

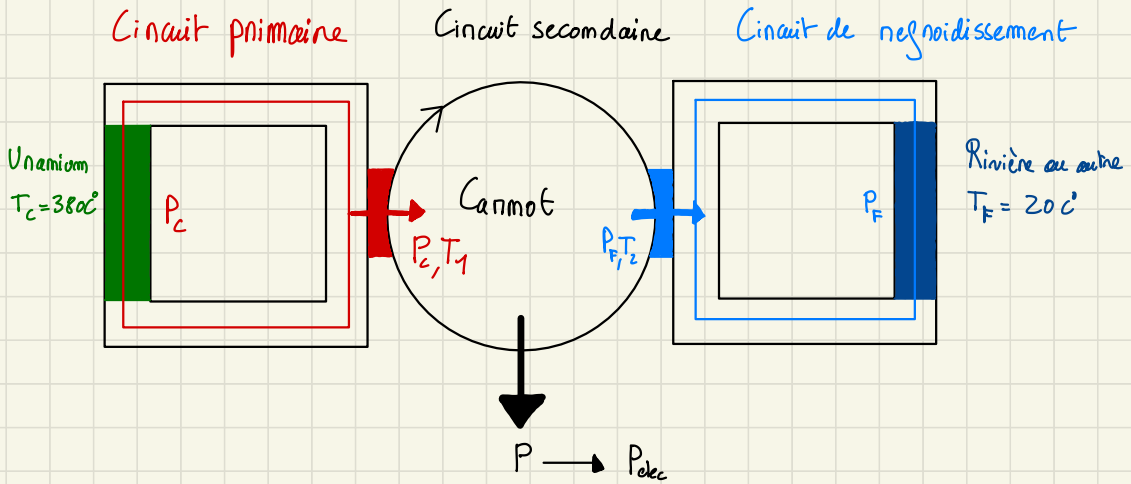
LP27: production d'énergie électrique
décarbonée



L'objectif de cette leçon est de donner
un aperçu du fonctionnement d'une centrale nucléaire,
principale source d'énergie électrique décarbonée
en France. D'autres types de production peuvent être
cités comme les cellules photovoltaïques, l'éolien
ou encore le domaine hydroélectrique.

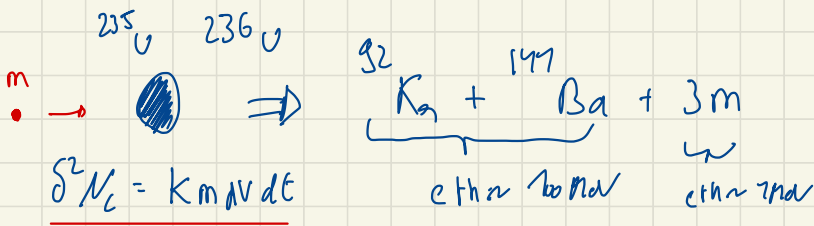
On s'intéressera ici, à l'aide d'outils abordés
en classes préparatoires (spé) et L1/L2, à
la stabilité du réacteur (1^{ère} partie) et aux
transferts thermiques dans la centrale (2nd
partie).

On commence par décrire le fonctionnement
de la centrale : machine à vapeur (circuit secondaire)
source chaude = circuit primaire
source froide = circuit de refroidissement



1. Stabilité du réacteur

1.1 Réaction en chaîne



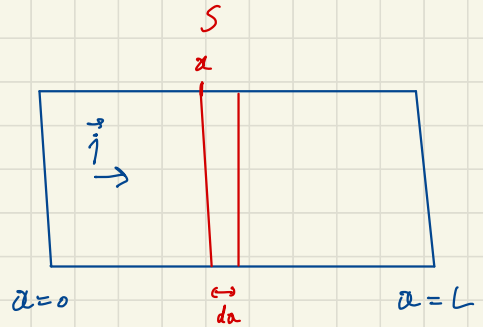
L'énergie est principalement récupérée par le bureau. on maintient k constant i.e. $k = \frac{3-1}{6}$
 en maintenant la con' en ${}^{235}\text{U}$ etc (β dépend de $c_{0.55}$)
 ~ problème de l'enrichissement : $m + {}^{238}\text{U} = {}^{239}\text{U}$

Qualitativement: réaction en chaîne, comment assurer la stabilité du réacteur ?

Il faut d'abord un modèle du milieu dans lequel a lieu la réaction nucléaire.

2.2 Modèle

La donnée structurelle du problème est la concentration en neutrons notée n : c'est elle qui régit la réaction nucléaire.



on par exemple donne accès à la puissance volumique dissipée. On cherche donc à établir l'expression $n(x,t)$ dans la configuration ci-dessus.

