

$E=mc^2$ et l'énergie de fusion



Prof. Ambrogio Fasoli

Centre de Recherches en Physiques des Plasmas
EPFL

Mécanique | 2013 3

Bonjour. Nous allons aujourd'hui voir ensemble comment une application directe de la théorie de la relativité, en particulier l'équivalence entre masse énergie, découverte par Einstein, peut nous aider à résoudre un des problèmes principaux de l'humanité, celui de l'énergie. Je m'appelle Ambrosio Fasoli, je suis professeur au Centre de Recherches en Physique des Plasmas de l'EPFL, un centre qui concentre toutes les recherches en fusion en Suisse.

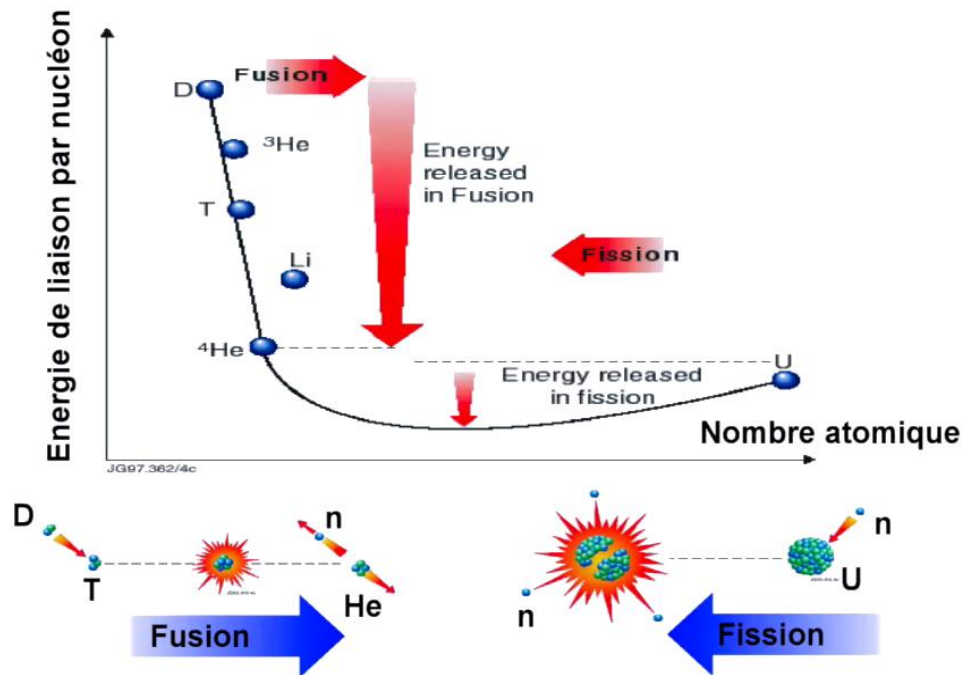
Notes

Summary



0m 00s

Fusion et fission



Mécanique | 2013 7

Commençons par regarder la courbe qui nous donne l'énergie de liaison dans les noyaux de tous les éléments, en fonction du nombre atomique. Elle n'est pas constante, mais elle a un minimum, qui correspond à un maximum en valeur absolue, vers un nombre atomique qui correspond à celui à peu près, du fer. La région a donc des noyaux très stables. Ceci veut dire que si l'on casse les noyaux lourds, plus lourds que ceux du fer, disons, on obtient de l'énergie. Et de même, que l'on peut obtenir de l'énergie et en fait, en plus grande mesure, vu la forme de la courbe, si l'on met ensemble, c'est-à-dire, si l'on fusionne des noyaux légers. Il s'agit respectivement des processus de fusion, de fission et de fusion, comme illustré dans les deux exemples ici. Le premier est celui de la fission, dans lequel on voit un noyau d'Uranium qui est cassé par un neutron, et donc, se casse un petit morceau en donnant lieu à de l'énergie et à d'autres neutrons. Le deuxième processus, c'est le processus inverse, de fusion, dans lequel deux noyaux de Deuterium Tritium, des atomes d'Hydrogène, sont mis ensemble pour produire u neutron et un noyau d'Hélium, donc une particule alpha, et de l'énergie.

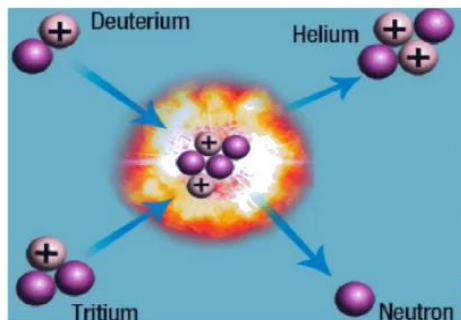
Notes

Summary



La réaction de fusion

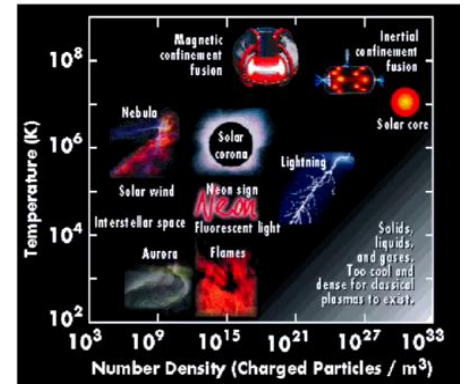
- Sur terre la réaction envisagée est D-T, la plus *facile* à obtenir
- La réaction D-T a quand-même besoin de températures de 100'000'000°C
 - La matière est sous forme de *plasma*, 4^{ème} état de la matière



