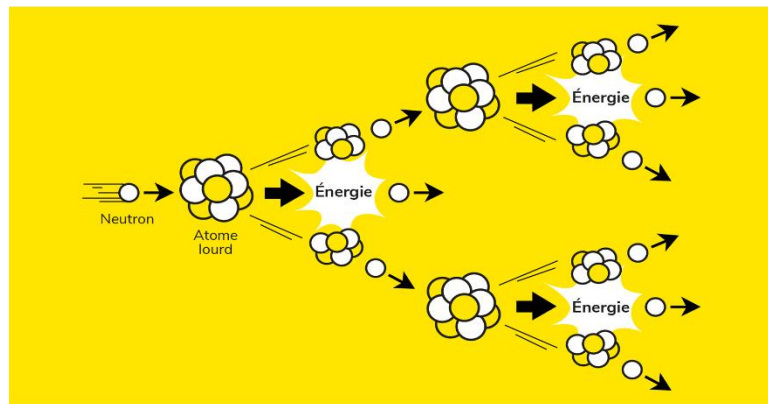


Figure 7- Fission nucléaire [10]

#### IV . 2 . 5. Fusion ou fission ?

Soit  $B$  le nombre protons. L'énergie de liaison d'un nucléon dans un noyau passe par un maximum pour les noyaux voisins du fer. Les atomes légers gagnent en stabilité en fusionnant car ils possèdent (après réaction) d'un nombre de masse plus important. Les atomes lourds, au contraire, augmentent leur stabilité en fissionnant, en diminuant leur nombre de masse.

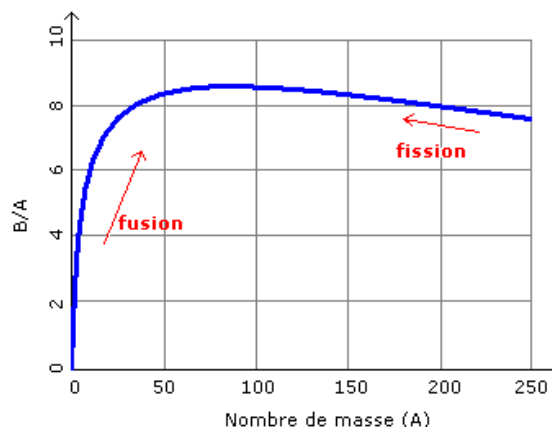


Figure 8- Courbe d'énergie de la Fusion et de la fission [11]

$$\text{Pente}_{\text{fusion}} > \text{Pente}_{\text{fission}} \quad (17)$$

Donc la fusion produit plus d'énergie que la fission.  
En effet, pour la fission un élément gagne peu en perdant un neutron  $B_{A-1}$  peu supérieur à  $B_A$ .  
Alors que pour la fusion :

$$B_A \ll B_{A+1} \quad (18).$$

Donc la fusion est plus stabilisatrice que la fission. La fusion des noyaux légers et la fission des noyaux lourds leur permet de se rapprocher de la zone de stabilité maximale. C'est pourquoi ces réactions sont exoénergétiques (libèrent de l'énergie).

## Chapitre II : Production d'énergie à partir de la fusion nucléaire

### I. La fusion par confinement électrostatique

#### I . 1. Principe

La fusion par confinement statique (*IEC*) consiste à créer des puits à potentiel électrostatique profond afin d'accélérer les ions à des énergies suffisantes pour provoquer une réaction de fusion et maintenir les ions confinés. Il a été de créer et d'entretenir ces puits potentiels par un léger excès d'électrons dans une certaine région du plasma ou par grilles électrostatiques [12]. Mieux, IEC consiste à créer un puit de potentiel électrostatique afin de confiner le combustible (ions).

#### I . 2. Méthode

Tout comme les autres méthodes de confinement, il sera nécessaire d'utiliser un réacteur. Pour ce cas, le réacteur IEC le plus connu est le *Farnsworth-Hirsch fusor*.

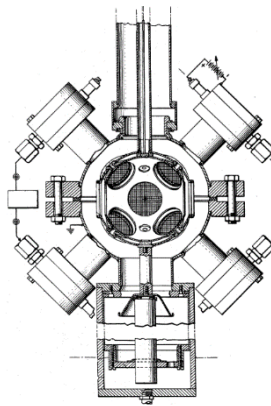


Figure 9- Farnsworth-Hirsch fusor [13]

Le réacteur crée un puit de potentiel pour le combustible (par exemple, les ions isotopiques de l'hydrogène). Dans une configuration typique, une cathode "creuse" (c'est-à-dire semi-transparente à l'ion "combustible") est entourée d'une anode maintenue au sol. Les ions sont injectés dans la chambre et tombent vers le centre, prenant l'énergie cinétique de la différence de tension ; si les ions ne subissent pas la fusion, ils sont autorisés à recirculer, en supposant aucune interaction avec la cathode, et ont ainsi de multiples chances de subir la fusion. Dans d'autres incarnations du *fusor*, les ions n'étaient pas injectés, mais fournis par un mélange dilué de carburant dans la chambre. En pratique donc, le *fusor* est essentiellement une lampe à décharge gazeuse, mais avec une géométrie plus propice à la fusion [14].

## II. La fusion par confinement magnétique

### II . 1. Principe du confinement magnétique

L'utilisation de la méthode du confinement magnétique a pour rôle de créer un environnement propice à la réalisation de la fusion nucléaire. Le plasma, composant essentiel de la fusion nucléaire est très difficile à maîtriser. De ce fait, l'utilisation des champs magnétiques complexes est nécessaire pour son confinement. Le principe sera de faire en sorte que le plasma ne touche pas les parois du réacteur, afin de garder sa haute température le plus longtemps possible. Alors, le plasma est piégé dans un véritable filet de lignes de champ magnétique entremêlées.

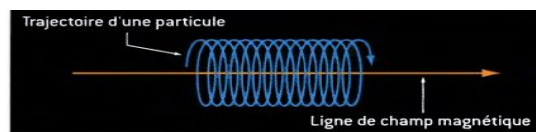


Figure 10-Trajectoire d'une particule dans un champ magnétique [9]

Dans ce cas, les réacteurs utilisés seront les tokamaks toriques et sphériques, les *stellarators* et les machines à piège à miroirs magnétiques.

#### II . 1 . 1. Le champ magnétique

Un champ magnétique est l'influence d'une charge électrique en mouvement, exerçant réciproquement, son action sur les charges en mouvement [15].

Dans un champ magnétique, chaque particule chargée du plasma (électrons, ions, noyaux) décrit une trajectoire hélicoïdale autour d'une ligne du champ magnétique (Figure 2-Trajectoire d'une particule dans un champ magnétique). Le plasma est ainsi contraint de suivre les lignes de champ, il ne peut pas s'en écarter. C'est cet effet que l'on tente d'exploiter pour confiner le plasma sans que celui-ci ne touche les parois de l'enceinte. Il existe deux possibilités de confinement : soit les lignes de champ magnétique sortent de la région où l'on veut confiner le plasma (configurations ouvertes) soit les lignes de champ y sont entièrement contenues (configurations fermées) [9].

#### II . 1 . 2. La particule dans un champ magnétique

Une particule chargée subit une force appelée force de Lorentz lorsqu'elle est plongée dans un champ  $\vec{B}$  :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (19)$$

$\vec{B}$  n'a aucune influence sur la vitesse des particules, néanmoins il influe sur leur trajectoire. Les particules chargées suivent une trajectoire hélicoïdale c'est-à-dire s'enroule autour des lignes de champ. La trajectoire des électrons est plus resserrées que les ions autour des lignes de champ. Aussi, les espèces de charge opposée se déplaceront au sens opposé.

### **II . 1 . 2 .1 L'adaptation de la géométrie**

Lors d'une configuration ouverte, les lignes de champs s'échappent de l'enceinte, où l'on veut confiner le plasma. Par conséquent, le plasma risquera de se refroidir après contact avec les parois de l'enceinte. De ce fait, les lignes de champ seront resserrées dans certaines zones appelées miroirs magnétiques. Néanmoins, cette technique est jugée médiocre et n'est plus utilisée. Lors d'une configuration fermée, les lignes de champ magnétique se referment sur elles-mêmes sans s'échapper de l'enceinte. La configuration magnétique appelée tokamak, aujourd'hui adoptée dans la majorité des laboratoires, où le plasma confine est en forme d'anneau, est celle retenue pour la machine ITER. Les lignes de champ magnétiques sont générées par des bobines extérieures ainsi que par le courant circulant dans le plasma [9]. Hormis la géométrie torique (configuration fermée), on pourrait envisager une géométrie cylindrique (configuration ouverte). Cependant, le choix de la configuration ouverte peut entraîner un échappement du plasma au niveau des extrémités. De ce fait, le choix de la géométrie torique est le plus pertinent. Néanmoins, le choix de cette dernière est moins efficace, car le champ magnétique n'est pas homogène au sein d'un tore

$$\vec{B} = \mu * N * i / (2 * \pi * r) . u\vec{\theta} \quad (20) .$$

### **II . 1 . 2 .2 Les bobines**

Tout d'abord, un champ toroïdal permet ce déplacement longitudinal, auquel on associe une composante de champ qui lui est perpendiculaire : le champ poloïdal, contrôlant la déviation naturelle des particules et créé par un fort courant induit au sein même du plasma.

Voici le schéma global des différentes bobines :

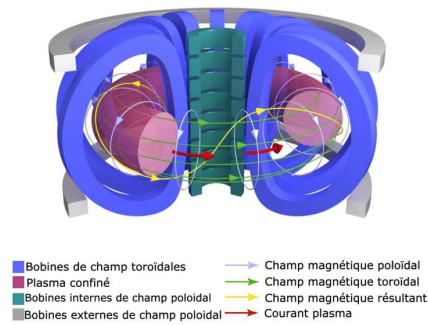


Figure 11- Bobines d'un tokamak [16]

### II.1.2.2.1. Bobine poloïdal

Le système magnétique poloïdal est constitué de six bobines horizontales, positionnées à l'extérieur de l'enceinte à vide et de la structure magnétique toroïdale. Ces bobines assurent l'équilibre du plasma, ainsi que le contrôle de sa forme et de sa position dans la chambre à vide.

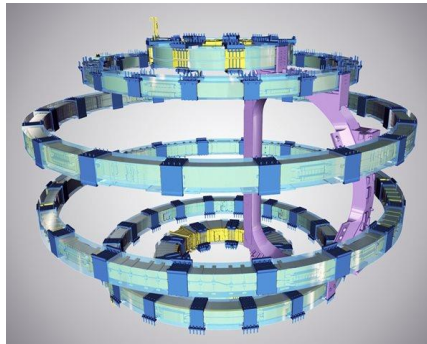


Figure 12- Bobine poloïdal [17]

### II.1.2.2.2. Bobine toroïdale

L'enceinte où se trouve le plasma est entourée de spires à intervalles réguliers. Ces spires créent des lignes de champ. Chacune appartient à un plan horizontal et décrit dans ce dernier un cercle. Le fait qu'il existe un nombre fini de spires implique que les lignes de champ ne sont pas exactement des cercles.