Les neutrons diffusent dans l'eau qui circule dans le tube selon la loi de Fick:

Loi de Fick: $\vec{j} = -D \vec{\nabla} n$. On considère S : système

ouvert compris entre x et $x+dx$

$$: d^2N = n(x,t+dt) S dx - n(x,t) S dx$$

$$\boxed{d^2N = \frac{\partial n}{\partial t} S dx dt} : \text{variation du nb de neutrons dans S entre } t \text{ et } t+dt$$

On cherche maintenant le nb de neutrons entrants/sortants:

$$\delta^v N_c = S j(x, t) dt - S j(x+dx, t) dt + \delta K_c$$

$$= -\frac{\partial j}{\partial x} + K_m$$

et donc

$$\boxed{\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial x} = K_m} \quad (*)$$

eq^e de cons^o avec terme de source:

$$\dot{m} + \vec{v} \cdot \vec{j} = a$$

et $\vec{j} = -D \vec{\nabla} m$ donc $\frac{\partial m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + K_m$

Solutions stationnaires ? $m_s(x) = m_0 \sin(\pi x/L)$ ($m < 0$ impossible)

Peut-on atteindre ces solutions stationnaires ?

$$m(x, t) = m_s(x) f(t)$$

Dans (*) on obtient: $\int \left(\pi^2 \frac{D}{L^2} - K \right) f = 0$
 $D_S = \frac{KL^2}{\pi^2}$

état stationnaire $\Leftrightarrow D = D_S = \frac{KL^2}{\pi^2}$

si $D > D_S$: $f \rightarrow 0$

si $D < D_S$: $f \rightarrow \infty$

À la départ $D < D_s$, $f \rightarrow \infty$: la réaction symbolle

l'eau cotom modérateur. si $T \uparrow$, $D \uparrow$ or D dépasse D_s .

La modulation permet elle d'atteindre un eq stable ?

On peut étudier la dépendance de D avec $\bar{m}$ le mb moyen des neutrons par analyse dim.

$D = \rho^* v^*$ on si $m \uparrow$, $T \uparrow$ donc v^* et ρ^* augmentent
 ρ^* : libre parcours moyen des neutrons. $\rightarrow D$ augmente avec T

$$D = D_s (1 + \alpha (\bar{m}(t) - \bar{m}_s)) \quad \alpha > 0$$

forme matricielle: si $\bar{m} = \bar{m}_s$, $D = D_s$ car $f = 1$ etc

et on a bien si $\bar{m}(t) \uparrow$, $D \uparrow$ car $T \uparrow$. (car $\alpha > 0$)

On peut utiliser cette expression dans (*):

$$\text{Finalement (*) donne } \dot{f} + K \alpha \bar{m}_s f(t) (f(t) - 1) = 0$$

$f=0$: réacteur éteint : instable

$f=1$: régime stationnaire : stable

role essentiel du modérateur pour la stabilité de la centrale.

au départ $\bar{m}(t) = 0$ donc $D < D_S$: on a une

1 neutron : β diverge | $\beta = 0$ solution instable)

et lorsque β augmente suffisamment, $D = D_S$ et alors on se stabilise sur la solution $\beta = 1$ (solution stable). On cherche maintenant à comprendre comment exploiter cette énergie.

2. Optimisation de la puissance

On s'intéresse ici aux transferts thermiques dans la centrale.

Cette partie peut être traitée qualitativement pour avoir le temps d'aborder l'alternateur.

Concrètement on montre que pour maximiser la P sortie du générateur :

* On veut minimiser T_1 afin de maximiser P_C

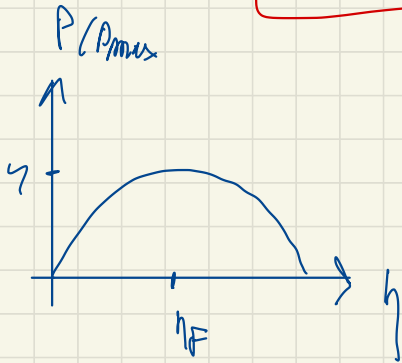
* On veut maximiser T_1 afin de maximiser η (ndtr de Carnot)

On $P_{\text{mec}} = \eta \cdot P_C$: on montre qu'il existe une température de la source chaude pour laquelle on maximise la puissance en sortie.

On va en particulier montrer que P est maximum de pour une valeur de rendement de Carnot (donc de choix de T_1 et T_2) de sorte que $\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_F}{T_C}} = \eta_F$

C'est à dire

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{T_F}{T_C}}$$



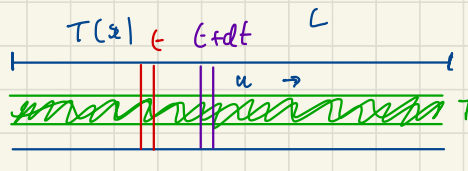
Calculs ci dessous.

