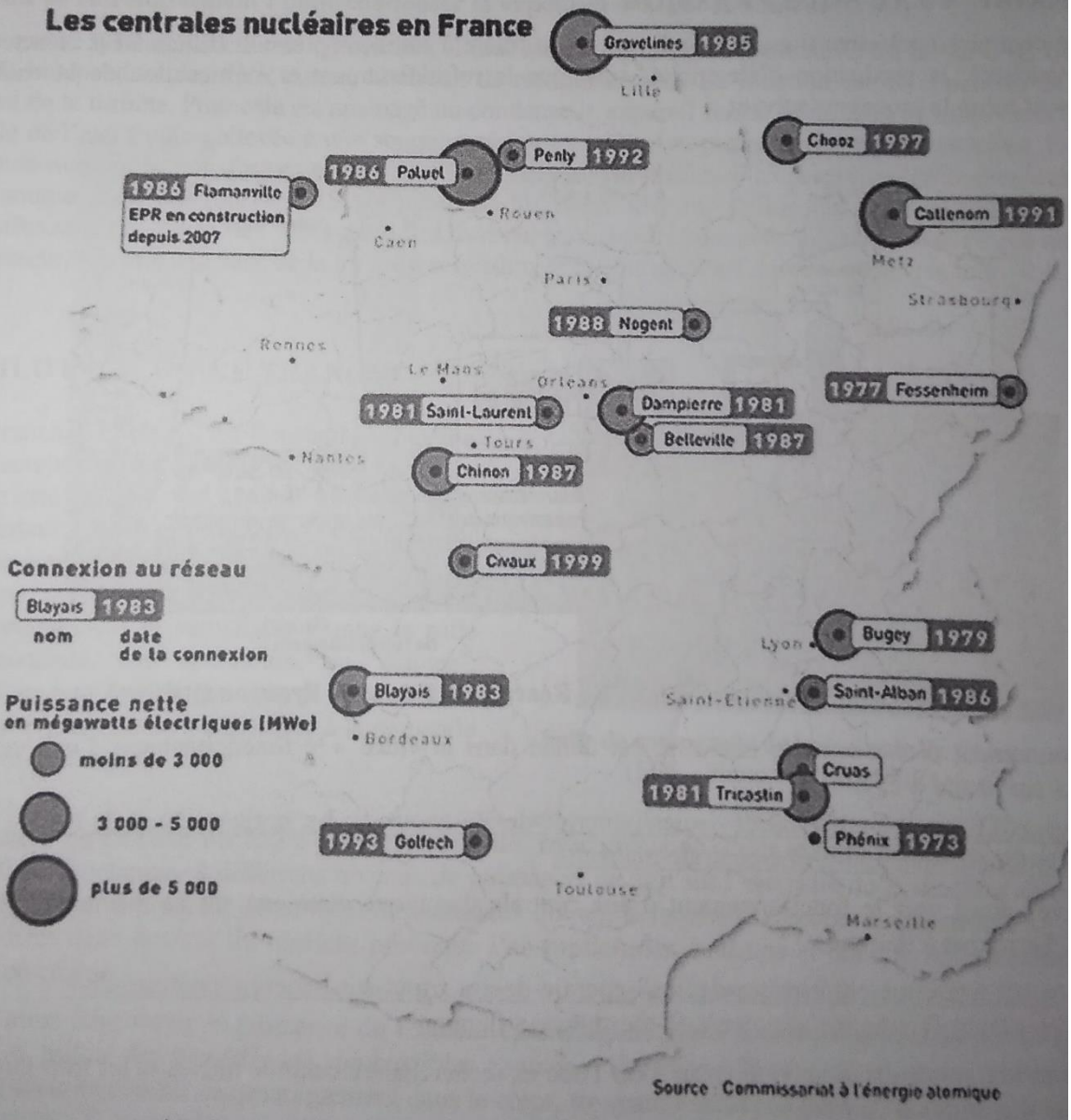
ANALYSE DOCUMENTAIRE

THEME : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE

Ce dossier a pour but de vous familiariser avec le fonctionnement d'une centrale nucléaire, ainsi que de mettre à profit vos connaissances de thermodynamique pour évaluer ses performances énergétiques.