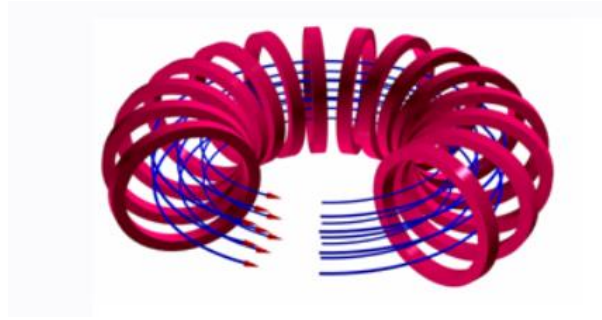


Figure 13- Bobine toroïdal [18]

### II . 1 . 2 .3 Bobines ohmiques

Les bobines ohmiques contribuent au chauffage du plasma dans le reacteur à fusion nucléaire. Le courant induit, dit « courant à plasma » chauffe le plasma mais est insuffisant à lui seul pour atteindre les conditions de température permettant la fusion du deutérium et de tritium, il est donc nécessaire d'utiliser des moyens de chauffage additionnels qui seront mentionnés plus loin.

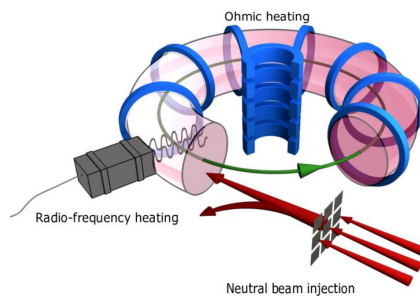


Figure 14-Bobinage ohmique [18]

La démonstration de la configuration des lignes de champ est simple : il suffit d'assimiler le plasma à un fil électrique infini. On en déduit :

$$\vec{B}(r) = \mu * I_p / (2 * \pi * r) . \vec{u}_\theta \quad (21)$$

Grâce aux gradients de pression, du courant est créé (sans induction) : c'est l'effet *Bootstrap*.

### II . 2. Le tokamak

Le tokamak est une installation de fusion nucléaire par confinement magnétique. Les réactions de fusion ont lieu à l'intérieur d'un plasma. Le plasma est un gaz chaud de faible densité produit sous l'action d'un champ magnétique intense. Il est constitué d'ions positifs et d'électrons, arrachés sous l'effet de la température. Il est de forme torique. Le confinement magnétique du plasma est principalement produit par un champ magnétique toroïdal  $B_t$  (Figure 13- Bobine toroïdal ) et par un champ poloïdal  $B_p$  (Figure 12- Bobine poloïdal) créé par le passage d'un courant électrique dans le plasma (Figure 14-Bobinage ohmique ).

Les lignes de champ magnétique hélicoïdales ainsi créées autour desquelles les ions et les électrons s'enroulent, permettent de contenir le plasma à l'intérieur d'une enceinte toroïdale étanche, dite « chambre à vide » ; dans laquelle du deutérium et du tritium ont été préalablement introduits [19].

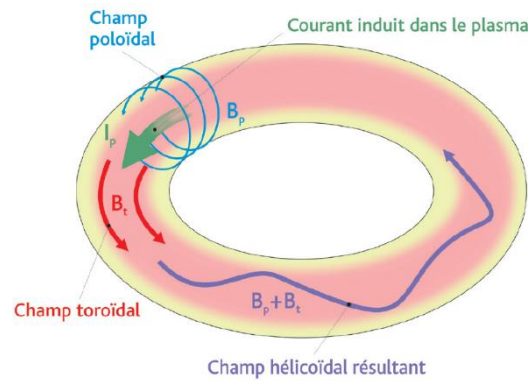


Figure 15- Principe de confinement magnétique d'un plasma dans un tokamak [19]

## II . 2 . 1. Généralités et principes

### II . 2 . 1 . 1 Le tore

Cette image ci-dessous reconstitue les différentes parties d'un tore.

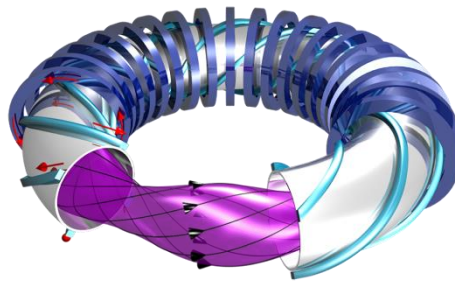


Figure 16- Le tore [20]

## II . 2 . 2. Les éléments du tokamak

Le tokamak est pour l'instant une installation scientifique destinée à améliorer la compréhension des plasmas chauds.



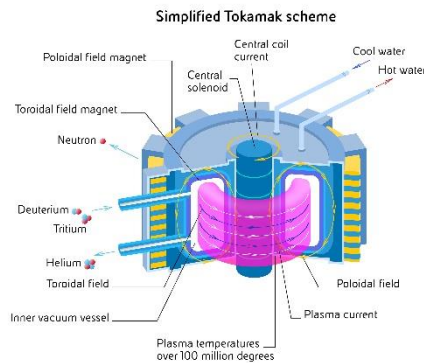


Figure 17 - Schéma d'un tokamak [21]

Les premiers réacteurs, notamment ITER, seront aussi basés sur ce concept. Le tokamak est principalement constitué de quatre éléments :

- Une chambre à vide torique dans laquelle le plasma est créé et maintenu. Les tokamaks actuels possèdent des chambres à vide dont le grand rayon mesure entre 0,5 et 3 mètres, pour un petit rayon environ 3 fois plus petit.
- Un solénoïde, soit un ensemble de bobines magnétiques régulièrement espacées et connectées en série, qui crée le champ magnétique principal (toroïdal) dont la valeur au centre de la chambre à vide vaut de 1 à 6 Tesla. Plusieurs tokamaks sont encore équipés de bobines en cuivre, mais les plus récents fonctionnent à l'aide d'aimants supraconducteurs.
- Un transformateur, soit un ensemble de bobines magnétiques conduisant un courant dans la direction toroïdale, et qui sert à créer, par induction, le courant circulant dans le plasma. Des courants de quelques centaines de milliers à quelques millions d'ampères sont induits dans les tokamaks actuels. Naturellement, un état d'équilibre est obtenu dans le plasma, la force magnétique compensant exactement la pression du plasma.
- Un troisième et dernier ensemble de bobines produit un champ magnétique poloïdal permettant de modifier la forme du plasma. En particulier, il est possible de créer des configurations dans lesquelles le champ poloïdal est annulé en un point, appelé « point X ». La surface du plasma est dans ce cas forcée à passer par ce point, ce qui permet le maintien du plasma à distance de toutes les parois de la chambre à vide et une meilleure définition des plaques matérielles sur lesquelles une bonne partie du plasma et de son énergie est collectée. Même si leur taille et leur aspect peuvent varier considérablement, les tokamaks sont tous constitués de ces quatre éléments auxquels viennent s'ajouter des systèmes de chauffage et de mesure.

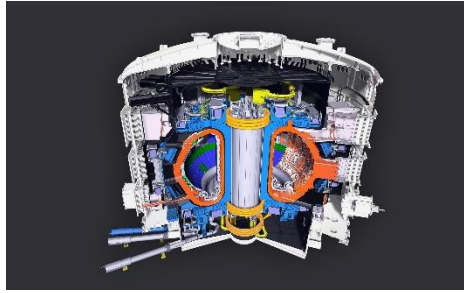


Figure 18- Tokamak [22]

### III . 2 . 1. Structures et matériaux

#### III . 2 . 1 . 1 La chambre à vide et ses équipements internes

La chambre à vide est une enceinte métallique toroïdale étanche qui renferme essentiellement deux équipements : La couverture interne et le diverteur.

La couverture interne assure la protection des parois métalliques de la chambre à vide. Elle est refroidie par un fluide caloporteur pour évacuer vers des tours de refroidissement (dans le cas de l'ITER) ou vers un turboalternateur pour les autres types de réacteurs, la puissance thermique radiative du plasma et une grande partie de la puissance thermique produite par les réactions nucléaires des matériaux qui la constituent avec les neutrons provenant des réactions de fusion dans le plasma (« réactions neutroniques »). Le diverteur interne est tritigène.

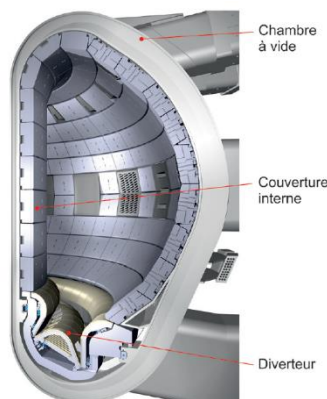


Figure 19-Chambre à vide et équipements internes de l'installation ITER [14]

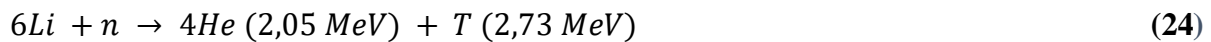
#### III . 2 . 1 . 1 . 1. La couverture interne

En fonctionnement normal, les parois subissent des flux énergétiques de l'ordre du  $\text{MW/m}^2$ . Elles doivent donc être résistantes, permettre d'évacuer la chaleur pour la transformer en énergie et enfin ne pas libérer des impuretés. Car en pénétrant dans le plasma, elles affectent la qualité. Quand il se produit une disruption, l'absorption des parois est très élevée donc lors de la décharge suivante, ces particules piégées réinvestissent le plasma et il est donc difficile de contrôler leur concentration).

Il faut aussi contrôler l'activation radioactive de la paroi. En effet, le flux de neutrons est assez élevé.

### III. 2. 1. 1. 2. Couverture tritigène

La couverture tritigène est une source de chaleur participant à la protection neutronique et générant du Tritium. Elle est dite tritigène car elle contient du lithium ( $Li$ ) qui, sous le flux de neutrons provenant du plasma produit du tritium selon les réactions suivantes :



Le lithium, qui soumis au flux de neutrons provenant du plasma, conduit à la formation de tritium ; le lithium peut se présenter sous différentes formes (lithium liquide, eutectique lithium plomb, céramique lithiée, sels fondus de lithium...)  $Li + n \rightarrow T$  (22).

Il y'a plusieurs types de couvertures tritigènes.

