

À propos d'ITER

Le projet ITER est un projet international destiné à montrer la faisabilité scientifique et technique de la fusion thermonucléaire contrôlée. Le 28 juin 2005, les pays engagés dans le projet ITER, c'est-à-dire les 25 pays de l'Union Européenne, le Japon, la Russie, les États-Unis, la Chine et la Corée du Sud, ont décidé officiellement de construire le réacteur expérimental ITER en France, à Cadarache (Bouches-du-Rhône). L'Inde a rejoint le projet en décembre 2005. La Suisse et le Brésil pourraient faire de même dans l'avenir. La durée de la construction du réacteur sera de 10 ans. L'exploitation du réacteur proprement dit devrait s'étaler sur environ 20 ans. Le coût total du projet est estimé à 10 milliards d'euros. Le but de ce problème est d'examiner, de manière très simplifiée, certains aspects de la fusion thermonucléaire contrôlée. *Les différentes parties du problème sont indépendantes et peuvent être traitées dans un ordre quelconque.* Les données suivantes pourront être utiles :

Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$;

Constante d'Avogadro : $N_A = 6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$;

Charge élémentaire : $e = 1,6.10^{-19} \text{ C}$;

Permittivité du vide : $\epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$;

Perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$;

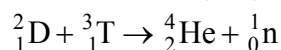
Données à 298 K	CH _{4(g)}	O _{2(g)}	H _{2O(g)}	CO _{2(g)}
Enthalpie standard de formation $\Delta_f H^o$ (en kJ.mol ⁻¹)	-74,81	0	-241,8	-393,5
Capacités thermiques molaires à pression constante, supposées indépendantes de T , C_{pm}^o (en J.K ⁻¹ .mol ⁻¹)	35,3	29,4	33,6	37,1

	C	O	H
Masses molaires (en g.mol ⁻¹)	12	16	1

On utilise la notation habituelle ${}^A_Z X$ où Z est le numéro atomique et A le nombre de masse du nucléide X .

1- Principe de la fusion thermonucléaire

La fusion nucléaire est un processus selon lequel deux noyaux légers donnent par réaction nucléaire un noyau plus lourd avec libération d'énergie. C'est le mécanisme à la base de la production d'énergie dans le Soleil dans lequel des noyaux d'hydrogène ${}^1_1\text{H}$ fusionnent pour donner des noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$. Les réactions de fusion du Soleil ne peuvent pas être reproduites sur Terre. En revanche, il est envisagé de produire de l'énergie grâce à une autre réaction de fusion nucléaire, la réaction deutérium (${}^2_1\text{D}$)- tritium (${}^3_1\text{T}$) dont le bilan s'écrit :



Cette réaction de fusion produit un noyau d'hélium et un neutron.

- 1.1 Donner la composition des noyaux apparaissant dans ce bilan : ${}^2_1\text{D}$, ${}^3_1\text{T}$ et ${}^4_2\text{He}$.
- 1.2 De quel élément le deutérium est-il l'isotope ? Même question pour le tritium.
- 1.3 L'une des difficultés que l'on rencontre pour obtenir une réaction de fusion est due à la répulsion électrostatique entre les deux noyaux positifs de deutérium et de tritium. Pour fusionner, les deux noyaux doivent s'approcher suffisamment près l'un de l'autre, à des distances de l'ordre de $r_0 = 10^{-15}$ m. Considérons une charge ponctuelle, de charge e , immobile en un point O de l'espace. Déterminer le potentiel électrostatique V qu'elle crée en un point M de l'espace situé à la distance $OM = r$. On prendra $V = 0$ à l'infini.
- 1.4 Une autre charge ponctuelle, portant la même charge e , se trouve au point M . Son vecteur vitesse initial est :

$$\vec{v}_0 = -v_0 \vec{u}_r \text{ où } v_0 > 0 \text{ et } \vec{u}_r \text{ est le vecteur unitaire } \frac{\overrightarrow{OM}}{r}.$$

En d'autres termes, sa vitesse initiale est dirigée vers le point O . Cette particule a une masse m . On néglige toute force gravitationnelle. Exprimer l'énergie mécanique de cette particule au point M en fonction de m , r , v_0 et de constantes fondamentales.