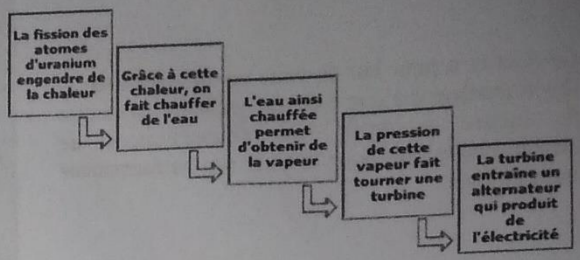
http://www.cartefranceo.com/img/miniatures/carte-france-centrale-nucleaire-2.jpg

DOCUMENTS SCIENTIFIQUES

DOCUMENT 1 : COMMENT FONCTIONNE UNE CENTRALE NUCLEAIRE ?

Une centrale nucléaire est une usine de production d'électricité. Elle utilise pour cela la chaleur libérée par l'uranium qui constitue le "combustible nucléaire". L'objectif est de faire chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur permet de faire tourner à grande vitesse une turbine, laquelle entraîne un alternateur qui produit de l'électricité.

Le principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire peut donc être schématisé comme suit :



LE PROCESSUS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE DANS UNE CENTRALE NUCLEAIRE A EAU SOUS PRESSION

Dans les centrales nucléaires françaises, relevant de la filière à eau sous pression (filière REP : réacteur à eau pressurisée), la production d'électricité, ainsi que le refroidissement et l'évacuation de la chaleur, s'effectuent selon le processus suivant :

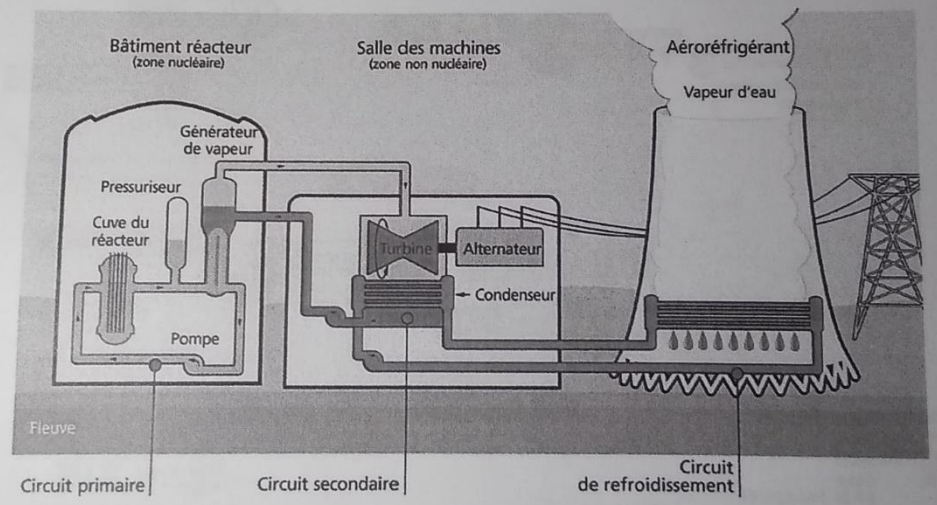


Schéma de fonctionnement d'un Réacteur à Eau sous Pression (REP)

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire est donné dans la vidéo « le fonctionnement d'une centrale nucléaire » sur le site d'EDF :

https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-nucleaire

Vous pouvez aussi voir le fonctionnement d'une centrale thermique classique sur ce même site (vidéo : « centrale thermique à flamme ») :

https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/comment-fonctionne-une-centrale-thermique-a-flamme