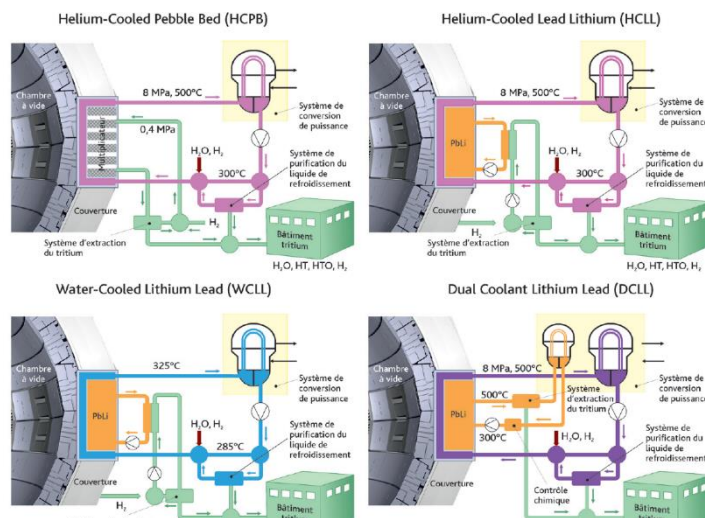


Figure 20-Différents types de couvertures tritigènes [19]

#### - Matériaux tritigènes :

Deux méthodes existent :

- Utiliser du Tritium solide ( $Li_2O$ , silicate de lithium, tritanate de lithium) : Les matériaux produisant le tritium sont placés dans la chambre magnétique. Etant

bombardés par des neutrons, du Tritium est produit. Mais la concentration de ce constituant est difficile à contrôler avec ce procédé.

- Utiliser du Tritium liquide ( $Li, Li_{17}Pb_{83}, Li_2BeF_4$ ), concept auto-refroidit  
Le fluide composé de molécules qui, au contact de neutrons, génère du Tritium circule dans la paroi. Les avantages sont les suivants : ce fluide peut servir de fluide caloporteur et le Tritium produit ne l'est pas dans la chambre : ce n'est qu'après filtrage du fluide que le Tritium est extrait puis injecté. La concentration de Tritium est donc plus facilement contrôlable.

Cependant, le fluide subit des effets magnétohydrodynamiques. Et l'utilisation du fluide tritié comme fluide caloporteur est délicat car ce fluide est radioactif ! Et si on ajoute un circuit de refroidissement ça en fait deux. Donc des difficultés technologiques.

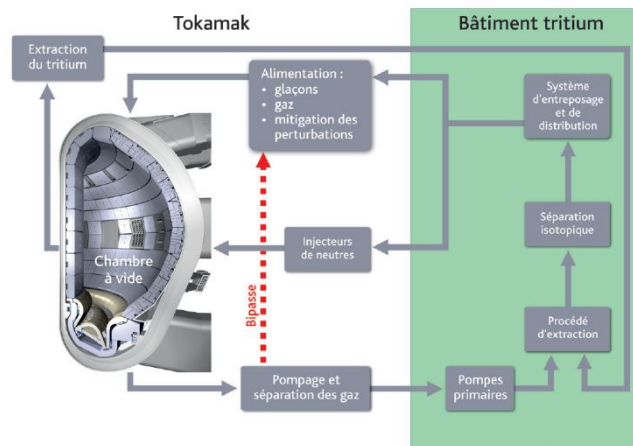


Figure 21-Bipasse dans le circuit du combustible afin d'éviter les rejets toxiques dans l'environnement [19]

### III . 2 . 1 . 2 Le diverteur

Le diverteur est implanté en partie basse de la chambre à vide. Son rôle est d'extraire de l'Hélium 4, le combustible (tritium et deutérium) qui n'a pas « fusionné » et des impuretés. Il a le même mode de refroidissement que la couverture interne. Le diverteur est également équipé d'une première paroi qui fait face au plasma.

### III . 2 . 1 . 3 Bobines

40% du prix d'ITER concerne les aimants :

- Bobines toroïdales :  $N_b T_i$  refroidies à  $1,8K$  : Courant continue ;
- Bobines poloïdales :  $N_b S_n$  (préféré au  $N_b T_i$  car ce matériau reste supraconducteur à

température plus élevée) : Courant continue ;

- Bobines ohmiques : Courant alternatif.

#### **III . 2 . 1 .4 Autres composants du tokamak**

Le Tokamak est composé d'autres composants comme :

- Les cryopompes ;
- Le système magnétique ;
- Le cryostat ;
- Les équipements de suivi du comportement et des performances du plasma ;
- Les équipements de chauffage additionnel du plasma ;
- Les tuyauteries d'alimentation en combustible (deutérium et tritium) ;
- Les systèmes de refroidissement ;
- Les systèmes de prévention et de disruption.

#### **III . 2 . 2. Chauffage du plasma**

La température recherchée lors de la fusion nucléaire est de 150 millions de degrés Celsius. Ce fait, l'utilisation des méthodes de réchauffement traditionnel ne sera pas utilisée.

Dans le tokamak, les variations des champs magnétiques utilisés pour contrôler le plasma génèrent un effet de chauffage. En effet, les phénomènes d'induction créent un courant électrique de forte intensité. Lorsque ce courant circule dans le plasma, les électrons et les ions sont excités et entrent en collision. Ces collisions créent une « résistance » qui produit à son tour de la chaleur mais, paradoxalement, quand la température du plasma augmente, cette résistance, et donc l'effet de chauffage qu'elle produit, diminuent. La chaleur transférée par ce courant de haute intensité — le « chauffage ohmique » — ne dépasse pas une certaine intensité. Pour obtenir des températures encore plus élevées et atteindre le seuil à partir duquel la fusion devient possible, il faut utiliser d'autres méthodes de chauffage depuis l'extérieur du tokamak [23].

##### **- Effet de joule**

Le plasma possède une résistance de l'ordre de quelques ohms. Par conséquent, le courant  $I_p$  (de l'ordre du million d'Ampère) génère du chauffage par effet joule ( $P = R \cdot I_p^2$ ). Cette méthode est efficace jusqu'à 10 à 20 millions de degrés environ. En effet, au-delà, la conductivité du plasma est dix fois plus élevée que celle du cuivre à température ambiante.

Donc  $P_{Joule}$  devient négligeable. Il est important de noter que le chauffage ohmique n'engendre pas d'instabilités.

- **Chauffage par courant**

Dans un tokamak, une des composantes du champ magnétique assurant le confinement est produite par un courant électrique circulant le long de l'anneau de plasma. Or, le plasma n'est pas un milieu supraconducteur : la résistance qu'il oppose à la circulation du courant génère de la chaleur qui le chauffe, de la même façon que de l'eau dans une bouilloire électrique. Ce type de chauffage, appelé chauffage ohmique (du nom de l'unité de mesure de la résistance électrique, *l'ohm*), permet d'amener la température du plasma jusqu'à une vingtaine de millions de degrés. Il est impossible de chauffer davantage par cette méthode car la résistance du plasma diminue quand sa température augmente. Plus le plasma est chaud, moins il s'oppose à la circulation du courant électrique en son sein et donc moins le chauffage ohmique est efficace. Aux alentours de vingt millions de degrés, la chaleur produite est négligeable et d'autres techniques complémentaires de chauffage doivent alors prendre le relais.

- **Injection d'atomes neutres de deutérium fortement accélérés**

Une autre méthode de chauffage, développée à partir des années 1970, consiste à injecter au cœur du plasma des faisceaux d'atomes de deutérium et de tritium neutres et très rapides. Il est nécessaire d'utiliser des atomes neutres car des ions (charges) ne pourraient pas franchir le champ magnétique confinant le plasma. La difficulté est qu'on ne sait pas accélérer des particules neutres. En effet, tous les accélérateurs de particules utilisent la force électromagnétique qui n'agit que sur les particules chargées. Il faut donc concevoir un dispositif capable de transformer les atomes neutres en ions, puis de les accélérer et enfin de les reneutraliser avant de les injecter dans le plasma. Le réinjecté de particules est donc constitué de trois parties : la source d'ions, l'accélérateur et le « neutraliser ».

Les atomes sortant de l'injecteur pénètrent en profondeur à l'intérieur du plasma. Ils y sont rapidement ionisés et ralentis par collisions avec les particules du plasma à qui ils transfèrent leur Energie, ce qui produit de la chaleur. Cette méthode, associée au chauffage ohmique, a fait ses preuves sur des machines relativement petites dont le plasma est de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>, comme le JET anglais, elle a permis d'atteindre la température de trois cents millions de degrés. Malheureusement, l'extrapolation à des plasmas dépassant la centaine de mètres cubes, comme dans la future installation ITER, est problématique. Pour obtenir des performances comparables, il faudrait multiplier par dix l'Energie des atomes injectés, ce qui

rendrait très difficile leur neutralisation dans l'injecteur. On envisage donc d'ajouter une troisième méthode de chauffage aux deux précédentes : le chauffage par des ondes.

- **Emission d'ondes magnétiques**

Le principe du chauffage par des ondes est fondé sur l'absorption par le plasma de puissantes ondes électromagnétiques que l'on envoie en son sein. Le processus de chauffage est tout à fait similaire à celui d'un four à micro-ondes, les ondes étant créées par des antennes situées au niveau des parois. Pour avoir un chauffage efficace, il faut que la fréquence des ondes coïncide avec certaines fréquences caractéristiques de la dynamique du plasma. Le réacteur ITER, qui sera construit à Cadarache, utilisera les trois dernières méthodes de chauffage décrites.

## **IV. La fusion par confinement inertiel**

### **IV . 1. Principe**

C'est avec l'invention du laser en 1960 que la fusion nucléaire par confinement inertiel peut être envisagée. Dans ce schéma, on cherche à atteindre les conditions pour l'amorçage des réactions de fusion en profitant de la propre inertie du combustible pour l'amener jusqu'à des densités et des températures extrêmement élevées pendant un temps très court.

La fusion par confinement inertiel par laser consiste à faire fusionner deux noyaux atomiques légers en un noyau atomique plus lourd (par exemple le deutérium et le tritium en hélium), en utilisant des lasers de très forte puissance. C'est la première fois que nous disposons d'un système dans lequel la fusion elle-même fournit la majeure partie de la chaleur — une étape clé pour atteindre des niveaux de performance encore plus élevés. Jusqu'à présent, les expériences de fusion produisaient des réactions de fusion en utilisant d'énormes quantités de chaleur externe pour chauffer le plasma.