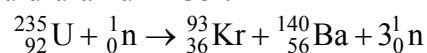
- 1.5 On suppose que la distance r est initialement très grande (« infinie »). Quelle doit être l'énergie cinétique initiale minimale E_{c_0} de la particule en M pour pouvoir se rapprocher de O à une distance inférieure à r_0 ?
- 1.6 On admet qu'on peut définir la température T à partir de l'énergie cinétique initiale E_{c_0} à partir de la relation : $kT = E_{c_0}$ où k est la constante de Boltzmann. Calculer numériquement la température minimale qui permet la réaction de fusion. On donne :

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} ; r_0 = 10^{-15} \text{ m}.$$

- 1.7 En réalité, pour diverses raisons qui sortent du cadre de la physique classique, on peut obtenir la réaction de fusion nucléaire pour des températures nettement moins élevées que l'estimation précédente, de l'ordre de $2 \cdot 10^8$ K. Il est nécessaire que le mélange soit à l'équilibre thermique. À une telle température, la matière est à l'état de plasma, c'est-à-dire de gaz ionisé ; le milieu est donc un mélange de noyaux et d'électrons libres. Pour réaliser la fusion dite thermonucléaire contrôlée, le principe retenu par ITER est celle d'un confinement magnétique du plasma. La densité de particules dans un tel plasma est de l'ordre de $n_p = 10^{20} \text{ m}^{-3}$. Comparer cette valeur avec la densité de particules pour un gaz parfait à une température de $T = 300$ K et une pression de $P = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$.

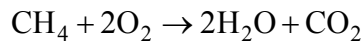
2- Comparaison avec d'autres sources d'énergie

- 2.1 La réaction d'un noyau de deutérium avec un noyau de tritium libère une énergie de 17,6 MeV. On rappelle que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ et que $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$. Quelle énergie peut-on produire avec un mélange de 1 kg comprenant autant de noyaux de deutérium que de noyaux de tritium ?
- 2.2 La production d'énergie dans les centrales nucléaires actuelles est basée sur la fission nucléaire. La fission est un mécanisme inverse de la fusion. Il s'agit de briser un noyau très lourd, en le bombardant de neutrons, pour produire des noyaux plus légers. Le processus libère de l'énergie. On peut, par exemple, avoir le bilan suivant pour la fission d'un noyau d'uranium 235 :



Les produits de fission sont des noyaux instables, radioactifs, ici de krypton et de baryum. Il y a également émission de trois neutrons. Ces neutrons peuvent à leur tour entrer en collision avec un noyau d'uranium 235 et provoquer sa fission. Il se produit alors une réaction en chaîne. Pourquoi doit-on, dans une centrale nucléaire, introduire des matériaux absorbeurs de neutrons pour absorber une partie des neutrons produits ? A-t-on le même type de problème avec la fusion thermonucléaire ?

- 2.3 Vérifier la conservation de la charge au cours de la réaction de fission.
- 2.4 La réaction de fission de l'uranium produit une énergie d'environ 200 MeV par noyau d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$. Quelle énergie pourrait-on produire avec 1 kg d'uranium 235 ?
- 2.5 Comparer la fusion et la fission au niveau de la nocivité des produits de réaction.
- 2.6 Une autre source d'énergie est fournie par les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). On peut obtenir de l'énergie par des réactions chimiques de combustion. Étudions la réaction de combustion du méthane CH_4 , constituant principal du gaz naturel, où tous les constituants sont en phase gazeuse et se comportent comme des gaz parfaits :



Calculer numériquement l'enthalpie standard de réaction à 298 K.

- 2.7 Calculer numériquement la chaleur dégagée par la réaction lorsque 1 kg de méthane a réagi.
- 2.8 Quel est le volume occupé par 1 kg de méthane à une pression $P^o = 1$ bar et une température $T = 298$ K ?
- 2.9 Calculer numériquement l'enthalpie standard de réaction à une température de 2000 K. La différence relative par rapport à sa valeur à 298 K est-elle importante ?
- 2.10 La réaction de combustion du méthane produit du dioxyde de carbone. Connaissez-vous un inconvénient qui peut en résulter ?

3- Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme

Pour obtenir la réaction de fusion thermonucléaire contrôlée deutérium-tritium, le plasma doit être confiné. Étant constitué de particules chargées, il subit l'action d'un champ magnétique. On commence par étudier le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme.

Le référentiel d'étude, supposé galiléen, est muni d'un repère $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$. Le champ magnétique \vec{B} est uniforme, stationnaire et dirigé selon Oz : $\vec{B} = B\vec{u}_z$ où $B > 0$. La particule étudiée, de masse m , porte une charge $q > 0$. On pourra introduire, dans la suite du problème, la fréquence cyclotron $\omega_0 = \frac{qB}{m}$ (qui est en réalité une pulsation). On néglige le poids de la particule.

- 3.1 La particule étudiée se trouve initialement en O avec une vitesse initiale colinéaire à \vec{B} : $\vec{v}_0 = v_0\vec{u}_z$ avec $v_0 > 0$. Déterminer le mouvement de la particule (trajectoire, position, vitesse).
- 3.2 La particule étudiée a maintenant la vitesse initiale :

$$\vec{v}_0 = v_0\vec{u}_y \text{ avec } v_0 > 0.$$

Les composantes de la vitesse \vec{v} de la particule selon Ox , Oy et Oz sont notées respectivement v_x , v_y et v_z . En appliquant la relation fondamentale de la dynamique, détermi-

ner les expressions de $\frac{dv_x}{dt}$, $\frac{dv_y}{dt}$ et $\frac{dv_z}{dt}$ en fonction de v_x , v_y et ω_0 .

3.3 En déduire que v_x et v_y vérifient les équations différentielles :

$$\begin{cases} \frac{d^2 v_x}{dt^2} + \omega_0^2 v_x = 0 \\ \frac{d^2 v_y}{dt^2} + \omega_0^2 v_y = 0 \end{cases}$$

3.4 Résoudre complètement ces équations et trouver les expressions de v_x et v_y en fonction du temps.

3.5 Intégrer les expressions précédentes et déterminer les coordonnées x , y et z de la particule en fonction du temps. On donne la position initiale de la particule :

$$\begin{cases} x_0 = -\frac{v_0}{\omega_0} \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases}$$

3.6 Montrer que la trajectoire de la particule est un cercle contenu dans le plan Oxy dont on précisera le centre et le rayon.

3.7 Faire un schéma de la trajectoire dans le plan Oxy montrant clairement le sens du mouvement de la particule.

3.8 On considère maintenant une particule dont la vitesse initiale est :

$$\vec{v}_0 = \begin{cases} v_x = 0 \\ v_y = v_{\perp} \\ v_z = v_{\parallel} \end{cases}$$

où v_{\perp} et v_{\parallel} sont des grandeurs positives.

Justifier que la trajectoire de la particule est une hélice dont on exprimera le pas h en fonction de v_{\parallel} et ω_0 .

4- Configuration magnétique dans un tokamak

L'étude précédente a montré que, dans un champ magnétique uniforme, les particules s'enroulaient hélicoïdalement autour des lignes de champ magnétique. Le mécanisme de confinement retenu pour ITER est un confinement magnétique dans une structure toroïdale (en forme de tore) appelée tokamak. L'idée générale du tokamak est de confiner les particules chargées du plasma en les guidant par des lignes de champ magnétique fermées. On étudie maintenant les idées générales concernant la configuration magnétique dans un tokamak.

On considère un tore de section circulaire autour duquel est régulièrement enroulé un bobinage à spires jointives. Ce bobinage comporte N spires et est parcouru par un courant permanent d'intensité I_c . L'axe du tore est Oz . Son grand rayon est R et son petit rayon est a .

On se reportera utilement à la figure 1. On se placera en coordonnées cylindriques (r, θ, z) avec des vecteurs unitaires notés respectivement \vec{u}_r , \vec{u}_{θ} et \vec{u}_z .

