

Soleil et centrale nucléaire

Comparaison des puissances spécifiques et flux sortants

Note de la rédaction : Gérard Krivine accompagnait l'envoi de l'article ci-dessous d'une lettre adressée à Lucette Bottinelli, dans laquelle il lui rappelait qu'il a eu le plaisir de commencer sa vie de retraité en suivant son cours d'astrophysique de Maîtrise à Orsay. L'extrait ci-dessous de sa lettre nous a procuré un grand plaisir .

"Ces cours et la lecture des Cahiers Clairaut me permettent d'effectuer de temps à autre des animations en milieu scolaire et en particulier de parler du soleil et de sa source d'énergie".

Le soleil et les centrales électronucléaires ont un point commun : leur énergie provient de réactions nucléaires. Certes, ces réactions sont bien différentes : dans le soleil 4 noyaux d'atomes d'hydrogène fusionnent pour former un noyau d'hélium, alors que dans les coeurs des réacteurs nucléaires d'EDF des neutrons provoquent la fission de noyaux d'atomes d'uranium 235. Mais dans les deux cas un peu de matière disparaît en se transformant en énergie.

Ces producteurs d'énergie diffèrent non seulement par leur taille, mais également par leur nature. Le soleil est une sphère toute simple composée d'hydrogène (près de 70%) et d'hélium dont le centre est soumis à une pression de 200 milliards de bars et une température de 15 millions de degrés. Le coeur d'un réacteur nucléaire d'EDF est un ensemble plus complexe avec des assemblages de crayons de combustible (uranium), plongés dans un circuit d'eau qui évacue la chaleur produite, le tout étant installé dans une cuve. La température au centre de ces crayons de combustible est inférieure à 2000°C.

Ceci étant, on se pose la question de savoir qui produit le plus d'énergie par unité de temps : un kg de soleil ou un kg du coeur d'un réacteur nucléaire. En élargissant un peu le problème on compare leurs puissances spécifiques volumiques (kW/m^3) et massiques (kW/kg) ainsi que leurs flux d'énergie sortants. La puissance massique est désignée aussi par taux de production d'énergie.

Données

Elles sont obtenues à partir des documents suivants:

- Cours de l'Université d'Orsay. Laboratoire d'Astronomie.
- Les réacteurs nucléaires à eau ordinaire. Collection CEA Série Synthèses (Airelle).

Certaines sont rappelées ci-dessous.

- Soleil

volume : $1,41 \cdot 10^{27} \text{m}^3$; masse : $2 \cdot 10^{30} \text{kg}$; puissance: $4 \cdot 10^{23} \text{kW}$

durée de vie : 10^{10} ans.

- Coeur d'un réacteur nucléaire EDF

Masse uranium = $1,04 \cdot 10^5 \text{kg}$. Il s'agit d'un mélange d'uranium 238 et 235, ce dernier étant le seul fissile.

Puissance thermique : 3 800 MW ou $3,8 \cdot 10^6$ kW, (compte tenu du rendement, la puissance électrique obtenue est de 1 300 MW).

Durée de vie du combustible: 2,5 ans pour un taux de combustion de 33 000 MW jours/t.

Résultats

On prend en compte la masse totale du soleil et de l'uranium du réacteur nucléaire.

<u>En valeur absolue</u>			
	Unité	Soleil	Réacteur nucléaire
Puissance volumique	kW/m ³	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^5$
Puissance massique	kW/kg	$2 \cdot 10^{-7}$	37
Flux sortant	kW/cm ²	5,6	0,057

<u>En valeur relative</u>	
Rapport	Réacteur/Soleil
Puissances volumiques	$4 \cdot 10^8$
Puissances massiques	$2 \cdot 10^8$
Flux sortants	0,01

La puissance massique ainsi que volumique du soleil est extrêmement faible par rapport à celle d'un réacteur nucléaire. Par contre le flux sortant d'énergie est plus élevé. Ces résultats sont-ils vraiment surprenants?

COMMENTAIRE

Flux sortants

Le flux sortant du soleil est 100 fois supérieur à celui qui sort des éléments combustible du réacteur nucléaire. Le soleil évacue son énergie par le rayonnement de sa surface à une température T de 5 500°C, le flux est proportionnel à T^4 (loi de Stefan).

Les crayons de combustible d'un réacteur nucléaire sont enfermés dans des gaines métalliques dont la surface externe a une température de 345°C. La chaleur produite est transférée par convection à de l'eau dont la température moyenne est de 320°C. Le flux est approximativement égal au produit de cet écart de température par le coefficient d'échange.

Les mécanismes de transfert sont différents et le résultat pas évident. Toutefois on remarque que la température de la surface du soleil est élevée alors que l'écart de température entre l'eau de refroidissement et la surface des gaines de combustible du réacteur nucléaire est faible. Le résultat sur les flux n'est donc pas trop surprenant.

Puissances volumiques et massiques

On peut être surpris de trouver un rapport des puissances volumiques du même ordre de grandeur que celui des puissances massiques, car le soleil est un gaz chaud et le combustible du réacteur nucléaire un solide. Mais les fortes pressions qui règnent dans le soleil font que sa masse volu-

mique moyenne de $1,4 \text{ g/cm}^3$ est celle d'un solide.

Puissances massiques et durée de vie

Le combustible du soleil reste en place pendant toute sa vie à l'état stable soit pendant environ 10 milliards d'années. Celui d'un réacteur nucléaire est remplacé tous les 3 ans ce qui correspond à environ 2,5 années de fonctionnement à pleine charge. Le rapport des durées de vie est donc de 4 milliards. Est-il compatible avec les puissances massiques trouvées?