### **IV . 2. Les lasers de grandes puissances**

Le laser est une source de lumière cohérente spatialement et temporellement. Elle présente intrinsèquement un certain nombre d'avantages. Dépôt de l'énergie avec précision, là où l'on veut, du moins en principe. Les faisceaux peuvent être déviés et concentrés facilement. On peut obtenir des taches focales de 20 à 100  $\mu\text{m}$ . Les éclaircissements réalisés atteignent maintenant sur cibles 10<sup>16</sup> à 10<sup>17</sup>  $\text{W}/\text{cm}^2$  (à comparer à l'éclaircissement solaire au-dessus de l'atmosphère : 0,13  $\text{W}/\text{cm}^2$ ). De plus les impulsions peuvent être très brèves (10 ps à plusieurs ns) et surtout leur forme est modelable, ce qui permet de coupler aussi efficacement



que possible cette impulsion aux phénomènes physiques dont la cible est le siège. Les lasers ont cependant des inconvénients :

- les rendements énergétiques sont très faibles, de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  l'heure actuelle, selon le type ;
- la qualité du faisceau se dégrade à haut flux de sorte que, si l'on n'y prend garde, une fraction importante du faisceau en sortie ne pourra être amenée sur la cible. Les améliorations de ce point de vue se traduisent par une complexité accrue des systèmes ;
- les possibilités d'extrapolations importantes apparaissent limitées : il faut avoir recours à la multiplication des chaînes et à de nouveaux matériaux actifs (verres-gaz). La longueur d'onde est aussi un paramètre important quant à l'interaction laser matière. Il faut également prendre en considération les coûts, la fiabilité, la durée de vie des composants et les cadences de répétition qui joueront un rôle important dans un futur réacteur [24].

Ils existent plusieurs types de lasers : les lasers  $CO_2$ , les lasers à iode,, les lasers chimiques etc. .

#### **IV . 3. Les schémas d'attaques**

##### **IV . 3 . 1. Attaque indirecte**

Lors de l'interaction avec les parois de la cavité, le laser crée un plasma d'or en expansion. Pour éviter que ce plasma n'envahisse la cavité, celle-ci est préalablement remplie d'un gaz destiné à confiner le plasma d'or contre les parois. L'Energie laser est alors absorbée au voisinage de la densité critique du plasma d'or, donc près des parois, ce qui chauffe considérablement cette région qui réagit en émettant un rayonnement X intense. C'est ce qu'on appelle la « conversion X ». Plus le numéro atomique du plasma est élevé, plus la conversion X est efficace. C'est la raison pour laquelle on utilise une cavité en or. Les rayons X ayant une fréquence supérieure à celle du laser, ils peuvent pénétrer des régions plus denses du plasma d'or et les chauffer à leur tour. Ces régions denses, qui ont des caractéristiques très proches de celles d'un corps noir, réémettent un rayonnement X pratiquement thermique. Une fois ce rayonnement établi dans la cavité, il interagit avec la cible en créant une onde de chaleur qui « ablate » le matériau de la capsule de la même façon que dans le schéma de l'attaque directe, le rayonnement X thermique jouant le rôle du rayonnement laser. Une bonne cavité est celle pour laquelle les parois réémettent presque autant de rayons X qu'elles en absorbent (le rapport s'appelle l'albedo). Pour cela il faut que le rayonnement X soit absorbé



sur une petite épaisseur et chauffe ainsi une petite quantité de matière dont la température augmente très rapidement, ce qui implique une forte réémission.

#### IV . 3 . 2. Allumage rapide

C'est un allumage par point chaud utilisant un premier laser pour provoquer en quelques nanosecondes l'implosion d'un microballon, puis un second, plus puissant, pour produire en quelques picosecondes l'allumage du plasma.

### Les deux schémas pour la fusion inertielle

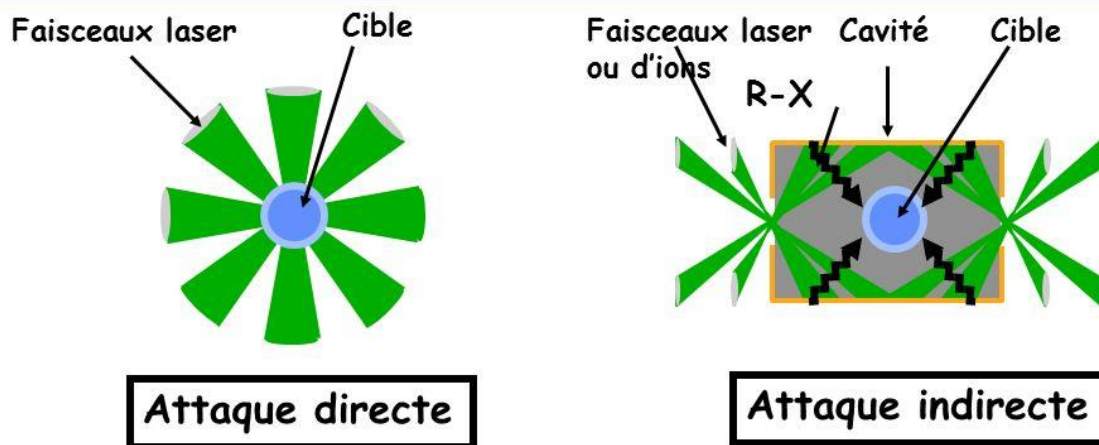


Figure 22- Les deux types d'allumage [25]

## **Chapitre III: Technologies, méthodes de contrôle et applications**

### **I. Technologie**

Le projet de la fusion nucléaire à grande échelle fait partie des plus grands défis scientifiques que le monde n'ait jamais connue. L'obtention d'énergie à partir de cette dernière permettrait la résolution de beaucoup de problèmes. Néanmoins, ce n'est pas aussi simple. En effet, la domestication de la fusion nucléaire demande des technologies de hautes pointes mais aussi des méthodes de contrôle, et une maintenance sécuritaire de haut niveau.

Parmi les technologies utilisées pour la fusion nucléaire nous avons les réacteurs. Ils existent différents types de réacteurs dans le monde. Dépendant du type de confinement, nous pouvons les classer en deux catégories.

#### **I.1. Les réacteurs**

Un réacteur à thermonucléaire permet de produire plasma de fusion équivalent pendant une durée précise afin de multiplier la puissance thermique de cette dernière. Le but du réacteur est de pouvoir récupérer en continu suffisamment de puissance issue des réactions de fusion pour assurer, d'une part, le fonctionnement du réacteur et, d'autre part, la fourniture en électricité.

##### **I.1.1. Confinement magnétique**

###### **I.1.1.1 JET**

Le réacteur à thermonucléaire JET chauffés à plus de 150 millions °C soit 10 fois plus que le soleil. C'est le lieu, le plus chaud du système solaire. Le JET a été une expérience permettant le test de nouveaux matériaux, des différentes méthodes d'injection et d'extraction du tritium, de même que les méthodes de télémanipulation.

JET a surpassé en 2021 son précédent record établi en 1997 de production d'énergie par fusion qui était de 21,7 MJ. Le réacteur a ainsi libéré 59 MJ. et pendant un temps particulièrement long pour le JET, puisque c'est celui que par construction il peut atteindre au maximum comme durée de fonctionnement à savoir cinq secondes.

Le JET est un géant parmi les plus grandes installations de recherche sur la fusion existante capable de fusionner du deutérium et du tritium. Mais ses aimants n'exploitent pas le phénomène de la supraconduction et il y a donc de fortes pertes par effet Joule, ce qui n'est

pas bon pour atteindre un bilan total de production d'énergie bien supérieur à celui nécessaire pour lancer la réaction de fusion. Presque les mêmes conditions qu'à la surface du Soleil.

Comme la paroi matérielle du JET n'est pas refroidie en permanence par un circuit d'eau à haute pression, on ne peut pas non plus se permettre de faire des expériences trop longues.

#### **I.1.1.2 ITER**

ITER ne sera pas seulement plus grand que le JET, il disposera aussi de champs magnétiques plus puissants et moins gourmands en électricité, puisque générés par des aimants supraconducteurs. Les parois matérielles du JET ne sont également pas refroidies contrairement à ce qui sera le cas avec ITER. Toutes ces conditions limitent fortement le temps de fusion possible dans le JET.

Les concepteurs d'ITER ont comme objectifs principaux d'atteindre et de maîtriser l'ignition, de tester la technologie nécessaire pour y parvenir et d'étudier le fonctionnement d'un réacteur dans le régime de chauffage par les particules alpha. ITER ne produira pas d'électricité, mais uniquement de la chaleur. Le but est de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de la fusion thermonucléaire contrôlée. Le premier objectif est de libérer une puissance de 500 *MW* pendant 400 secondes en ne consommant que 50 *MW*. Rappelons que le record actuel (2007), détenu par le JET, est de 16 *MW* libérés pendant 1 seconde pour autant de *MW* consommées. Dans le cas d'un réacteur économiquement viable, le bilan énergétique devra être 5 fois supérieur à celui d'ITER. Le deuxième objectif vise à libérer une puissance de 250 *MW* pendant 1000 secondes (plus de 16 minutes) en ne consommant toujours que 50 *MW*.

#### **I.1.2. Confinement inertiel**

##### **I.1.2.1 LMJ**

Le laser mégajoule (LMJ) qui devra réaliser l'allumage et la combustion d'un mélange  $D - T$  dans le schéma de l'attaque indirecte, est un projet de la Direction des applications militaires du Commissariat à l'Energie atomique (CEA-DAM).

Ce Laser Mégajoule (LMJ) français est le jumeau du NIF américain. Les deux pays se sont associés pour fabriquer certains éléments, comme les chambres d'expériences. Elles consistent en des sphères métalliques de 10 mètres de diamètre et de 140 tonnes, au centre desquelles convergent de très puissants faisceaux laser ultraviolet. Le LMJ, installé au CEA près de Bordeaux (Gironde), ne compte que 22 lasers mais devrait en posséder 176 à terme. Leur fonction : comprimer des atomes d'hydrogène contenus dans une bille de quelques millimètres jusqu'à une pression 250 milliards de fois supérieure à celle de l'atmosphère, afin

de provoquer la fusion de l'hydrogène. Cette pression est identique à celle que l'on trouve au cœur du Soleil. Ce programme a originellement une vocation militaire : il permet de simuler l'explosion d'une bombe H. Aujourd'hui, le LMJ est utilisé par les astrophysiciens et envisagé en tant que réacteur producteur d'énergie à la place d'ITER.

#### **I.1.2.2 NIF**

Le National Ignition Facility, ou NIF, est un laser de recherche extrêmement énergétique, construit au sein du laboratoire *National Lawrence Livermore*, à Livermore (Californie, États-Unis). Le NIF a des usages multiples. Ses deux fonctions principales sont le test des armes nucléaires des États-Unis et les expériences liées à l'énergie de fusion. Le National Ignition Facility utilise la technique du confinement inertiel pour permettre aux scientifiques d'étudier la fusion nucléaire et les autres domaines d'utilisation des plasmas extrêmement denses.