Vous pouvez voir aussi ces deux vidéos sur You Tube en recherchant « centrale nucléaire les trois circuits » et « centrale thermique à flamme ».

https://www.youtube.com/watch?v=I09DhTubNqE et https://www.youtube.com/watch?v=rvImmeBsIT0

Circuit primaire : pour extraire la chaleur

L'uranium, légèrement "enrichi" dans sa variété - ou "isotope"- 235, est conditionné sous forme de petites pastilles. Celles-ci sont empilées dans des gaines métalliques étanches réunies en assemblages. Placés dans une cuve en acier remplie d'eau, ces assemblages forment le cœur du réacteur. Ils sont le siège de la réaction en chaîne, qui les porte à haute température. L'eau de la cuve s'échauffe à leur contact (plus de 300°C). Elle est maintenue sous pression, ce qui l'empêche de bouillir, et circule dans un circuit fermé appelé circuit primaire.

Circuit secondaire : pour produire la vapeur

L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire. Cet échange de chaleur s'effectue par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Au contact des tubes parcourus par l'eau du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en vapeur. Cette vapeur fait tourner la turbine entraînant l'alternateur qui produit l'électricité. Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.

Circuit de refroidissement : pour condenser la vapeur et évacuer la chaleur

Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but d'un troisième circuit indépendant des deux autres, le circuit de refroidissement. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. Pour cela est aménagé un condenseur, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure : rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se transformer en eau. Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, à la source d'où elle provient. Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement, ou aéroréfrigérants. L'eau échauffée provenant du condenseur, répartie à la base de la tour, est refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour.

LE PILOTAGE D'UNE TRANCHE NUCLEAIRE

Une "tranche" nucléaire est l'ensemble constitué du réacteur et du système de production d'électricité qui lui est associé : la turbine et l'alternateur. Dans presque tous les cas, une centrale comporte plusieurs tranches. Toutes les fonctions importantes d'une tranche nucléaire sont commandées et surveillées depuis la salle de commande. Les opérateurs, ou "pilotes", veillent au bon fonctionnement de l'installation et ajustent la puissance du réacteur à la demande du réseau électrique.

Salle de commande de la centrale de Chooz
(EDF - Photo : G. LARVOR)

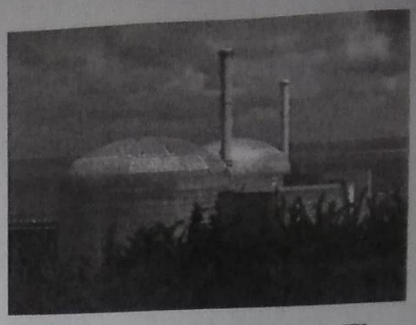
La marche d'un réacteur nucléaire peut être contrôlée avec précision. Pour le faire démarrer, pour l'arrêter, pour le faire fonctionner à différents niveaux de puissance, on agit sur l'intensité de la réaction en chaîne au moyen de barres de contrôle constituées de matériaux qui ont la faculté d'absorber les neutrons. La descente de ces barres dans le cœur du réacteur provoque l'absorption des neutrons et donc le ralentissement de la réaction en chaîne.

On peut ainsi faire varier la puissance du réacteur en enfonçant plus ou moins profondément les barres de contrôle au milieu des assemblages combustibles contenant l'uranium. En cas de situations anormales, des barres de sécurité chutent automatiquement dans le cœur, stoppant instantanément le réacteur.

LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE TRANCHE NUCLEAIRE

(Les dimensions des différents composants, données ici à titre d'exemple, se rapportent à la centrale nucléaire de Civaux, dans la Vienne, équipée de deux réacteurs de 1450 mégawatts électriques de puissance).

Bâtiment réacteur : constitué d'une double enceinte en béton, hauteur 60 m, diamètre 50 m, abrite la cuve du réacteur et les principaux composants nucléaires de la tranche.