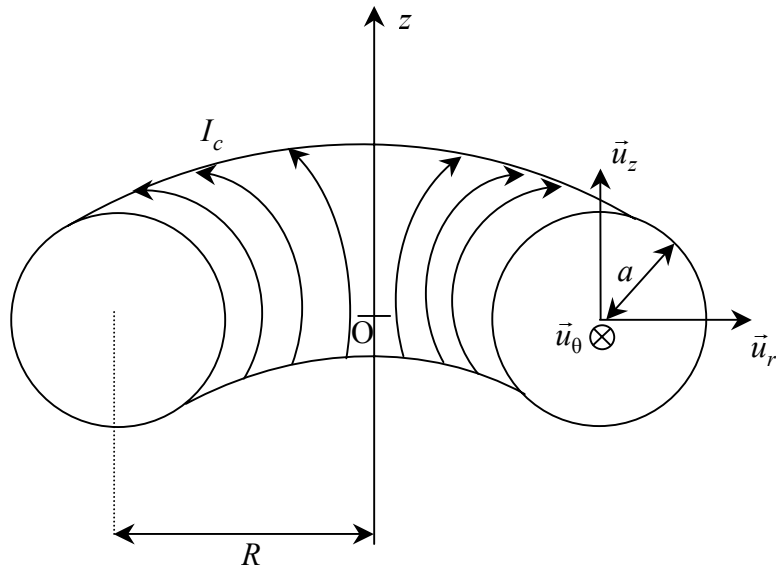


Figure 1

- 4.1 Montrer, par des arguments de symétrie, que le champ magnétique est orthoradial, c'est-à-dire qu'il peut s'écrire :

$$\vec{B}_T = B_T \vec{u}_\theta.$$

Les lignes de champ sont alors des cercles d'axe Oz . Ce champ magnétique est qualifié de *toroïdal*.

- 4.2 En appliquant le théorème d'Ampère sur une courbe bien choisie, montrer que le champ magnétique est nul en dehors du tore.
- 4.3 Déterminer son expression à l'intérieur du tore en fonction de N , I_c , r et de constantes fondamentales.
- 4.4 Application numérique : $R = 6,2$ m ; $N = 2412$; on veut obtenir un champ magnétique au centre du tore (c'est-à-dire pour $r = R$) d'une valeur de $B_T = 5,3$ T. Quelle doit-être la valeur de l'intensité I_c correspondante ? Pour produire ce courant, on utilise un matériau supraconducteur, c'est-à-dire de conductivité électrique infinie à température suffisamment basse (vers 4 K dans le cas d'ITER). Pourquoi faut-il utiliser un supraconducteur et non pas du cuivre ?
- 4.5 Les particules chargées s'enroulent hélicoïdalement autour des lignes de ce champ magnétique toroïdal. Malheureusement, la configuration obtenue est instable à cause d'un phénomène de dérive des particules. Pour corriger ce problème, on crée un autre champ magnétique par induction électromagnétique. Pour étudier le principe de ce dispositif, on considère un solénoïde vertical disposé selon l'axe Oz du tore. Ce solénoïde est parcouru par un courant d'intensité variable $i_0(t)$. Pour simplifier, on admet que ce solénoïde a n spires par unité de longueur, un rayon ℓ ($\ell < R - a$) et que le champ qu'il crée est le même que s'il était infini. On imagine que le plasma est remplacé par une spire conductrice C de même axe Oz que le solénoïde et de rayon R . On se reportera à la figure 2 ci-dessous.