La mise en œuvre de ce concept dans le NIF utilise 192 faisceaux laser de grande puissance<sup>1</sup>, qui, après un parcours d'environ 300 mètres, sont focalisés sur une cible située au centre d'une « chambre d'expériences », sphère métallique de dix mètres de diamètre. La cible, constituée d'une capsule recouverte de béryllium renfermant un mélange de deutérium et de tritium servant de combustible de fusion, est ainsi comprimée jusqu'à des densités de  $900 \text{ kg/dm}^3$ , soit environ six fois la densité du centre du Soleil. L'ensemble développera une puissance de 500 TW (mille fois la puissance électrique produite à tout instant par les États-Unis, en 2010), mais pendant une période de quelques nanosecondes (milliardièmes de seconde) seulement, pour parvenir à l'effet désiré. Le résultat espéré est la réalisation de réactions de fusion nucléaire auto-entretenues. Le 5 décembre 2022, le NIF a atteint le seuil où l'énergie produite est supérieure à l'énergie consommée : ses 192 lasers ont concentré 2,05 MJ sur la cible, qui en fusionnant a dégagé 3,15 MJ ; mais l'expérience a nécessité à peu près 300 MJ du réseau. Il faudra encore quelques décennies pour parvenir à la fusion commerciale.

#### **I.1.2.3 HiPER**

HiPER, est un projet d'allumeur rapide. Il est constitué de 40 faisceaux délivrant une énergie totale de 200 kJ en 5 nanosecondes seront utilisés pour la première phase de compression, un certain nombre, encore à définir, de faisceaux délivrant 70 kJ en 10 picosecondes jouera le rôle de l'allumette. S'il parvient à remplir sa mission, HiPER permettra d'obtenir l'allumage avec un meilleur gain et à moindre coût que les deux grands géants LMJ et NIF.

## **II. Méthodes de contrôle et maintenance**

Les centrales nucléaires réputées sûres, fiables et économiques sont généralement exploitées de façon prudente et méthodique. Leurs activités de maintenance sont bien planifiées et menées avec rigueur, de manière à limiter autant que possible les risques pour les travailleurs, la population et l'environnement.

La maintenance inclut la surveillance, l'entretien courant, les petites et grosses réparations, les rénovations, les remplacements... Elle peut être « préventive » (avant la défaillance) ou « corrective » (pour réparer). Pour une centrale nucléaire, la maintenance doit préserver la fiabilité des systèmes et des composants, essentiels au bon fonctionnement et à la sûreté de l'installation.

Les techniques de maintenance sont souvent assez classiques même si certaines applications délicates – comme pour les examens non destructifs ou le soudage – conduisent à des développements spécifiques. De plus en plus, les robots viennent en appui des opérateurs de maintenance. Les technologies du big data leur permettent également de recueillir et d'analyser une quantité toujours plus importante de données, permettant d'augmenter la maintenance préventive. De son côté, la recherche permet d'affiner la connaissance sur le vieillissement des composants (béton, métaux, etc.) et identifier les causes profondes des anomalies.

A l'exception de la cuve et de l'enceinte dont un suivi continu est réalisé, l'ensemble des composants d'une centrale peuvent être changés.

## **III. Applications**

### **III.1.1. La mobilité**

La quasi-totalité des transports (hors rail) sont assurés par des produits pétroliers. Le transport des passagers est la cause de 60 % des émissions de  $CO_2$ , le fret de 40 %. Au total, en 2018, 24 % des émissions mondiales de  $CO_2$  dues à la combustion d'énergie relèvent du secteur des transports. Sur cette part, le transport routier passagers et fret (voitures, camions, bus, deux roues) est de loin le premier responsable : près des trois quarts des émissions de  $CO_2$ . L'aviation et la navigation sont à peu près à égalité : un peu plus de 11 % chacune. Le rail est très peu émetteur (1,2 %) [25]. De ce fait, l'utilisation de l'électricité produite à partir de la fusion nucléaire dans la mobilité serait une solution pour diminuer la forte émission des GES. Ces véhicules écoresponsables ne rejettent que de l'eau. En définitive l'application de la production d'énergie à partir de la fusion nucléaire est prometteuse dans le secteur de la

mobilité durable. Dans son application, elle pourrait intervenir dans l'alimentation des véhicules électrique comme les voitures, les camions et les trains mais aussi pourquoi pas pour les navires et les avions.

### **III . 1 . 2. L'industrie**

L'industrie est la première source d'émissions de  $CO_2$  au niveau mondial, devant les transports et les bâtiments. L'industrie lourde – ciment, chimie, acier, aluminium – représente la part du lion de ces émissions. La réduction des émissions exige une refonte profonde de notre modèle industriel vers une économie circulaire. Mais amener l'industrie lourde au net zéro nécessitera également le déploiement de procédés de production entièrement efficaces et nouveaux et de captage du carbone.

### **III . 1 . 3. Les infrastructures et réseaux énergétiques**

Parmi les applications de la fusion nucléaire, nous avons les applications stationnaires voire domestiques. L'énergie issue de la FN peut être une source de stockage d'énergie pour les bâtiments. Il pourra ainsi fournir de l'électricité aux infrastructures et en même temps être pour fournir de l'énergie pour le chauffage et la climatisation.

## **Chapitre V : Les enjeux et limites**

### **I. Aspect sécuritaire**

Comme pour toute technologie qui implique le rejet de grandes quantités d'énergie, l'industrialisation de la fusion nucléaire comporte des risques pour la sécurité. Les aspects de sécurité de la fusion nucléaire peuvent être divisés en trois grandes catégories : la sécurité physique, la cybersécurité et la prolifération nucléaire.

Les mesures de sécurité physique sont conçues pour empêcher l'accès non autorisé au réacteur à fusion ou à toute autre infrastructure essentielle, ainsi que pour protéger contre le sabotage ou les attaques terroristes. Cela comprend des mesures comme la clôture périphérique, les contrôles d'accès, les caméras de surveillance et le personnel de sécurité.

La cybersécurité est un autre aspect important de la sécurité de la technologie de fusion nucléaire. Les réacteurs à fusion sont hautement automatisés et dépendent de systèmes informatiques complexes pour contrôler le processus de fusion. Ces systèmes informatiques sont vulnérables aux cyberattaques, qui pourraient entraîner la perte de contrôle du réacteur ou d'autres systèmes critiques. Les mesures de cybersécurité sont donc essentielles pour empêcher l'accès non autorisé à ces systèmes et les protéger contre les attaques.

La question de la prolifération nucléaire est également préoccupante en ce qui concerne la fusion nucléaire. Bien que les réacteurs de fusion ne produisent pas de déchets nucléaires ou de matières de qualité militaire, ils nécessitent l'utilisation d'isotopes comme le tritium, qui peut être utilisé pour fabriquer des armes nucléaires. Par conséquent, l'industrialisation de la fusion nucléaire doit s'accompagner de solides garanties et de mesures de non-prolifération pour prévenir l'utilisation abusive de ces matériaux.

En résumé, l'industrialisation de la fusion nucléaire comporte un éventail de défis en matière de sécurité qui doivent être relevés au moyen de mesures de sécurité physique, de mesures de cybersécurité et de mesures de non-prolifération. Grâce à une bonne planification, ces risques peuvent être gérés et la fusion nucléaire peut devenir une source d'énergie sûre et durable pour l'avenir.

L'industrialisation de la technologie de la fusion nucléaire pose d'importants défis de sécurité qui doivent être relevés pour assurer l'utilisation sûre et pacifique de cette source d'énergie.

L'une des principales préoccupations est le potentiel de prolifération nucléaire. Les réactions de fusion nucléaire nécessitent du deutérium et du tritium, deux isotopes de l'hydrogène. Le tritium est une matière radioactive qui peut être utilisée pour accroître le rendement des armes nucléaires. Par conséquent, le développement de la technologie de fusion nucléaire doit être étroitement surveillé pour empêcher l'acquisition non autorisée de tritium par des États voyous ou des acteurs non étatiques.

Une autre préoccupation en matière de sécurité est le risque d'accidents ou d'attaques délibérées contre les installations de fusion. Les réactions de fusion produisent de grandes quantités d'énergie, et l'équipement utilisé pour contenir et contrôler la réaction peut être complexe et difficile à entretenir. Un accident grave survenu dans une installation de fusion pourrait libérer des niveaux de rayonnement dangereux, ce qui présenterait un risque pour les collectivités avoisinantes et l'environnement. De plus, il faut tenir compte de la menace de cyberattaques contre les systèmes de contrôle des installations de fusion, car une attaque réussie pourrait perturber ou même causer une défaillance catastrophique de la réaction de fusion.

Pour relever ces défis en matière de sécurité, il faut mettre en œuvre une réglementation et une surveillance rigoureuses pour veiller à ce que la production et la manipulation du tritium soient rigoureusement contrôlées. Les installations de fusion doivent également être conçues et construites avec la sûreté comme priorité absolue, en intégrant des systèmes de sûreté redondants et des mesures de confinement robustes. De plus, des mesures de cybersécurité doivent être mises en œuvre pour protéger les systèmes de contrôle des installations de fusion contre les acteurs malveillants.

En résumé, bien que la fusion nucléaire ait le potentiel de fournir une énergie propre, sûre et pratiquement illimitée, l'industrialisation de cette technologie doit être accompagnée de mesures de sécurité globales pour assurer son utilisation pacifique et prévenir la prolifération des armes nucléaires.

### **I . 1. La fusion nucléaire par confinement magnétique**

Le confinement magnétique est l'une des principales méthodes utilisées pour atteindre les températures et pressions élevées requises pour que des réactions de fusion nucléaire se produisent. Le confinement magnétique consiste à utiliser des champs magnétiques pour confiner et contrôler le plasma, le gaz ionisé chaud qui alimente les réactions de fusion. Bien que le confinement magnétique présente de nombreux avantages, comme le fait d'être une



façon relativement sécuritaire et écologique de produire de l'énergie, il reste des préoccupations en matière de sécurité à régler [26].

L'un des principaux problèmes de sécurité liés au confinement magnétique est le risque d'accidents ou de défaillances qui pourraient libérer de grandes quantités d'énergie ou de rayonnement. Par exemple, si le champ magnétique qui contient le plasma tombait en panne, il pourrait entraîner une libération soudaine d'énergie et de rayonnement qui pourrait être dangereuse pour les travailleurs et l'environnement environnant. Pour atténuer ce risque, les dispositifs de confinement magnétique sont conçus avec plusieurs couches de confinement et de dispositifs de sûreté afin de prévenir les accidents et de minimiser le risque d'exposition au rayonnement [27].

Une autre préoccupation en matière de sécurité liée au confinement magnétique est le potentiel de prolifération nucléaire. Bien que les réactions de fusion ne produisent pas de déchets hautement radioactifs comme les réactions de fission, elles peuvent produire du tritium, un isotope radioactif qui peut être utilisé pour fabriquer des armes nucléaires. Pour contrer ce risque, les chercheurs et les ingénieurs en fusion mettent au point des moyens de limiter la production de tritium dans les réacteurs de fusion et de stocker et éliminer en toute sécurité le tritium produit.