La puissance massique du soleil est 200 millions de fois inférieure à celle de l'uranium du réacteur nucléaire. On pourrait en déduire que sa durée de vie est 200 millions de fois supérieure à celle du combustible du réacteur nucléaire. Ce serait vrai si tout le soleil et tout l'uranium du réacteur nucléaire étaient combustibles, si tout ce qui est combustible était utilisé et si les réactions nucléaires de fission et de fusion produisaient la même énergie par unité de masse du combustible consommé. Il faut donc commencer par calculer la puissance massique rapportée au combustible réellement consommé.

Le soleil est composé de moins de 70% d'hydrogène qui est son seul combustible pendant sa vie à l'état stable, le reste étant de l'hélium. En outre les réactions nucléaires n'ont lieu que dans un volume dont le rayon est le tiers du rayon du soleil, la pression et surtout la température étant insuffisantes à une distance supérieure. Cela revient à dire qu'une bonne partie du combustible ne sera pas utilisée. On admet que seule une masse d'hydrogène égale à 10% de la masse du soleil sera consommée. La puissance par kg de combustible consommé est donc égale à 10 fois celle par kg de soleil, soit $2 \cdot 10^{-6} \text{ kW}$.

L'uranium des centrales nucléaires est un mélange d'uranium 238 et 235, ce dernier est le seul combustible et ne représente que 3,2% du total. On néglige le fait qu'il reste de l'uranium 235 dans les déchets et que par contre du plutonium s'est formé et produit de l'énergie. La puissance massique de l'uranium 235 du réacteur est donc égale à $37/0,032=1160 \text{ kW/kg}$.

Le rapport des puissances massiques réacteur nucléaire/soleil rapportées aux combustibles participant à la combustion nucléaire devient égal à $1160/2 \cdot 10^6 = 5,8 \cdot 10^8$. Le rapport des durées de vie soleil/combustible du réacteur nucléaire lui serait égal si chaque gramme de combustible (hydrogène ou uranium 235) produisait la même énergie.

Or l'énergie libérée par la transformation de 4 noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium est de 26,7 MeV, celle obtenue par la fission d'un noyau d'uranium est de 202 MeV. Compte tenu du rapport des masses de ces noyaux ($235/4$), le rapport des énergies par gramme de combustible (hydrogène/uranium) est de $26,7/202 \times 235/4 = 7,8$. On en déduit que le rapport des durées de vie soleil/charge d'uranium réacteur nucléaire est de $7,8 \cdot 5,8 \cdot 10^8 = 4,5 \cdot 10^9$ ce qui est pratiquement la valeur précisée de $4 \cdot 10^9$.

Comparaison des puissances massiques

Rapportée à la totalité de la masse ou aux seuls combustibles nucléaires utilisés la puissance massique du soleil est très faible par rapport à celle du combustible d'un réacteur nucléaire alors que la combustion d'un gramme d'hydrogène délivre près de 8 fois plus d'énergie que celle d'un gramme d'uranium 235. Pourquoi? On ne peut qu'énoncer quelques remarques qualitatives.

- Soleil

Une réaction de fusion nucléaire ne peut se produire que pour des températures supérieures à 10 millions de degrés. Le taux de production d'énergie (puissance massique) augmente beaucoup avec la température, particulièrement en présence de carbone qui joue le rôle de catalyseur. C'est ce qui permettra peut-être dans l'avenir de produire industriellement de l'énergie électrique à partir de la fusion de l'hydrogène. Or le soleil avec une température de seulement 15 millions de degrés au centre et qui décroît quand on s'en éloigne a un taux de production d'énergie très bas.

- Réacteur nucléaire

On cherche à limiter son volume, donc on l'optimise pour obtenir un taux élevé de production d'énergie compatible avec la tenue du combustible et des gaines et l'évacuation de la chaleur produite. C'est ainsi que l'eau de refroidissement sert aussi de modérateur pour ralentir les neutrons provoquant la fission des noyaux d'uranium 235 de façon à augmenter leur probabilité d'atteindre leur cible.

Conclusion

Un kg d'uranium enrichi introduit dans un réacteur de centrale nucléaire produit pendant le même temps 200 millions de fois plus d'énergie qu'un kg de soleil. Cela s'explique essentiellement par le fait que cet uranium est consommé en deux ans et demi et qu'il faut le remplacer, alors que le soleil vit sur ses réserves depuis près de 5 milliards d'années et n'est qu'au milieu de son existence.

Il serait intéressant de reprendre ce calcul lorsqu'on utilisera la fusion de l'hydrogène pour produire de l'électricité. On pourrait alors comparer de façon plus exacte le soleil naturel et le soleil miniature créé par l'homme. Peut-être suffira-t-il d'attendre la fin du siècle prochain?

Gérard Krivine

LE RAYONNEMENT DU CLEA

Le saviez-vous ? Les hors série n° 1 (Ecole élémentaire), 2 (la Lune au Collège) et 4 (Astronomie en 4ème) sont disponibles en anglais ainsi que les séries de diapositives D2, D3, D5 et D7, les trois transparents... Merci à Jacques Vialle, bien sûr !

Les mêmes séries de diapositives , D2, D3, D5 et D7 sont aussi disponibles en espagnol. Merci à Josette Berthomieu ! Enfin, le hors série n°1 est diffusé en Pologne, en polonais.