Chauffage du plasma

Chauffage d'eau pour la production d'électricité

Génération de Tritium: $n + {}^6\text{Li} = \text{T} + \text{He}$



Mécanique | 2013 8

Sur Terre, la réaction que l'on espère exploiter afin de produire l'énergie est celle de Deuterium Tritium. On dit que c'est la plus facile à obtenir parce qu'elle a la probabilité la plus élevée par rapport aux autres réactions, à des températures pas trop élevées. Pourquoi est-ce qu'il faut des températures quand même très élevées? C'est parce que on doit vaincre la répulsion coulombienne, donc la répulsion des charges du même signe qui est présente entre les deux noyaux. Même pour le Deuterium Tritium, même si cest la réaction la plus facile à obtenir, donc qui a la probabilité la plus élevée, on a besoin de températures de l'ordre de 100 millions de degrés. des températures auxquelles la matière n'a pas une forme qu'on a l'habitude de voir, elle n'est ni sous une forme solide, ni sous une forme liquide, ni une forme gazeuse, mais elle est sous forme de ce qu'on appelle un plasma. Donc le quatrième état de la matière. Un plasma est un gaz fait par des particules chargées, donc des noyaux, des électrons qui ont été séparés, qui sont libres de bouger dans toutes les directions et tous les sens.

Notes

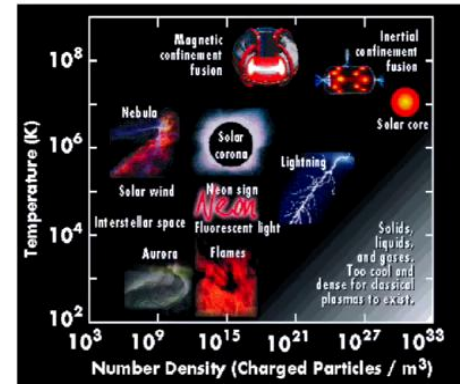
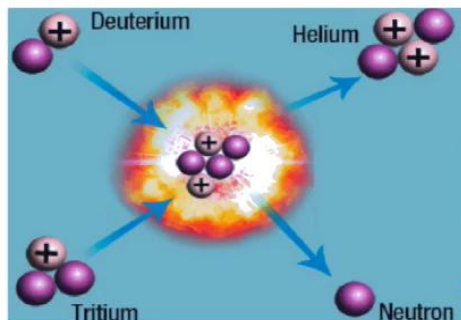
Summary



1m 50s

La réaction de fusion

- Sur terre la réaction envisagée est D-T, la plus *facile* à obtenir
- La réaction D-T a quand-même besoin de températures de 100'000'000°C
 - La matière est sous forme de *plasma*, 4^{ème} état de la matière



Chauffage d'eau pour la production d'électricité

Génération de Tritium: $n + {}^6\text{Li} = \text{T} + \text{He}$

Mécanique | 2013 8

Le plasma est une matière qui se comporte d'une manière très différente, des autres états qu'on a l'habitude de voir, mais qui en fait est présente pratiquement à travers tout l'univers, on dit que pratiquement tout l'univers que l'on connaît est sous forme de plasma. Sur cette image, on voit des exemples de plasma, à partir du plasma du corps du Soleil, jusqu'aux nébuleuses, jusqu'au plasma du vent solaire, jusqu'au plasma interstellaire, aurore, sur Terre on voit du plasma un peu plus rarement, dans le cas des foudres, dans le cas des flammes, ou des signaux à néons. Évidemment, on voit, on espère en voir de plus en plus dans le cadre des recherches en fusion. Donc dans ce plasma ont lieu les réactions D-T. Les réactions D-T, maintenant on les regarde un peu plus en détail, produisent deux produits, l'hélium, un noyau d'hélium d'un côté, qui a un but principal, celui de chauffer le plasma. C'est-à-dire maintenir le carburant suffisamment chaud pour qu'il puisse continuer de donner lieu à des réactions de fusion et donc de l'énergie. Le deuxième produit est le neutron.

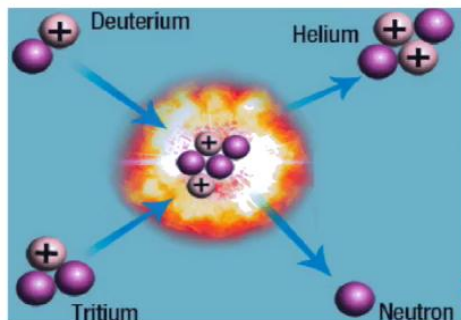
Notes

Summary



La réaction de fusion

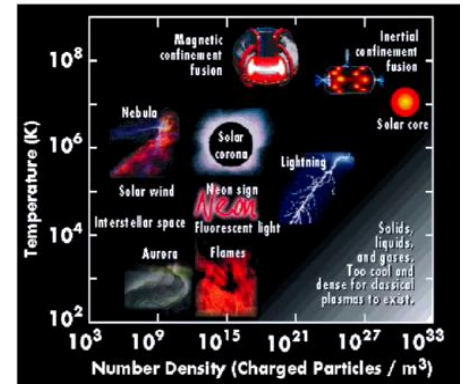
- Sur terre la réaction envisagée est D-T, la plus *facile* à obtenir
- La réaction D-T a quand-même besoin de températures de 100'000'000°C
 - La matière est sous forme de *plasma*, 4^{ème} état de la matière