Bâtiment réacteur de la centrale de Flamanville

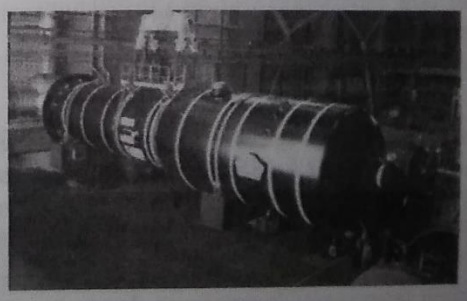
(EDF - Photo : Pierre BERENGER)

Cuve du réacteur : hauteur 13,66 m, diamètre 4,95 m, épaisseur 23 cm, en acier spécialement traité. Elle abrite le cœur du réacteur formé par les assemblages combustibles contenant l'uranium.

Cuve de réacteur

Pressuriseur : maintient la pression à environ 155 bar.

Générateur de vapeur : reçoit l'eau chaude du circuit primaire (dans des tubes en forme de U), ce qui permet de chauffer l'eau du circuit secondaire et de la transformer en vapeur. On compte dans la plupart des cas trois générateurs de vapeur par tranche.



Générateur de vapeur 900 MW à l'usine Framatome ANP de Chalon-Saint-Marcel

Le groupe turbo-alternateur : composé des différents corps de turbine et de l'alternateur, il est mis en mouvement par la pression de la vapeur et produit le courant électrique. Il est situé dans la salle des machines, un hall de 106 m de longueur et 47 m de hauteur.

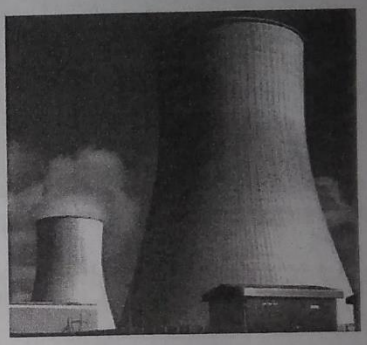
Les groupes turbo-alternateurs de la centrale de Gravelines (tranches 1 à 4)

(Photo : EDF)

Le poste électrique : reçoit l'électricité produite par les tranches de la centrale et l'évacue vers le réseau à très haute tension.

Le réfrigérant atmosphérique (également appelé tour de refroidissement ou aéroréfrigérant) : c'est, pour chaque tranche, le point d'aboutissement du circuit de refroidissement dans lequel l'eau réchauffée sortant du condenseur est refroidie par un courant d'air frais ascendant.

Hauteur : 178 m ; diamètre à la base : 155 m.



Réfrigérants atmosphériques de la tranche 2 de la centrale de Civaux

(EDF - Photo : Claude PAUQUET)