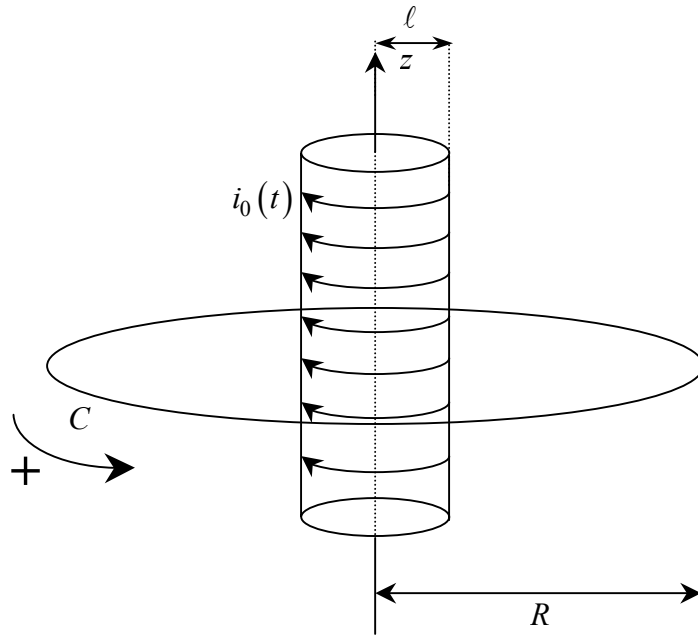


Figure 2

Montrer, par des arguments de symétrie, que le champ magnétique créé par le solénoïde est de la forme (en coordonnées cylindriques) :

$$\vec{B}_0 = B_0(r, t) \vec{u}_z.$$

4.6 Établir, en appliquant le théorème d'Ampère sur un contour bien choisi, que le champ magnétique est uniforme à l'intérieur du solénoïde ainsi qu'à l'extérieur.

4.7 On admet alors que le champ magnétique vaut :

$$\begin{cases} \vec{B}_0(t) = -\mu_0 n i_0(t) \vec{u}_z & \text{si } r < \ell \\ \vec{B}_0 = \vec{0} & \text{si } r > \ell \end{cases}$$

En utilisant la loi de Lenz-Faraday, déterminer la f.é.m. induite dans la spire C par la variation du courant $i_0(t)$ dans le solénoïde.

4.8 La résistance de la spire étant R_e , déterminer l'intensité I_p du courant induit dans la spire C .

4.9 On veut que le courant induit soit stationnaire et circulant dans le sens positif indiqué sur le schéma ci-dessus. Comment doit alors varier l'intensité $i_0(t)$ dans le solénoïde ?

4.10 En déduire que, nécessairement, ce système ne peut pas fonctionner en continu mais par impulsions de durée limitée.

4.11 Dans un tokamak, le solénoïde central induit, selon le principe précédent, un courant toroïdal I_p dans le plasma. Celui-ci crée alors un champ magnétique dit *poloïdal* dans le tore. En supposant que le courant toroïdal I_p circule essentiellement dans l'axe du tore ($r = R$ et $z = 0$) comme s'il y avait encore la spire C précédente, donner l'allure des lignes du champ magnétique poloïdal dans une région proche de C (R est suffisamment grand pour considérer localement que la spire est rectiligne).

4.12 Estimer numériquement l'ordre de grandeur du champ magnétique poloïdal à une distance de la « spire C » égale au petit rayon a du tore si l'intensité I_p vaut 15 MA. On donne $a = 2,0$ m.

- 4.13 En superposant le champ magnétique toroïdal et le champ magnétique poloïdal, expliquer pourquoi les lignes du champ magnétique total prennent la forme d'une hélice qui s'enroule sur un tore dont l'axe est la spire fictive C précédente.
- 4.14 Pourquoi le courant I_p précédent peut-il contribuer au chauffage du plasma ? Sachant que l'intensité I_p est limitée pour éviter l'apparition d'instabilités (on peut la supposer constante, égale à 15 MA) et que la conductivité du plasma varie en fonction de sa température en $T^{3/2}$, justifier que cette méthode de chauffage ne permet pas, à elle seule, d'atteindre la température d'environ 2.10^8 K nécessaire à la réaction de fusion.
- 4.15 On admet qu'on a pu obtenir une situation de confinement magnétique ainsi qu'une température suffisante pour que la réaction de fusion ait lieu. Celle-ci produit des noyaux d'hélium et des neutrons. Pourquoi les noyaux d'hélium restent-ils piégés à l'intérieur du tokamak alors que les neutrons s'échappent et interagissent avec les parois ?