La valeur de rendement η_F calculée avec les valeurs de wikipedia ($T_C = 360^\circ\text{C}$ et $T_F = 20^\circ\text{C}$) donne la valeur du rendement de Carnot des centrale françaises (environ de 30%)

$$\left. \begin{array}{l} \Delta S = 0 \\ \Delta U = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{P_c}{T_1} + \frac{P_j}{T_2} = 0 \quad \text{et donc } \boxed{P = -\eta P_c}$$

$$P + P_c + P_g = 0 \quad \text{avec } \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

2.2 Echange thermique primaire-secondaire



$$\delta Q_c = h(T_c - T(x)) dS dt = h(T_c - T(x)) 2\pi r_1 dx dt$$

$$d^2U = \mu_c T (R_2^2 - R_1^2) dx \, ce \cdot |T(x+u dt) - T(x)|$$

$$= \mu_c T (R_2^2 - R_1^2) ce u \frac{dT}{dx} dx dt$$

$$\delta W_p = 0, \quad dE_c = 0 \quad \text{donc}$$

$$d^2U = \delta^2 Q_c \Rightarrow \frac{\mu_c (R_2^2 - R_1^2) ce u}{2\pi r_1} \frac{dT}{dx} + T(x) = T_c$$

$$\delta \frac{dT}{dx} + T(x) = T_c$$

$$\text{donc } T(x) = T_c + (T_1 - T_c) e^{-x/\delta}$$

$$\text{or } P_c = \int_0^L dP_c = \int_0^L h \cdot 2\pi r_1 dx (T_c - T(x))$$

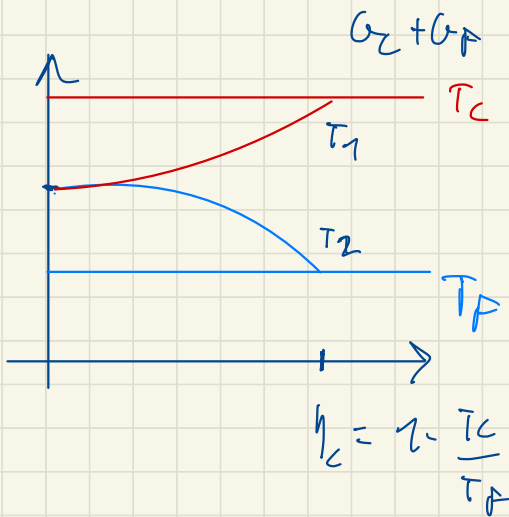
$$P_c = 2\pi r_1 h \delta (1 - e^{-L/\delta}) (T_c - T_1) = G_c (T_c - T_1)$$

$$P_g = G_g (T_g - T_c) \quad \eta = 1 - \frac{P_F}{P_C} = \frac{G_F (T_F - T_c)}{G_C (T_c - T_1)}$$

$$\text{et } T_2 = (1 - \eta) T_1$$

$$\text{donc } T_1(\eta) = \frac{(1 - \eta) G_C T_c + G_F T_F}{(1 - \eta) (G_C + G_F)}$$

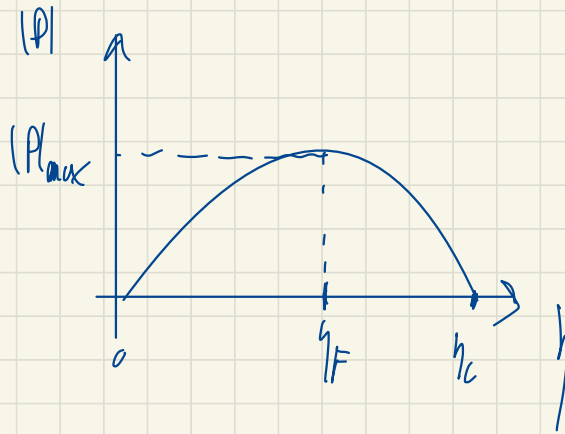
$$T_2(\eta) = \frac{(1 - \eta) G_C T_c + G_F T_F}{G_C + G_F}$$



$$|P| = -\eta P_C = \frac{\eta G_C G_F ((1 - \eta) T_c - T_F)}{(1 - \eta) (G_C + G_F)}$$

G_C ou $G_F = 0$: $|P| = 0$: machine monotherme
 $\eta = \eta_c$

$$\left. \frac{d|P|}{d\eta} \right|_{\eta=\eta_P} = 0 \Rightarrow \boxed{\eta_P = \sqrt{\frac{T_F}{T_C}}}$$



$$T_C = 380^\circ \text{C} \quad T_F = 70^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 290^\circ \text{C} \quad T_2 = 100^\circ \text{C}$$

$$\eta_P = 33\% , \quad \eta_C = 35\% , \quad \eta = 30\%$$

On cherche à maximiser la puissance extraite plutôt que le rendement car le combustible est peu cher comparé au coût de construction de la centrale (contrairement au charbon par exemple)

Alternateur (machine asynchrone) en III ?