Chauffage du plasma

Chauffage d'eau pour la production d'électricité

Génération de Tritium: $n + {}^6\text{Li} = \text{T} + \text{He}$



Mécanique | 2013 8

Le neutron, lui, a deux tâches : d'un côté il amène beaucoup d'énergie cinétique, il peut être utilisé pour chauffer un fluide caloporteur, typiquement de l'eau, qui après est utilisé pour produire de l'électricité de façon assez conventionnelle par des turbines. Mais il a aussi une deuxième tâche, aussi importante, celle de générer du Tritium sur le site, c'est-à-dire de réagir avec un manteau qui sera mis autour du plasma, qui contient du Lithium et ces réactions entre neutron et Lithium donne lieu à un noyau de Tritium et à de l'Hélium, encore une fois. Donc le Tritium n'a pas besoin d'être amené de l'extérieur, c'est un élément qui n'existe pas en nature il est simplement produit sur place, à l'intérieur du réacteur par une réaction entre le neutron et le Lithium.

Notes

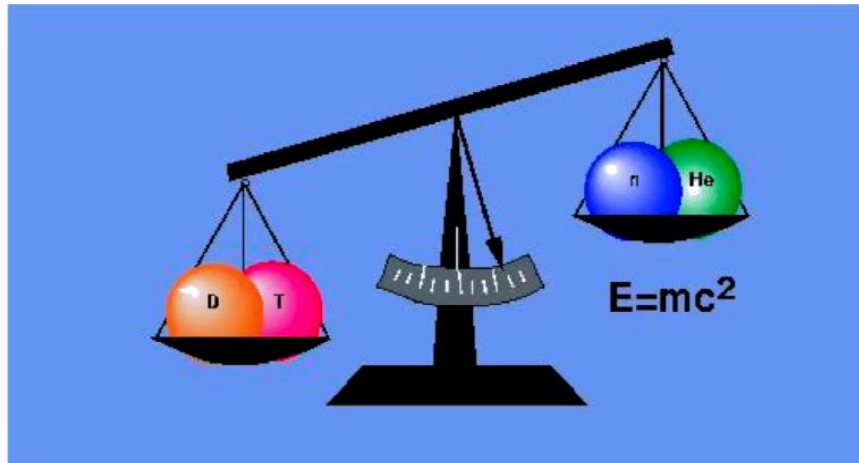
Summary



4m 08s

L'énergie de fusion vient de $E=mc^2$

- La fraction de masse *perdue* est $\sim 0.4\%$
- 1g de DT produit une quantité d'énergie équivalente à 100'000 litres de pétrole



Mécanique | 2013 10

Donc voilà une idée de comment un réacteur à fusion pourrait fonctionner. Le coeur est formé par le plasma chaud, c'est là-dedans que les réactions ont lieu, il y a une région autour du plasma dans laquelle on transfère la chaleur pour produire l'électricité et dans laquelle on produit le Tritium à partir de la réaction entre neutron et Lithium dont on vient de parler. Mais le point important à retenir ici est que les vrais carburants, c'est-à-dire ceux qu'on amène de l'extérieur pour faire fonctionner notre station de puissance, c'est le Deuterium et le Lithium. D'où vient donc cette énergie de fusion? Elle vient simplement de l'équivalence entre masse et énergie. E égal mc carré. parce que lorsque l'on a une réaction de fusion, il y a une petite fraction de la masse qui est perdue c'est-à-dire si l'on pouvait peser les produits à la réaction on pourrait trouver une petite différence par rapport aux éléments de départ. La différence de masse est présente, elle est due à une transformation d'énergie. Cette fraction de masse perdue, ou transformée en énergie, à première vue est petite, de l'ordre de 0,4 %, si on calcule combien d'énergie ça donne, c'est en fait une quantité énorme. Par exemple un gramme de ce carburant de Deuterium Tritium produit une quantité d'énergie équivalente à 100 mille litres de pétrole.

Notes

Summary



4m 55s

Avantages de l'énergie de fusion

- Densité d'énergie très élevée

Combustible	Energie spécifique (MJ/kg)
Eau, barrage de 100m de hauteur	0.001
Charbon	30
Pétrole	50
Fission (U-235)	85'000'000
Fusion (D-T)	3'500'000'000
$E = mc^2$	90'000'000'000

Donc cela constitue un potentiel absolument gigantesque de la fusion, c'est le premier avantage dont on peut parler, cette densité d'énergie qui est très élevée. Cette énergie, elle est visualisée sur cette table, en comparaison avec d'autres sources d'énergie. On peut considérer de l'eau, par exemple, dans un barrage de 100 mètres de hauteur, en terme d'énergie spécifique, en terme de quantité d'énergie produite par une telle masse, mesurée ici en mégajoules par kilo, mais peu importe, une telle mesure, comme elle est la même à travers le tableau on doit pouvoir comparer les différentes sources, ben l'eau donne du 0,001 mégajoules par kilo. Si l'on passe au charbon, que l'on doit brûler, évidemment, pour donner l'énergie, ou au pétrole, on a de l'ordre de 30, ou 50 mégajoules par kilo, donc des chiffres encore relativement modestes. Le grand saut on le fait quand on passe aux réactions nucléaires. La fission, par exemple Uranium, donne 85 millions de mégajoules par kilo, la fusion donne 3,500 millions de mégajoules par kilo. la seule source d'énergie qui s'approche quelque part de la transformation pure entre masse et énergie qui est ici reportée, évidemment ça donne une quantité d'énergie encore plus grande si on transforme toute la masse dont on a à disposition, donc en terme de mégajoules par kilo, ça fait 90 millions.