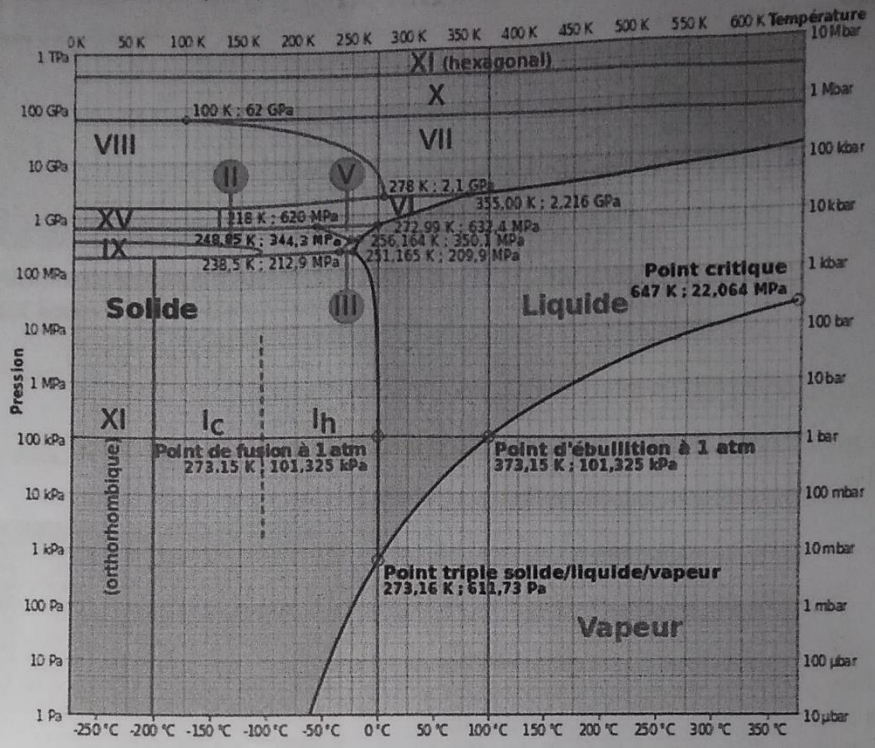
LES DIFFERENTES FILIERES DE CENTRALES NUCLEAIRES

Il existe différents modèles - ou "filières" - de centrales nucléaires, se caractérisant par trois principaux éléments et leur association :

- le combustible : uranium naturel, uranium enrichi, plutonium ;
- le modérateur (substance utilisée pour favoriser le développement de la réaction en chaîne) : eau ordinaire, eau lourde, graphite ;
- la caloporteur (fluide d'extraction de la chaleur produite par le combustible nucléaire) : eau ordinaire sous pression ou bouillante, eau lourde, gaz carbonique, sodium, hélium.

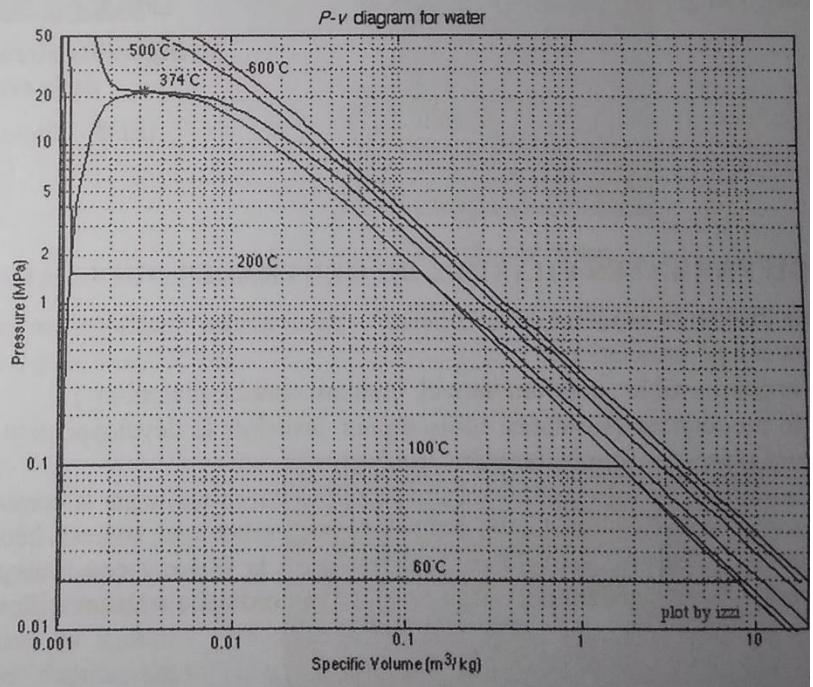
Les centrales nucléaires françaises appartiennent à la filière à eau sous pression. Combustible : uranium légèrement enrichi ; modérateur et caloporteur : eau ordinaire sous pression.