- Où se fait la production d'uranium ? Coût en carbone ? Elle est carbonée effectivement. C'est cependant très faible devant les productions d'électricité
- Chiffres de production en France ? Nucléaire 70 % de la production nucléaire en France.
- Nucléaire énergie non renouvelable ? Que faire des déchets combustibles : on enterre de plus en plus profondément en fonction de la toxicité. On essaie aussi de valoriser les déchets en les réutilisant pour faire d'autres réactions : centrales Moxa avec du plutonium.
- Différence entre uranium et plutonium dans la manière de fonctionner ? Ici on doit ralentir les neutrons sont modérés (neutrons thermiques), ils sont ralentis. Alors que pour le plutonium, on a des centrales à neutrons rapides.
- d'où vient l'uranium 235 puisque c'est pas celui qui est majoritaire naturellement ? *phase d'enrichissement, centrifugeuse*
- Pour les déchets, idée d'un ordre de vie ? En fonction du taux de radioactivité ça change.
- l'eau joue le rôle de modérateur et caloporteur, c'est toujours le cas ? *pour le rôle du modérateur : boîte graphite, on veut jouer sur le coefficient de diffusion, si la masse du fluide est proche de celle du neutron. autres caloporteurs : sodium, sels fondus (augmente la température sans bouger trop la pression)*
- quelles sont les hypothèses pour utiliser la loi de Fick ? Pourquoi le flux thermique doit-il être proportionnel au gradient de concentration ? *Approche de diffusion pour le voir avec un gaz parfait, donc l'hypothèse c'est pas d'interaction*
- Pour calculer le nombre de neutrons créés, on dit que c'est K_n , pourquoi ? On peut faire un bilan pour comprendre le taux de création. Le temps T pour que les trois neutrons créés participent par collision au reste : un bilan donne une expression pour K . On remarque que l'on suppose que tous les neutrons réagissent avec de l'uranium 235 alors qu'ils peuvent aussi former du 239 avec une partie de l'uranium 238 qui est dans le barreau initialement (on joue comme ça sur la valeur de K avec l'enrichissement que l'on peut moduler). On suppose aussi qu'on a une cinétique d'ordre 1...

- L'eau est un fluide caloporteur. Donc pourquoi il n'y a pas de terme d'advection dans l'équation écrite au tableau. Il faut en fait comparer les flux advectifs et de diffusion : on compare la vitesse vis à vis de D/L .
- Pourquoi avoir considéré que n est nul aux bords ? Peut-être une différence d'impédance entre le barreau et l'air ?
- une seule solution physique. Pourquoi n_S ne peut s'annuler ? Quand on impose les concentrations aux bords, effectivement ça marche, par contre c'est difficile de justifier su
- La solution $\epsilon = 0$ est instable. Que se passe-t-il quand on veut arrêter la centrale ? On la laisse s'auto-entretenir sans rajouter de combustible. On peut aussi faire
- dépendance de D ? On le fait dépendre de la moyenne de n parce qu'on est
- est-ce que c'est légitime de considérer que la température dans le barreau est uniforme ?
- Il faut fixer la température ? C'est un peu curieux dit comme ça. On la veut la plus grosse possible mais on ne peut avoir une température trop importante au contact du barreau donc on choisit un bon compromis cible.
- Machine thermique, qu'est-ce que le rendement de carnot ? c'est le rendement maximal atteignable avec une machine thermique ditherme (quand il n'y a pas de transfert thermique). Au rendement de carnot, la puissance est toujours nulle, pourquoi ? Parce qu'on est quasi statique, donc infiniment lent.
- petit problème dans comment le problème a été abordé. On a raisonné avec des cycles réversibles tout du long. Alors qu'on sait que ça ne donne pas ce qu'on n'a qu'une majoration de la puissance fournie.
- Que modifier dans la leçon pour parler d'autres sources d'énergie ? Genre hydraulique -
- quel est le point commun entre centrales nucléaires, barrages et éoliennes ? il y a un alternateur (on pourrait en parler dans la leçon).
- Fonctionnement du photovoltaïque avec des semi conducteurs
- Comment on passe de alternatif à continu ? Avec un onduleur. On commande 4 interrupteurs contrôlés (transistors) et on met un filtre pour que ça passe
- Quelle surface de la France faut-il pour l'alimenter en panneaux solaires ? C'est faisable, ça représente 15% de la surface des toits de France.

Sources EPFL flux neutromique (Bunko) (oto)