Notes

Summary



Avantages de l'énergie de fusion

- Densité d'énergie très élevée
- Combustible pratiquement inépuisable
- Environnement
 - Pas d'émission de gaz à effet de serre
 - Pas de déchets radioactifs de longue durée
- Sécurité
 - Pas de risque de perte de contrôle des réactions
 - Minime quantité (~1g) de combustible dans réacteur
 - Pas de lien avec armements

Combustible	Energie spécifique (MJ/kg)
Eau, barrage de 100m de hauteur	0.001
Charbon	30
Pétrole	50
Fission (U-235)	85'000'000
Fusion (D-T)	3'500'000'000
$E = mc^2$	90'000'000'000

Mécanique | 2013 14

Mais la seule réaction, le seul processus qui est comparable à cette transformation complète est celui de la fusion. deuxième avantage, le combustible est pratiquement inépuisable. Le combustible, on l'a dit tout à l'heure, est constitué par Lithium et Deuterium. Les deux sont présents dans l'océan, donc aussi un peu partout sur la Terre, sur la planète, et si on calcule combien de temps on peut faire fonctionner des réacteurs à fusion en partant du Lithium et du Deuterium qu'il y a dans l'océan on peut trouver des millions d'années. Donc, complètement compatibles avec ce qu'on peut appeler du développement durable. Au niveau environnement il y a aussi des avantages très importants, il n'y a pas d'émission de gaz à effet de serre, on ne brûle rien, on n'a pas de déchets radioactifs de longue durée, on n'a pas besoin de repository géologique de déchets radioactifs, au niveau de la sécurité on n'a pas de risques de perte de contrôle des réactions, le concept du réacteur n'a rien à faire, n'est pas basé du tout sur des réactions en chaîne. On a toujours une quantité très, très petite de combustible dans le réacteur en temps donné, de l'ordre des grammes. On n'a pas de lien avec la prolifération des armements.

Notes

Summary



7m 47s

Avantages de l'énergie de fusion

- Densité d'énergie très élevée
- Combustible pratiquement inépuisable
- Environnement
 - Pas d'émission de gaz à effet de serre
 - Pas de déchets radioactifs de longue durée
- Sécurité
 - Pas de risque de perte de contrôle des réactions
 - Minime quantité (~1g) de combustible dans réacteur
 - Pas de lien avec armements
- Energie concentrée, pas sujette aux variations météo

Combustible	Energie spécifique (MJ/kg)
Eau, barrage de 100m de hauteur	0.001
Charbon	30
Pétrole	50
Fission (U-235)	85'000'000
Fusion (D-T)	3'500'000'000
$E = mc^2$	90'000'000'000

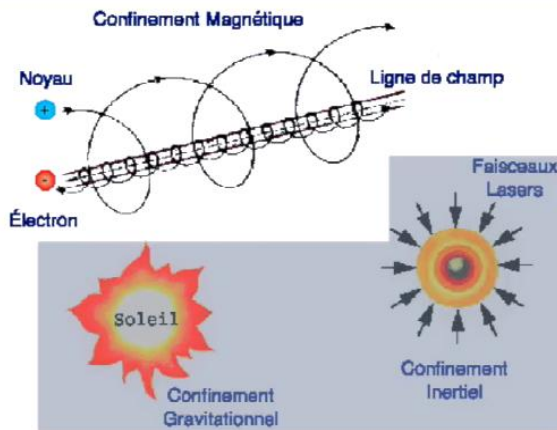
Évidemment c'est une énergie qui est concentrée dans des réacteurs, relativement de grande taille, en terme de puissance électrique, et une énergie qui n'est pas sujette du tout aux variations météorologiques.