Enfin, on s'inquiète de la sécurité des matériaux et des technologies utilisés dans les dispositifs de confinement magnétique. Par exemple, les aimants supraconducteurs utilisés pour créer le champ magnétique nécessitent des matériaux rares et coûteux, comme le niobium-étain, qui sont soumis à des perturbations de la chaîne d'approvisionnement et à des risques géopolitiques. En outre, les systèmes informatiques avancés utilisés pour simuler et contrôler les réactions de fusion sont soumis à des cyberattaques et d'autres menaces à la sécurité [28].

Pour répondre à ces préoccupations en matière de sécurité, les chercheurs et les ingénieurs qui travaillent sur le confinement magnétique élaborent divers dispositifs de sûreté et mécanismes de contrôle. Par exemple, les dispositifs de confinement magnétique utilisent habituellement des systèmes de contrôle redondants et des mécanismes à sécurité intégrée pour prévenir les accidents et les défaillances. De plus, les chercheurs en fusion collaborent avec des organisations internationales comme l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) pour établir des garanties et des mécanismes de contrôle afin de prévenir la prolifération des matières et des technologies nucléaires.

Dans l'ensemble, bien qu'il y ait certainement des risques pour la sécurité associés à la fusion par confinement magnétique, de nombreux mécanismes de protection et de contrôle sont en place pour assurer l'utilisation sécuritaire et pacifique de cette technologie. Avec la poursuite de la recherche et du développement, il est probable que les réacteurs à fusion par confinement magnétique deviendront encore plus sûrs et plus sûrs à l'avenir.

## **I . 2. La fusion inertielle**

Le confinement inertielle est une autre méthode utilisée pour atteindre les températures et pressions élevées requises pour que des réactions de fusion nucléaire se produisent. En confinement inertielle, les petites pastilles de combustible, généralement composées de deutérium et de tritium, sont rapidement comprimées et chauffées à l'aide de lasers de haute puissance ou d'autres formes de rayonnement intense. Bien que le confinement inertielle présente de nombreux avantages potentiels, comme être plus compact et peut-être plus facile à accroître que le confinement magnétique, il y a aussi des préoccupations en matière de sécurité qui doivent être abordées.

L'une des principales préoccupations en matière de sécurité concernant le confinement inertielle est le risque d'accidents ou de défaillances pendant le processus de compression par laser. Si la compression devait échouer ou si le combustible devenait instable, cela pourrait entraîner un rejet soudain d'énergie et de rayonnement qui pourrait être dangereux pour les travailleurs et l'environnement. Pour atténuer ce risque, les dispositifs de confinement à inertie sont conçus avec plusieurs couches de confinement et de dispositifs de sûreté afin de prévenir les accidents et de minimiser le risque d'exposition au rayonnement.

Une autre préoccupation en matière de sécurité liée au confinement inertielle est le potentiel de prolifération nucléaire. Comme le confinement magnétique, le confinement inertielle peut produire du tritium, qui peut être utilisé pour fabriquer des armes nucléaires. En outre, les lasers à haute puissance et les autres technologies utilisées dans les dispositifs de confinement inertielle sont également susceptibles d'être mal utilisés par les mauvais acteurs qui cherchent à développer de nouvelles armes ou d'autres formes de technologie destructive. Pour contrer ces risques, les chercheurs et les ingénieurs en confinement inertielle travaillent à trouver des moyens de limiter la production de tritium et à établir des mesures de protection et des mécanismes de contrôle pour prévenir l'utilisation abusive de ces technologies.

Enfin, on s'inquiète de la sécurité des matériaux et des technologies utilisés dans les dispositifs de confinement inertielle. Tout comme le confinement magnétique, les dispositifs de

confinement inertiel utilisent des systèmes informatiques avancés qui font l'objet de cyberattaques et d'autres menaces à la sécurité. En outre, les lasers à haute puissance utilisés dans le confinement inertiel nécessitent des matériaux rares et coûteux, tels que le verre dopé au néodyme, qui sont soumis à des perturbations de la chaîne d'approvisionnement et des risques géopolitiques.

Pour répondre à ces préoccupations en matière de sécurité, les chercheurs et les ingénieurs qui travaillent sur le confinement inertiel élaborent divers dispositifs de sûreté et mécanismes de contrôle. Par exemple, les dispositifs de confinement à inertie utilisent habituellement des systèmes de contrôle redondants et des mécanismes à sécurité intégrée pour prévenir les accidents et les défaillances. De plus, les chercheurs en confinement inertiel collaborent avec des organisations internationales comme l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) pour établir des garanties et des mécanismes de contrôle afin de prévenir la prolifération des matières et des technologies nucléaires.

Dans l'ensemble, bien qu'il y ait certainement des risques pour la sécurité associés à la fusion par confinement inertiel, de nombreux mécanismes de protection et de contrôle sont en place pour assurer l'utilisation sécuritaire et pacifique de cette technologie. Avec la poursuite de la recherche et du développement, il est probable que les réacteurs à fusion par confinement inertiel deviendront encore plus sûrs à l'avenir [28].

## **II. Les défis scientifiques**

La production d'énergie par fusion nucléaire est un processus complexe et difficile qui exige de surmonter un certain nombre d'obstacles scientifiques. Voici quelques-uns des principaux défis scientifiques de la production d'énergie de fusion nucléaire :

- Atteindre les températures et pressions requises : Les réactions de fusion nucléaire exigent des températures et des pressions extrêmement élevées, de l'ordre de millions de degrés Celsius et de millions de fois la pression atmosphérique. La réalisation et le maintien de ces conditions pendant de longues périodes constituent un défi scientifique majeur ;
- Contrôler et confiner le plasma : Le combustible des réactions de fusion nucléaire est un plasma, qui est un état de matière dans lequel les noyaux atomiques et les électrons sont séparés. Contrôler et confiner le plasma est crucial pour obtenir des réactions de fusion nucléaire soutenues, mais c'est aussi un défi scientifique difficile. Le plasma

doit être confiné assez longtemps pour que les réactions de fusion se produisent, mais il doit également être maintenu stable et exempt d'instabilités qui pourraient le faire se décomposer ;

- Science des matériaux : les matériaux utilisés dans les réacteurs de fusion nucléaire doivent pouvoir résister aux températures extrêmes et au rayonnement produit par les réactions de fusion. Trouver des matériaux suffisamment durables et résistants au rayonnement pour être utilisés dans un réacteur à fusion est un défi scientifique important ;
- Développement de technologies efficaces et fiables : Les technologies utilisées pour chauffer, confiner et extraire l'énergie du plasma doivent être efficaces, fiables et rentables. Le développement de ces technologies est un défi scientifique important qui exige des progrès dans des domaines comme la science des matériaux, le génie et la modélisation informatique ;
- Intensification de la technologie : Bien que des réactions de fusion nucléaire aient été démontrées en laboratoire, l'intensification de la technologie à des niveaux commerciaux constitue un défi scientifique important. La construction d'un réacteur de fusion capable de produire une production énergétique nette sur une base durable nécessitera des progrès significatifs dans tous les domaines scientifiques mentionnés ci-dessus, ainsi que dans les domaines de l'économie et de la politique.

Malgré ces défis scientifiques, des progrès sont réalisés dans la recherche et le développement sur la fusion nucléaire. Des projets internationaux de grande envergure, tels que le réacteur à fusion ITER en construction en France, réunissent des scientifiques et des ingénieurs du monde entier pour relever ces défis et faire progresser la technologie. Avec la poursuite de la recherche et du développement, il est possible que la production d'énergie par fusion nucléaire devienne une source viable d'énergie propre et durable à l'avenir.

### **III. Impact environnemental**

La fusion nucléaire peut être une source d'énergie très écologique. Contrairement à la fission nucléaire, qui produit des déchets radioactifs, les sous-produits des réactions de fusion nucléaire ne sont pas radioactifs et ne constituent pas un danger environnemental à long terme. De plus, la fusion nucléaire ne produit pas de gaz à effet de serre, qui contribuent au changement climatique.

Toutefois, la production d'énergie par fusion nucléaire soulève certaines préoccupations environnementales. L'une des principales préoccupations est la production de tritium, un isotope radioactif de l'hydrogène qui est utilisé comme combustible dans de nombreuses réactions de fusion. Bien que le tritium ait une demi-vie courte et se désintègre relativement rapidement, il peut tout de même être dangereux s'il est rejeté dans l'environnement. Les réacteurs à fusion devront être conçus de manière à réduire au minimum le rejet de tritium et à stocker et éliminer de façon sécuritaire tout tritium produit.

Une autre préoccupation environnementale est l'utilisation de matériaux rares et précieux, comme le lithium et le béryllium, dans la construction de réacteurs à fusion. Ces matières ne sont pas renouvelables et ne sont pas abondantes, ce qui signifie que leur extraction et leur utilisation peuvent avoir des répercussions environnementales, comme la destruction de l'habitat et la pollution.

Enfin, la construction et l'exploitation de réacteurs à fusion à grande échelle exigeront des quantités importantes d'énergie et de ressources. Bien que l'énergie de fusion elle-même ne produise pas de gaz à effet de serre, la construction et l'exploitation des réacteurs de fusion pourraient contribuer aux émissions de gaz à effet de serre si l'énergie utilisée pour construire et exploiter les réacteurs provient de combustibles fossiles.

Dans l'ensemble, bien que la fusion nucléaire ait le potentiel d'être une source d'énergie très propre et durable, il y a encore des préoccupations environnementales qui doivent être abordées afin de s'assurer que la production d'énergie par fusion nucléaire est aussi écologique que possible.

#### **IV. Le coût**

Le coût de production de l'énergie par fusion nucléaire est un sujet complexe et dynamique qui dépend de plusieurs facteurs, y compris la technologie de fusion spécifique utilisée, l'échelle du réacteur, et le coût des matières premières, entre autres. Cela dit, voici quelques considérations générales liées au coût de la production d'énergie par fusion nucléaire dans un contexte industriel :

- Coûts de recherche et développement : Le développement de capacités pratiques de production d'énergie de fusion nécessitera des investissements importants en recherche et développement. Cela comprend le financement de la recherche fondamentale, du développement technique et de la construction de réacteurs

expérimentaux. Bien que certains fonds de recherche proviennent de gouvernements et d'organisations internationales, comme ITER, des entreprises privées investissent également dans la recherche et le développement en fusion ;

- Coûts de construction : La construction d'une centrale de fusion à l'échelle commerciale nécessitera également des investissements importants dans l'infrastructure et la construction. Cela comprend le coût du réacteur lui-même, ainsi que les installations de soutien comme les systèmes de refroidissement, l'infrastructure électrique et les systèmes de sûreté ;
- Coûts des matériaux : Le coût des matières premières pour les réacteurs de fusion, tels que les combustibles au tritium et au deutérium utilisés dans la plupart des réactions de fusion, peut également être un facteur important dans le coût de production de l'énergie de fusion. Le tritium, en particulier, est un isotope radioactif qui nécessite une manipulation minutieuse et des mesures de sécurité ;
- Coûts d'exploitation : Une fois qu'une centrale de fusion est opérationnelle, les coûts d'exploitation courants comprennent le coût du carburant, l'entretien et les mesures de sécurité. Bien que les réacteurs à fusion puissent fonctionner pendant de longues périodes sans faire le plein, un entretien régulier sera tout de même nécessaire pour assurer le fonctionnement sûr et efficace du réacteur.