DOCUMENT 2 : DIAGRAMME (P,T) DE L'EAU



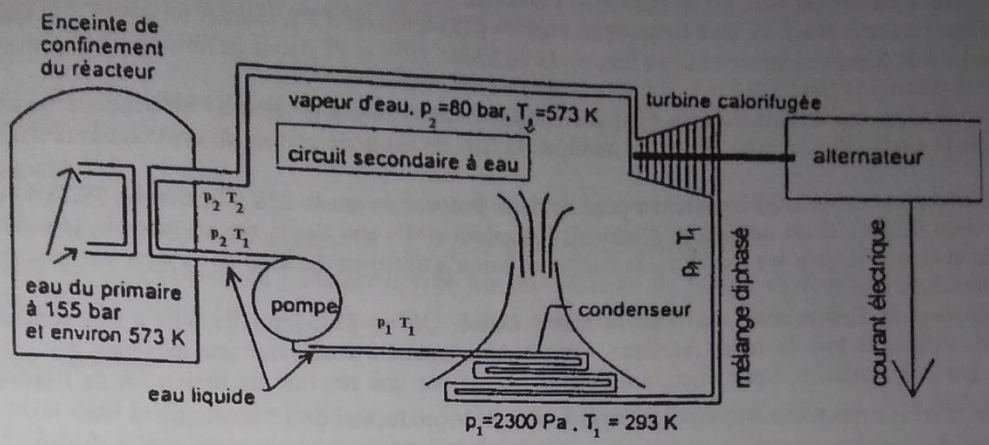
DOCUMENT 3 : DIAGRAMME DE CLAPEYRON DE L'EAU

On donne ici le diagramme de Clapeyron de l'eau (Pression, Volume massique).



DOCUMENT 4 : DONNEES SUPPLEMENTAIRES SUR LE CYCLE SECONDAIRE :

On envisage **l'étude du circuit secondaire** à partir du schéma suivant, qui précise les conditions de circulations de l'eau :



On étudie l'eau (M = 18 g.mol^{-1}) en circuit fermé du **circuit secondaire**. On propose de modéliser son évolution au prix de quelques approximations par le cycle suivant :

Etat (A) : L'eau qui sort du condenseur est liquide : p_1, T_1

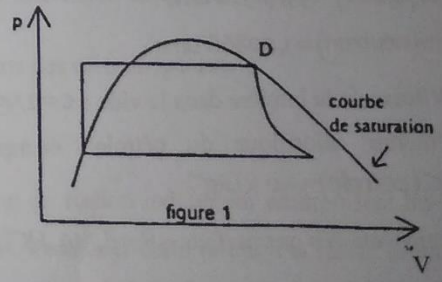
(AB) : Elle subit dans la pompe une compression durant laquelle sa température ne varie pratiquement pas. On considérera que les échanges thermiques sont négligeables lors de cette compression qui l'amène dans un état (B) : p_2 , T_1

(BD) : Elle passe ensuite dans un échangeur qui permet les transferts thermiques entre le circuit primaire et le circuit secondaire. On peut décomposer en deux transformations ce qui se passe alors :
L'eau liquide s'échauffe de manière isobare (p_2) jusqu'à T_2 : état (B')
L'eau se vaporise entièrement, jusqu'à l'état (D) : (p_2 , T_2)

(DE) : La vapeur d'eau se détend de manière réversible dans une turbine calorifugée jusqu'à p_1, T_1 : état (E). Durant cette détente, une fraction (1-x_v) de l'eau redevient liquide, et x_v reste gazeuse : x_v est donc le titre en vapeur. Tout le transfert d'énergie mécanique reçu par la turbine est donné à l'alternateur.

(EA) : La vapeur restant se condense à la température du condenseur : T_1

On a tracé ces transformations sur le diagramme de Clapeyron incomplet de la *figure 1* ci-contre.
On complètera ce diagramme dans la question 21) de ce problème.



L'écoulement est stationnaire (permanent).