Notes

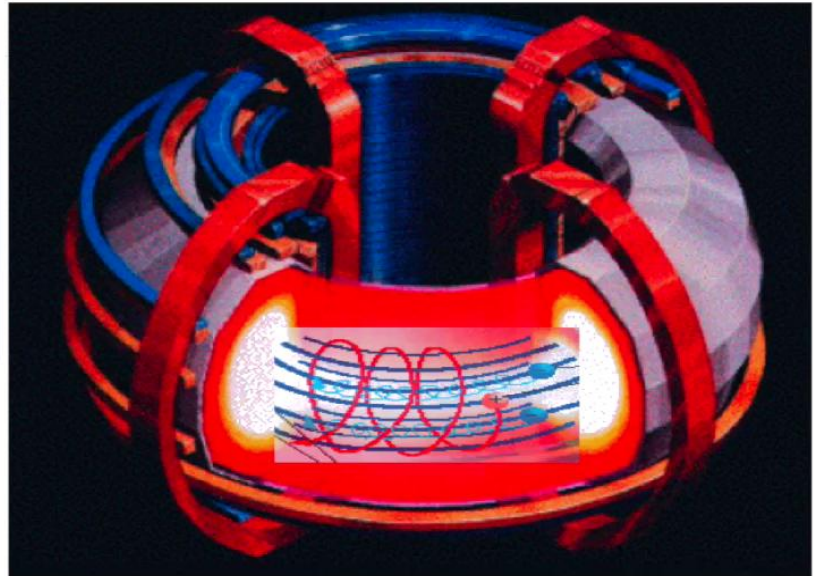
Summary



Confinement du plasma par champs magnétiques



Le Tokamak



Mécanique | 2013

16

Pourquoi est-ce qu'on n'exploite pas encore l'énergie de fusion? Il est difficile de faire fonctionner un réacteur à fusion. Il y a différents défis qui sont assez formidables d'un point de vue scientifique et technologique, des défis difficiles, mais des défis sur lesquels on fait, et on a fait des avancées assez impressionnantes. Premier principal problème, est peut-être de garder cet état de la matière sur place dans un volume donné pour suffisamment longtemps. Il y a en général trois façon de faire, la façon la plus simple, celle des étoiles, par exemple, notre soleil, et de confiner le plasma, de le garder ensemble par l'effet de gravitation. Evidemment, on peut se permettre de faire ça si on est une étoile, si on est grand et massif. Sur Terre, on ne peut pas imaginer de faire fonctionner ce confinement gravitationnel. Deuxième possibilité, c'est en effet d'utiliser des petites capsules de carburant que l'on fait exploser répétitivement sur un tout petit volume, en les comprimant, par exemple, par des faisceaux laser. C'est comme des mini-explosions nucléaires, des mini-explosions de bombes H.

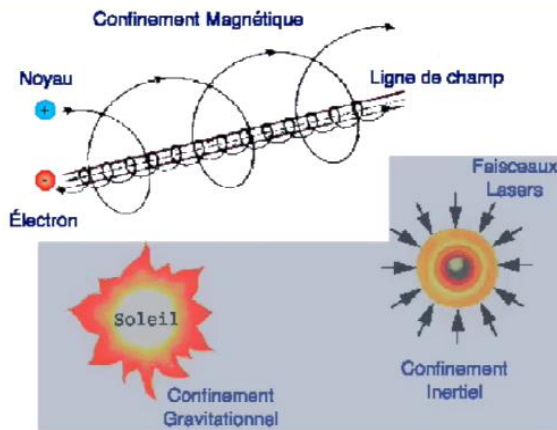
Notes

Summary

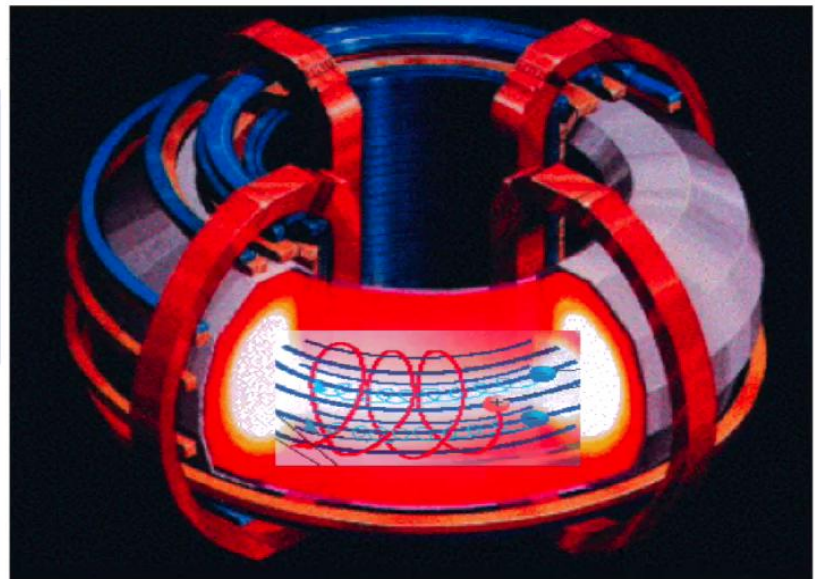


9m 24s

Confinement du plasma par champs magnétiques



Le Tokamak



Mécanique | 2013

16

C'est une méthode que certains pays étudient, c'est une méthode qui est pour nous, pour l'Europe et pour la Suisse, beaucoup moins prometteuse en terme de, arriver à un réacteur qui puisse produire de l'énergie continue et à un prix raisonnable. Moins prometteuse que la troisième voie qui est celle du confinement magnétique. Le plasma est fait par des particules chargées, qui sont donc sujettes à des champs électromagnétiques, et en particulier dans la, dont le mouvement est influencé par des champs magnétiques. Si on est suffisant malin et on dessine une structure magnétique efficace pour piéger les particules, ben voilà qu'on a un plasma qui pourrait être gardé sur place assez longtemps pour qu'il puisse donner lieu à un réacteur de fusion. Le concept, pour l'instant, le plus prometteur, c'est celui du Tokamak donc, c'est une façon de créer des champs magnétiques par des bobines externes combinées avec un courant qui circule dans le plasma lui-même, un concept développé en Russie dans les années 50, et qui nous a permis de faire des progrès assez extraordinaire dans le domaine de la performance du plasma pour la fusion. Donc nous on étudie essentiellement ce confinement magnétique.