Mieux, étant donné que la production d'énergie par fusion nucléaire est encore au stade de la recherche et du développement, il est difficile de fournir des estimations précises des coûts pour les réacteurs industriels. Cependant, il existe quelques exemples et références qui peuvent éclairer les coûts et les défis potentiels associés à cette technologie :

- ITER : Le réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER) est l'un des projets de recherche sur la fusion les plus médiatisés au monde. Le projet vise à démontrer la faisabilité scientifique et technique de la production d'énergie par fusion en construisant un réacteur expérimental à grande échelle qui peut produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. Le coût de construction et d'exploitation d'ITER est estimé à environ 20 milliards d'euros (environ 23,5 milliards de dollars), avec un financement provenant d'un consortium de pays comprenant l'Union européenne, la Chine, le Japon, la Russie et la Corée du Sud. La construction du réacteur a connu des retards importants et des dépassements de coûts, et le réacteur ne devrait pas être opérationnel avant la fin des années 2020 ou le début des années 2030 ;

- *Wendelstein 7-X* : Le réacteur *Wendelstein 7-X* en Allemagne est un autre exemple de réacteur expérimental de fusion à grande échelle. Le réacteur a coûté environ 400 millions d'euros (environ 470 millions de dollars) à construire et est conçu pour démontrer le potentiel d'un type de réaction de fusion appelé *stellarator*. Bien que *Wendelstein 7-X* n'ait pas encore atteint l'objectif de produire plus d'énergie qu'elle n'en consomme, elle a réalisé des progrès importants dans le développement et l'amélioration de la technologie ;
- Entreprises privées : outre les initiatives de recherche financées par le gouvernement comme ITER, plusieurs entreprises privées travaillent au développement de capacités de production d'énergie de fusion. Ces sociétés comprennent *Tokamak Energy* au Royaume-Uni, *General Fusion* au Canada et *Commonwealth Fusion Systems* aux États-Unis, entre autres. Bien que ces entreprises n'aient pas divulgué d'estimations précises des coûts de leurs activités de recherche et de développement en fusion, elles ont toutes recueilli des fonds importants à partir d'investissements.

Dans l'ensemble, il convient de souligner que le coût de production d'énergie par fusion nucléaire sera probablement élevé comparativement à d'autres sources d'énergie, du moins à court terme. Cependant, de nombreux experts estiment que la production d'énergie de fusion pourrait être concurrentielle à long terme par rapport aux autres sources d'énergie, surtout si les coûts des combustibles fossiles continuent d'augmenter et que des règlements plus stricts sur les émissions de gaz à effet de serre sont mis en œuvre. À mesure que d'autres recherches sont menées et que d'autres réacteurs expérimentaux sont construits et mis à l'essai, nous pouvons mieux comprendre les coûts et les avantages potentiels de la production d'énergie par fusion nucléaire dans un contexte industriel.

## **V. Pourquoi la fusion nucléaire ?**

La fusion nucléaire est une source d'énergie prometteuse pour plusieurs raisons, notamment le potentiel de combustible abondant, la sûreté et un impact environnemental minimal.

Elle est l'une des nombreuses sources d'énergie que nous pouvons utiliser pour produire de l'électricité. Cependant, il y a plusieurs raisons impérieuses pour lesquelles nous pourrions choisir la fusion nucléaire plutôt que d'autres options :

- Combustible abondant : La fusion nucléaire utilise des isotopes de l'hydrogène, comme le deutérium et le tritium, qui sont abondants dans l'eau de mer et faciles à

extraire. Il y a suffisamment de deutérium dans les océans du monde pour alimenter les besoins énergétiques mondiaux pendant des millions d'années. Cela fait de la fusion nucléaire une source d'énergie potentiellement durable ;

- Sûre et propre : la fusion nucléaire produit très peu de déchets radioactifs et n'émet pas de gaz à effet de serre, ce qui en fait une source d'énergie sûre et propre. En revanche, la fission nucléaire produit des déchets hautement radioactifs qui demeurent dangereux pendant des milliers d'années, et les combustibles fossiles émettent des gaz à effet de serre qui contribuent aux changements climatiques. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) affirme que « la fusion comporte un certain nombre de caractéristiques de sûreté intéressantes, comme un fonctionnement intrinsèquement sûr, de faibles risques d'accident et l'absence de production de déchets radioactifs à longue durée de vie. [28] » ;
- Production d'énergie élevée : la fusion nucléaire peut produire de grandes quantités d'énergie à partir d'une quantité relativement faible de combustible. Par exemple, le projet ITER de l'Union européenne vise à démontrer que la fusion nucléaire peut produire dix fois plus d'énergie qu'elle n'en consomme ;
- Risque minimal d'accident : Les réacteurs à fusion nucléaire fonctionnent à des pressions beaucoup plus faibles que les réacteurs à fission nucléaire, ce qui réduit le risque d'accident. En outre, les réactions de fusion peuvent être facilement arrêtées en coupant simplement l'alimentation en combustible, ce qui les rend plus faciles à contrôler que les réactions de fission. La NAS affirme que "les réactions de fusion ne produisent pas de réactions en chaîne incontrôlées et peuvent être arrêtées à tout moment en coupant simplement l'approvisionnement en combustible, ce qui les rend beaucoup plus sûrs que la fission nucléaire." [15] ;
- Pas de risque de prolifération : la fusion nucléaire n'a pas de risque de prolifération, car elle ne peut pas être utilisée pour produire des armes nucléaires. En effet, les réactions de fusion exigent des températures et des pressions extrêmement élevées, qui sont difficiles à obtenir en dehors d'un réacteur spécialisé. La FAS affirme que « la fusion n'est pas un risque de prolifération parce qu'elle ne nécessite pas de matières fissiles et parce que les difficultés techniques d'une arme à fusion sont beaucoup plus grandes que pour une arme à fission. » [27].

En conclusion, la fusion nucléaire présente un grand potentiel en tant que source d'énergie sûre, durable et hautement efficace. Bien qu'il reste des défis techniques et techniques à



relever avant que la fusion nucléaire ne devienne une source d'énergie pratique, les avantages sont considérables.

## **VI. Cette nouvelle technologie sera-t-elle domestiquable d'ici 2050 ?**

La fusion nucléaire est le processus consistant à combiner deux noyaux atomiques pour former un noyau plus lourd, libérant ainsi une grande quantité d'énergie. C'est le même processus qui alimente le soleil et les autres étoiles. Si nous pouvions exploiter la fusion nucléaire ici sur Terre, elle pourrait fournir une source d'énergie propre pratiquement illimitée sans produire d'émissions de gaz à effet de serre ou de déchets nucléaires à longue durée de vie.

Cependant, malgré des décennies de recherche, la réalisation pratique de la fusion nucléaire s'est avérée un défi technique important. Les réacteurs de fusion actuels nécessitent plus d'énergie pour fonctionner qu'ils ne produisent, et les chercheurs travaillent toujours à mettre au point des matériaux capables de résister aux températures et pressions extrêmes requises pour des réactions de fusion soutenues.

Cela dit, des progrès ont été réalisés au cours des dernières années, plusieurs réacteurs à fusion expérimentale ayant franchi des étapes importantes. Par exemple, le réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER) est actuellement en construction en France et, une fois achevé, il devrait produire son premier plasma en 2025. ITER est conçu pour démontrer la faisabilité de la fusion en tant que source d'énergie viable.

On ne sait pas si la fusion nucléaire pourra être domestiquée au cours des prochaines décennies, et les projections varient grandement selon les hypothèses et les technologies envisagées. Certains experts pensent que les centrales électriques à fusion pourraient fonctionner d'ici le milieu du siècle, tandis que d'autres sont plus sceptiques et pensent qu'il faudra encore plusieurs décennies de recherche et de développement.

Dans l'ensemble, il est clair que la fusion nucléaire demeure un domaine de recherche et de développement actif, avec de nombreux défis à relever. Mais compte tenu des avantages potentiels de la fusion en tant que source d'énergie propre et abondante, elle devrait rester un point de mire de la recherche et des investissements dans un avenir prévisible.

## **VII. Les enjeux de la production d'énergie par la fusion nucléaire au Sénégal ?**

La fusion nucléaire a le potentiel de fournir une source d'énergie propre pratiquement illimitée à des pays du monde entier, y compris des pays africains comme le Sénégal. Alors que le Sénégal dépend actuellement fortement des combustibles fossiles pour ses besoins énergétiques, le développement de sources d'énergie alternatives, y compris la fusion nucléaire, suscite un intérêt croissant.

L'un des avantages de la fusion nucléaire en tant que source d'énergie est qu'elle ne produit pratiquement pas d'émissions de gaz à effet de serre ou de déchets nucléaires à longue durée de vie, ce qui en fait une option attrayante pour les pays qui cherchent à réduire leur empreinte carbone et à passer à des sources d'énergie plus propres. De plus, les réacteurs à fusion peuvent fonctionner pendant des décennies sans avoir à faire le plein, ce qui pourrait contribuer à améliorer la sécurité énergétique et à réduire la dépendance à l'égard des sources d'énergie étrangères.

Il n'existe actuellement aucun réacteur nucléaire de fusion en exploitation en Afrique, mais plusieurs pays du continent, dont le Sénégal, ont exprimé leur intérêt à explorer le potentiel de l'énergie de fusion. Par exemple, en 2018, le Sénégal a signé un protocole d'entente avec l'AIEA (« l'atome pour la paix et le développement ») pour coopérer au développement de l'énergie nucléaire, y compris la fusion.

Pour ce qui est des projets ou des initiatives spécifiques liés à la fusion nucléaire au Sénégal, je n'en connais pas pour l'instant. Cependant, le gouvernement du Sénégal s'est fixé des objectifs ambitieux pour accroître l'utilisation des énergies renouvelables dans le pays, et il est possible que la fusion nucléaire soit considérée comme faisant partie de cet effort à l'avenir.