L'énergie des noyaux d'hélium produits peut alors être cédée au plasma, ce qui constitue un apport d'énergie supplémentaire pour le plasma. L'énergie des neutrons, en revanche, doit être récupérée dans un dispositif dont la finalité est de produire de l'électricité.

5- Production d'électricité

Le réacteur expérimental ITER n'a pas pour but la production industrielle d'électricité. Ce devrait être l'objectif du réacteur qui, si tout va bien, sera construit après ITER. Le principe adopté pour convertir en électricité l'énergie dégagée par la fusion thermonucléaire devrait être le même que dans les centrales thermiques ou nucléaires actuelles. L'énergie des neutrons chauffe les parois du tokamak dans lesquelles circule un fluide dit caloporteur. Ce fluide circule dans un circuit dit primaire. Un autre fluide circule dans un circuit secondaire. On supposera ici qu'il s'agit d'eau. Le premier fluide, chauffé sous l'action des neutrons de fusion, cède de la chaleur au second dans un échangeur. On ne s'occupera ici que du circuit secondaire dont le fluide décrit le cycle suivant en écoulement permanent :

- À la sortie de l'échangeur, toute l'eau est à l'état de vapeur à une température T_2 et à une pression P_2 . La vapeur d'eau est surchauffée, c'est-à-dire qu'elle est sèche ;
- La vapeur d'eau pénètre dans une turbine où elle subit une détente adiabatique réversible. La turbine actionne un alternateur qui génère du courant électrique par induction électromagnétique. Au cours de la détente, une fraction égale à 17% de la vapeur d'eau se condense en eau liquide. À la sortie de la turbine, la température est T_1 et la pression P_1 ;
- Le fluide passe ensuite dans un condenseur où la vapeur d'eau restante se liquéfie à pression et température constantes pour obtenir un liquide saturant seul ;
- L'eau liquide passe ensuite dans un compresseur où elle subit une compression adiabatique réversible au cours de laquelle sa température reste quasiment constante. À la sortie du compresseur, la pression vaut P_2 et la température T_1 ;
- L'eau entre ensuite à l'état liquide dans l'échangeur où elle est chauffée à pression constante. Sa température augmente d'abord jusqu'à la température d'ébullition à la pression P_2 . Elle est ensuite totalement vaporisée puis finalement surchauffée jusqu'à la température T_2 .

Données : $T_1 = 303$ K ; $T_2 = 773$ K ; $P_1 = 0,04$ bar ; $P_2 = 40$ bar ; On donne les enthalpies massiques suivantes : pour la vapeur d'eau $h_v(T_2, P_2) = h_{v2} = 3,45.10^6$ J.kg⁻¹ ; $h_v(T_1, P_1) = h_{v1} = 2,55.10^6$ J.kg⁻¹ ; pour l'eau liquide : $h_l(T_1, P_1) = h_{l1} = 2,09.10^5$ J.kg⁻¹ ; $h_l(T_1, P_2) = h_{l2} = 2,13.10^5$ J.kg⁻¹. On néglige tout terme d'énergie cinétique ou potentielle.

- 5.1 Donner l'allure du diagramme de Clapeyron (P, v) de l'eau dans le cas liquide-vapeur. On représentera la courbe de saturation. On indiquera où se trouve la courbe d'ébullition et où se trouve la courbe de rosée. On tracera une isotherme correspondant à une température inférieure à celle du point critique.
- 5.2 Tracer le cycle décrit par l'eau dans le diagramme de Clapeyron (on représentera à nouveau la courbe de saturation).
- 5.3 Calculer le travail massique utile (ou indiqué) w_{u1} reçu par le fluide dans le compresseur.
- 5.4 Calculer la chaleur massique q_1 reçue par le fluide dans l'échangeur.
- 5.5 Calculer le travail massique utile (ou indiqué) w_{u2} fourni par le fluide à l'alternateur.
Comparer w_{u1} et w_{u2} .
- 5.6 Définir et calculer le rendement du cycle.
- 5.7 Quel serait le rendement d'un cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures ? Comparer au rendement réel et commenter.