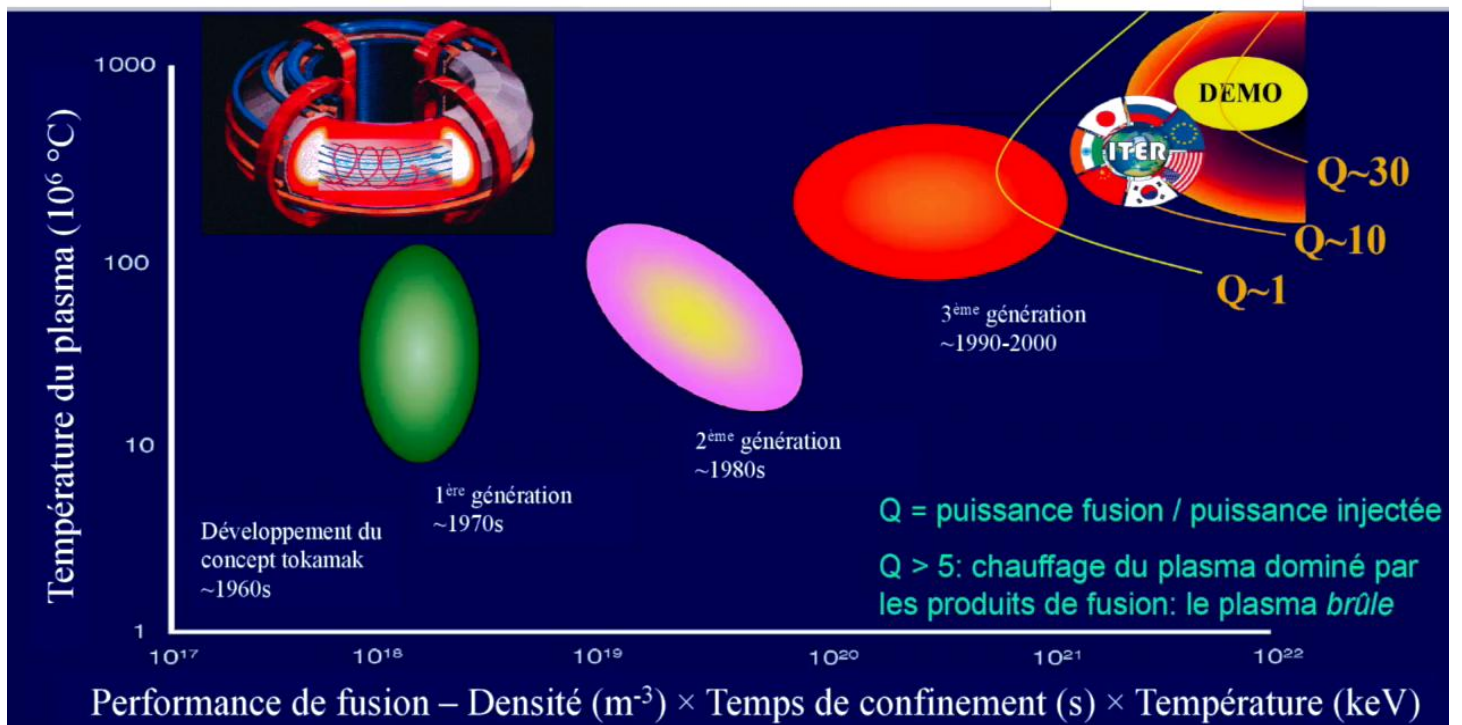
Notes

Summary



10m 38s

Progrès en fusion magnétique



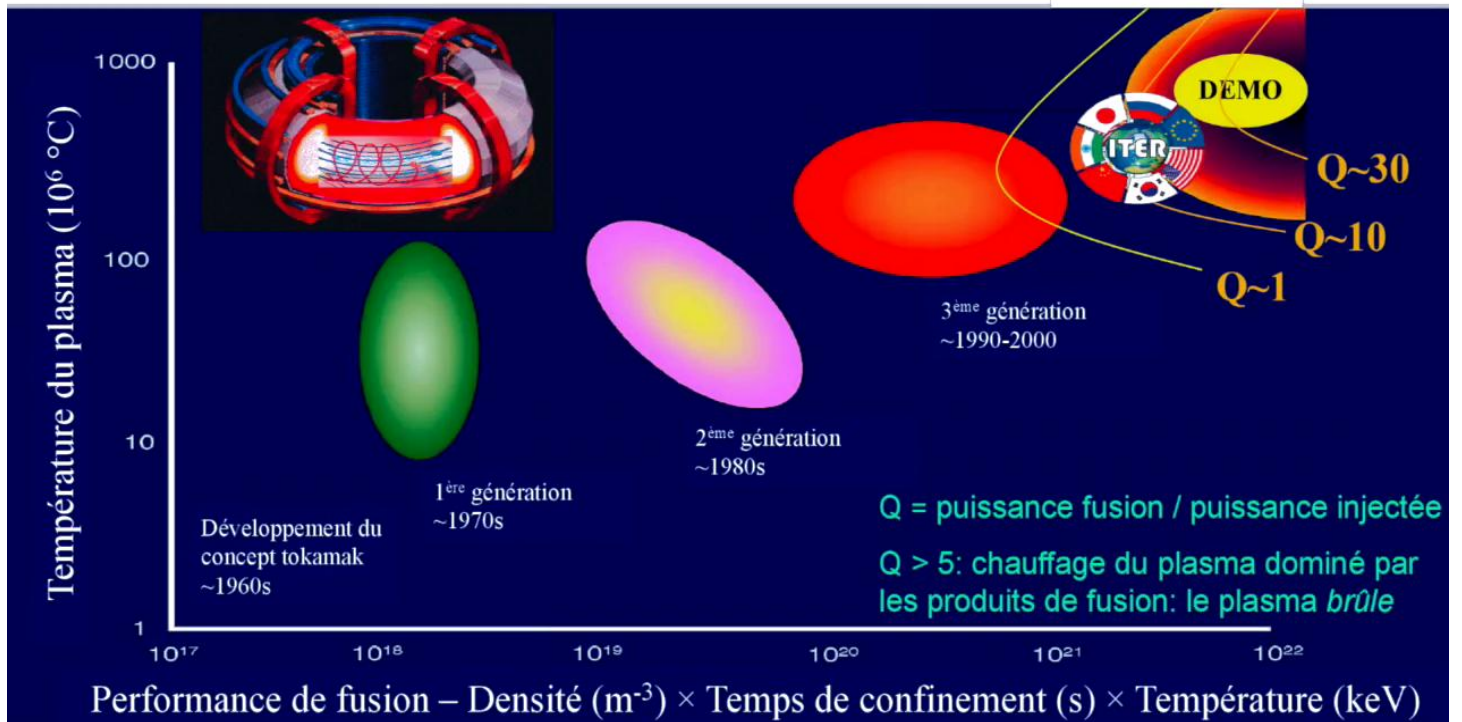
Voilà une image qui nous résume visuellement le progrès qu'on a fait en fusion magnétique en se basant sur le concept de Tokamak pour confiner le plasma. Le progrès est représenté par un diagramme dans lequel on illustre la température du plasma, en millions de degrés, en fonction de la performance de fusion qui est un produit de trois quantités : la densité de plasma, de combien de plasma on arrive à piéger, le temps de confinement, c'est pour combien de temps on arrive à le piéger et la température à laquelle on arrive à le piéger, température, évidemment qui est importante parce que, elle est nécessaire, ou des valeurs élevées sont nécessaires pour donner lieu au réaction de fusion. On voit ici, à partir du développement du concept des années 60, on a fait des grandes percées pour différentes générations d'expériences, jusqu'à la troisième génération, qui est celle qui s'est plus ou moins arrêtée à la fin du siècle passé et qui a démontré qu'on pouvait avoir un gain de fusion presque de l'ordre de l'unité, un gain de fusion, c'est-à-dire une, un rapport entre la puissance produite par réaction fusion et la puissance que l'on injecte de l'extérieur.

Notes

Summary



Progrès en fusion magnétique



Evidemment, ça c'est un point nécessaire, donc d'arriver à avoir un gain plus grand que 1, mais pas suffisant, il faudrait avoir un gain bien plus grand que 1, de l'ordre de plutôt de, au moins 30 pour avoir un réacteur qui donne de l'énergie qui soit vendable de façon commerciale. Quand on a un gain de fusion qui approche 5, la valeur de 5, on a un plasma qui est dominé dans son chauffage par les produits des réactions de fusion elles-mêmes. On dit que le plasma brûle. Si le plasma brûle, ça veut dire que de l'extérieur, on a besoin d'injecter de moins en moins de puissance et donc la production d'énergie devient de plus en plus efficace par le réacteur.