La production d'énergie par fusion nucléaire pourrait apporter plusieurs avantages à un pays africain comme le Sénégal :

- Sécurité énergétique : En tant que pays qui dépend fortement des combustibles fossiles importés pour ses besoins énergétiques, le développement d'une source nationale d'énergie propre comme la fusion nucléaire pourrait contribuer à améliorer la sécurité énergétique et à réduire la dépendance à l'égard des sources d'énergie étrangères ;

- Développement économique : investir dans la recherche et l'infrastructure de fusion nucléaire pourrait également créer de nouvelles possibilités d'emploi et stimuler le développement économique au Sénégal. La construction et l'exploitation des réacteurs de fusion nucléaire nécessiteraient des travailleurs qualifiés, des ingénieurs et des scientifiques, ce qui créerait de nouvelles possibilités d'éducation et de formation ;
- Énergie propre : La production d'énergie de fusion nucléaire peut fournir une source d'énergie propre pratiquement illimitée sans produire d'émissions de gaz à effet de serre ni de déchets nucléaires à longue durée de vie. Cela pourrait aider le Sénégal à respecter ses engagements en vertu de l'Accord de Paris pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et atténuer le changement climatique ;
- Développement technologique : le développement des capacités de production d'énergie de fusion nucléaire nécessiterait une expertise scientifique et technologique avancée, qui pourrait contribuer à stimuler l'innovation et le développement technologique au Sénégal. Cela pourrait, à son tour, soutenir le développement d'autres industries et secteurs du pays.

Il convient de souligner que la mise au point de réacteurs de fusion nucléaire pratiques nécessitera probablement des investissements importants en recherche et développement, ainsi que la construction d'infrastructures complexes et coûteuses. Toutefois, compte tenu des avantages potentiels de l'énergie de fusion, y compris sa capacité à fournir une source d'énergie propre, fiable et pratiquement illimitée, elle devrait demeurer un domaine d'intérêt et d'investissement pour les pays du monde entier, y compris le Sénégal.

## **Conclusion**

La situation climatique critique pousse à trouver des moyens durables afin de maintenir la terre sous 1.5 °C . De ce fait, il est nécessaire de trouver des alternatives énergétiques pour réduire les GES.

L'objectif général de ce travail porte était d'étudier de la fusion nucléaire pour une production d'énergie propre. D'abord, une vue d'ensemble de la fusion nucléaire a été donnée. Plusieurs notions ont été relayées ainsi que l'étude des paramètres mis en jeu lors de la fusion nucléaire. Le principe de la fusion nucléaire implique la combinaison de noyaux atomiques légers pour former des noyaux plus lourds, libérant de l'énergie dans le processus.

Ensuite, des moyens fiables de productions d'énergie ont été identifiés :

- La fusion par confinement magnétique ;
- La fusion par confinement électrostatique.

La fusion nucléaire est une source d'énergie prometteuse qui a le potentiel de fournir une énergie abondante, propre et durable pour les générations à venir. Alors que des réactions de fusion nucléaire ont été réalisées en laboratoire, la construction d'un réacteur capable de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme s'est avérée un défi scientifique important. C'est dans cette lancée que les technologies et des méthodes de contrôles ont été identifiées. De ce fait, cinq réacteurs ont été étudiés classés en fonction du type confinement :

- Dans le cas du confinement magnétique : JET, ITER ;
- Dans le cas du confinement inertiel : LMJ, NIF.

Ensuite, des moyens d'application de l'énergie issue de la fusion nucléaire ont été identifiés. Si les réacteurs à fusion deviennent viables, ils pourraient avoir un large éventail d'applications, y compris la production d'électricité, la propulsion spatiale et les processus industriels.

Aussi, un dispositif sécuritaire a été élaboré, suivi de l'étude de son impact environnemental. L'un des avantages les plus importants de la fusion nucléaire par rapport aux autres formes de production d'énergie est son respect de l'environnement. Contrairement aux combustibles fossiles et à la fission nucléaire, la fusion nucléaire ne produit pas de gaz à effet de serre ni de déchets radioactifs à longue durée de vie. Cependant, il reste des défis scientifiques, technologiques et économiques à relever avant que la fusion nucléaire ne devienne une source

d'énergie viable. C'est dans ce contexte qu'en dernier lieu, les enjeux et limites de la fusion nucléaire comme moyen de production d'énergie ont été analysés. Ces défis comprennent le développement de matériaux capables de résister aux conditions extrêmes à l'intérieur d'un réacteur de fusion, la conception de systèmes efficaces et fiables pour chauffer et contenir le plasma, et la réduction des coûts de construction et d'exploitation d'un réacteur de fusion.

Malgré ces défis, la recherche et le développement dans le domaine de la fusion nucléaire continuent de progresser, plusieurs projets internationaux de grande envergure étant en cours. Avec des investissements et une collaboration continue, il est possible que la fusion nucléaire devienne une source d'énergie majeure dans les décennies à venir, contribuant à un avenir énergétique plus durable et plus sûr pour le monde.

En définitive, la production d'énergie par fusion nucléaire est un sujet d'une grande importance scientifique et sociétale, et il sera fascinant de voir comment cette technologie évoluera dans les années à venir.

## Références

- [1] O. d. N. Unies, «[www.un.org](https://www.un.org/fr/global-issues/population#:~:text=Un%20%C3%A9lan%20d%C3%A9mographique&text=Selon%20les%20projections%2C%20la%20population,individus%20vers%20l'an%202100..),» [En ligne]. Available: <https://www.un.org/fr/global-issues/population#:~:text=Un%20%C3%A9lan%20d%C3%A9mographique&text=Selon%20les%20projections%2C%20la%20population,individus%20vers%20l'an%202100..> [Accès le 12 Janvier 2022].
- [2] I. E. Agency, «Key World Energy Statistics,» IEA Publications, France, 2021.
- [3] ITER, «[iter.org](https://www.iter.org),» [En ligne]. Available: <https://www.iter.org/fr/proj/itermilestones>. [Accès le 13 Janvier 2023].
- [4] C. à. l. Atomique, «L'atome,» Direction de la communication, Paris, 2002.
- [5] E. Simpson, 29 Mai 2019. [En ligne]. Available: <https://people.physics.anu.edu.au/~ecs103/chart3d/>. [Accès le 08 04 2023].
- [6] «SIAPARTNERS,» 25 Septembre 2013. [En ligne]. Available: <https://www.sia-partners.com/fr/publications/publications-de-nos-experts/produire-de-lelectricite-grace-a-la-fusion-nucleaire-une#:~:text=Il%20existe%20deux%20principes%20de,une%20enceinte%20de%20confinement%20magn%C3%A9tique..> [Accès le 06 Janvier 2023].
- [7] C. à. l. Atomique, «L'énergie nucléaire : fusion et fission,» Direction de la communication, Paris, 2002.
- [8] «Bulletin.ch,» 04 Janvier 2017. [En ligne]. Available: <https://www.bulletin.ch/fr/news-detail/alexia-la-fusion-nucleaire.html>. [Accès le 08 04 2023].
- [9] A. Benuzzi-Mounaix, «La fusion nucléaire,» chez *Un espoir pour une énergie propre*, Paris, Bélin Pour la science, 2008, p. 120.
- [10] «Orano.group,» Orano group, 17 Janvier 2022. [En ligne]. Available: <https://www.orano.group/fr/decodage/Fission-et-fusion-nucleaire-ce-qu-il-faut-retenir-Orano#:~:text=Le%20processus%20de%20la%20fission,constituer%20un%20plus%20gros%20atome..> [Accès le 08 Janvier 2023].

- [11] «nucléaire-info,» [En ligne]. Available: <http://www.nucleaire-info.com/>. [Accès le 20 12 2022].
- [12] T. H. Rider, «A general critique of inertial-electrostatic confinement fusion systems,» *Physics of Plasma*, vol. 2, p. 2, 06 Juin 1995.
- [13] «Wikipédia,» Domaine public, [En ligne]. Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10279854>. [Accès le 25 Janvier 2023].
- [14] B. Klopfer, «The fusor,» 19 Mars 2012. [En ligne]. Available: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/klopfer2/>. [Accès le 2023 Février 2023].
- [15] Futura-sciences, «Physique-champ-magnetique,» [En ligne]. Available: <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-champ-magnetique-3878/>. [Accès le 19 Février 2023].
- [16] S. Figure, « ResearchGate,» [En ligne]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Representation-des-bobines-et-champs-magnetiques-dans-un-tokamak\\_fig2\\_315340133](https://www.researchgate.net/figure/Representation-des-bobines-et-champs-magnetiques-dans-un-tokamak_fig2_315340133). [Accès le 18 02 2023].
- [17] «ITER,» [En ligne]. Available: <https://www.iter.org/fr/construction/sitefabricationpfcoils>. [Accès le 15 01 2023].
- [18] [En ligne]. Available: <http://iterthiers.free.fr/carac.php>.
- [19] D. Perrault, «Réacteurs nucléaires de fusion,» IRSN, Fontenay-aux-Roses, 2018.
- [20] I. M. P. d. p. d. plasmas, «iaea,» [En ligne]. Available: <https://www.iaea.org/fr/energie-de-fusion/la-fusion-par-confinement-magnetique-tokamaks-et-stellarators>. [Accès le 27 02 2023].
- [21] [En ligne]. Available: <https://fr.vecteezy.com/art-vectoriel/7227270-pile-a-combustible-et-reacteur-de-fusion-thermonucleaire-dispositifs-vecteurs-qui-recoivent-l-energie-de-la-fusion-thermonucleaire-de-l-hydrogene-en-helium-et-convertissent-l-energie-potentielle-chimi>. [Accès le 12 01 2023].
- [22] e. lyon, «culturesciencesphysique.ens-lyon,» [En ligne]. Available:

<https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/video-conferences/frama-pcp/presentation-ITER-Bigot.pdf>. [Accès le 08 12 2022].

- [23] I. Organization, «ITER,» ITER organization, [En ligne]. Available: <https://www.iter.org/fr/sci/plasmaheating#:~:text=Dans%20le%20tokamak%2C%20les%20variations,excit%C3%A9s%20et%20entrent%20en%20collision..> [Accès le 3 Mars 2023].
- [24] F. DELOBEAU, «Fusion par confinement inertiel,» *Journal de physique*, vol. 38, p. 59, 1977.
- [25] «Planete énergie,» Total energy fondation, [En ligne]. Available: <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/transports-mondiaux-emissions-co2-en-hausse>. [Accès le 15 03 2023].
- [26] E. a. M. National Academies of Sciences, « Powering the Future: Fusion Energy,» The National Academies Press., 2019. [En ligne]. Available: <https://doi.org/10.17226/25331>.
- [27] U. D. o. Energy, « Fusion Energy Sciences Program,» 2021. [En ligne]. Available: <https://science.osti.gov/fes/fusion-energy-sciences>.
- [28] I. A. E. Agency, « Nuclear Safeguards,» [En ligne]. Available: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safeguards>.
- [29] A. Benuzzi, La fusion nucléaire, Un espoir pour une énergie propre et inépuisable, Paris: Belin, 2008.