Notes

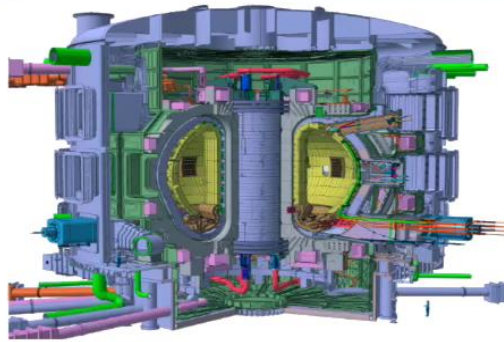
Summary



Le futur : ITER et DEMO

• ITER

- Preuve de la faisabilité scientifique et technologique de la fusion
- $Q = 10$: premier plasma qui *brûle*
- $P_{\text{fusion}} = 500\text{MW}$ pour $\sim 500\text{s}$
- En construction



Le défi auquel on fait face aujourd'hui est exactement de produire le premier plasma qui brûle. C'est un défi fantastique, c'est un défi pour lequel pratiquement toute notre aide s'est mise ensemble, s'est mise ensemble pour construire le projet ITER. Donc tous les pays majeurs au monde se sont mis ensemble et construisent, en ce moment, au Sud de la France, ce gigantesque réacteur de fusion qui prouvera pour la première fois sans, pour la première fois, et de façon sûre, la faisabilité scientifique et technologique de la fusion, ainsi que sa sûreté. Ici, on voit l'image d'ITER, c'est une image d'ordinateur avec un petit bonhomme représenté à côté de la machine qui nous illustre la taille de la machine et nous souligne le fait que c'est un projet pour lequel chaque composant, chaque élément est au point, à la pointe de la technologie et de la science que l'on peut arborer au jour d'aujourd'hui. L'ITER promet avoir un gain à peu près de 10 donc un plasma qui vraiment brûlera, ça sera la première fois. Et il ne brûlera pas pour une fraction de seconde mais brûlera pour quelques minutes pour une puissance de fusion d'un demi-gigawatt, donc des quantités de puissance comparables avec celles d'un réacteur commercial déjà. L'ITER est en construction en ce moment mais l'ITER ne représentera pas la dernière étape de nos recherches.

Notes

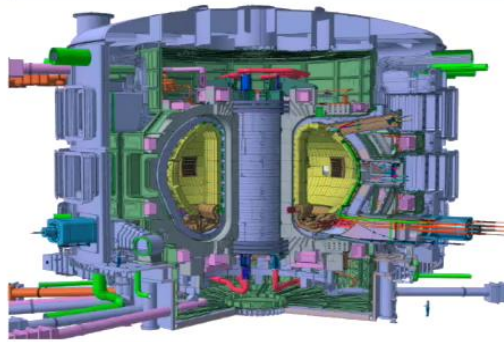
Summary



Le futur : ITER et DEMO

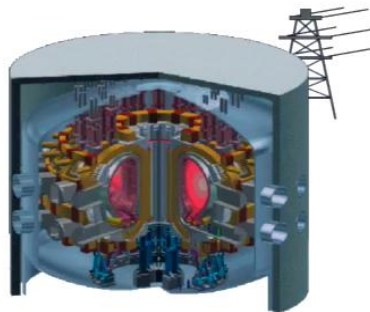
• ITER

- Preuve de la faisabilité scientifique et technologique de la fusion
- $Q = 10$: premier plasma qui *brûle*
- $P_{\text{fusion}} = 500\text{MW}$ pour $\sim 500\text{s}$
- En construction



• DEMO

- Dernier pas avant la commercialisation de l'énergie de fusion
- $Q = 30$; $P_{\text{fusion}} \sim 3\text{GW}$; $P_{\text{électrique}} \sim 1\text{GW}$
- Bases scientifiques et technologiques en cours d'établissement – *contribution importante de la Suisse (CRPP-EPFL)*



Mécanique | 2013 19

Au-delà d'ITER, il faudra encore une étape, la dernière, avant de pouvoir commercialiser la fusion. C'est ce qu'on appelle l'étape DEMO. L'étape DEMO doit produire un gain de fusion suffisamment élevé pour qu'on puisse imaginer de produire de façon commerciale la fusion, de l'énergie de fusion et cela correspond à un facteur Q , donc ce gain, de l'ordre de 30, une puissance de fusion de l'ordre de 3 gigawatts pour avoir une puissance électrique de l'ordre de 1 gigawatt. Donc là, on commence à jouer dans la cours des grands, dans le sens que 1 gigawatt électrique c'est de l'ordre de grandeur, du même ordre de grandeur que, un réacteur industriel pour la production d'énergie au jour d'aujourd'hui. Les bases scientifiques et technologiques de DEMO sont en cours d'établissement. Il y a des recherches à travers toute la planète et je dois souligner que, ici, on a une contribution importante qui vient de la Suisse, en particulier du Centre de Recherche en Physique des Plasmas de l'EPFL.

Notes

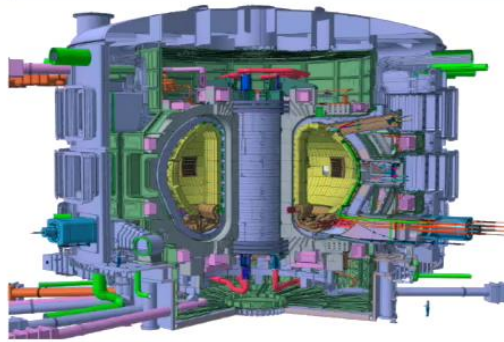
Summary



Le futur : ITER et DEMO

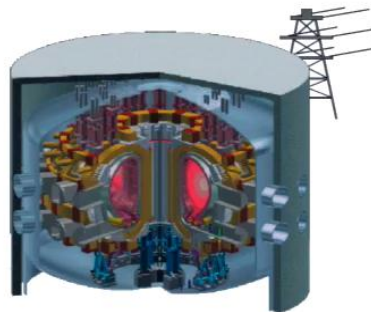
• ITER

- Preuve de la faisabilité scientifique et technologique de la fusion
- $Q = 10$: premier plasma qui *brûle*
- $P_{\text{fusion}} = 500\text{MW}$ pour $\sim 500\text{s}$
- En construction



• DEMO

- Dernier pas avant la commercialisation de l'énergie de fusion
- $Q = 30$; $P_{\text{fusion}} \sim 3\text{GW}$; $P_{\text{électrique}} \sim 1\text{GW}$
- Bases scientifiques et technologiques en cours d'établissement – *contribution importante de la Suisse (CRPP-EPFL)*



Mécanique | 2013 19

Avec DEMO, je pense vers la moitié du siècle, ou même avant, selon l'urgence qu'on, qui sera perçue au, au niveau politique, la science pourra enfin fournir une solution sûre, durable et sans conséquences pour le climat au problème de l'énergie, une solution qui sera basée et qui est basée sur l'équation la plus populaire au monde, peut-être, qui est $E = mc^2$, c'est ce nous qui quantifie l'équivalence entre masse et énergie.

Notes

Summary



16m 16s