On a extrait les données suivantes de tables thermodynamiques :

v est le volume massique
h est l'enthalpie massique
s est l'entropie massique

On a affecté ces grandeurs de l'indice :
l pour la phase liquide
v pour la phase vapeur

Température	Pression de vapeur saturante (bar)	Volume massique en m^3.kg^{-1}		Enthalpie massique en kJ.kg^{-1}		Entropie massique en kJ.K^{-1}.kg^{-1}	
		v_l	v_v	h_l	h_v	s_l	s_v
T_1 = 293 K	0,023 (p_1)	v_l (293)	v_v (293)	85	2540	0,3	8,7
T_2 = 573 K	80 (p_2)	1,31.10^{-3}	0,026	1290	2890	s_l (573)	6,0

DOCUMENT 5 : RADIOACTIVITE ET CENTRALE NUCLEAIRE

Un réacteur nucléaire est basé sur la fission de l'uranium 235 (noté U_5 dans la suite), induite par neutrons lents. Dans une telle réaction, un neutron lent, capturé par un noyau d'U_5, produit un noyau ^{236}U qui subit une réaction de fission en générant deux fragments de fission (PF_1 et PF_2) tout en libérant x neutrons (n). Le x moyen est compris entre 2 et 3.

On cède ainsi au milieu une énergie Q_N pour chaque fission. Une fois ralentis, les neutrons serviront à entretenir la chaîne de réactions. Ainsi, la maîtrise du flux de neutrons permet de contrôler la réactivité du Cœur.

L'uranium naturel est principalement composé de deux isotopes de masse 238 (U_8, environ 99,28%) et 235 (U_5, environ 0,72%). Il est nécessaire d'enrichir l'uranium en U_5 très fissile aux neutrons lents à des taux allant de quelques % pour les réacteurs de puissance jusqu'à quelques dizaines de % pour des réacteurs de recherche à haut flux.

Les fragments de fission n'ont pas tous la même masse. Or, on peut produire plus d'une centaine de fragments différents lors de telles réactions. On est donc amené à considérer une moyenne des énergies libérées par ces réactions. Cette énergie moyenne libérée par une réaction de fission est de l'ordre de : $Q_{moy} = 2,860.10^{-11}\ J$ et elle s'accompagne en moyenne de la production de 2,5 neutrons.

Les barres de contrôle permettent d'éviter l'emballement de la réaction. Elles sont en général formées de matériaux à base de bore $^{10}_{5}B$:

$$^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n = ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He$$

DOCUMENT 6 : QUELQUES DONNEES SUPPLEMENTAIRES

- Unité de Masse Atomique (uma ou u) : $1\ uma = \frac{10^{-3}}{N_A} = 1,66054.10^{-27}\ kg$

  $m\left(^{235}_{92}U\right) = 234,99346\ uma$

  $m\left(^{132}_{50}Sn\right) = 131,91634\ uma$

  $m\left(^{100}_{42}Mo\right) = 99,91320\ uma$

  $m(neutron) = 1,00866\ uma$

- Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 2,9979.10^{8}\ m.s^{-1}$
- Pouvoir calorifique du pétrole : énergie libérée par la combustion d'un kg de pétrole : $PC(pétrole) \approx 40\ kJ.kg^{-1}$.
- Constante des gaz parfaits : $R = 8,314\ J.K^{-1}.mol^{-1}$
- Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c(eau\ liquide) = 4,18\ J.g^{-1}K^{-1}$

QUESTIONS :

Dans toute l'épreuve, l'eau gazeuse sera considérée comme un gaz parfait.

PARTIE I : QUESTIONS SUR DES NOTIONS SIMPLES DU PROGRAMME EN LIEN AVEC LA THEMATIQUE

Radioactivité

1. Donner la composition du noyau d'U_5 : $^{235}_{92}U$. Qu'appelle-t-on isotopes ?
2. Quelle est l'expression de l'énergie libérée par une réaction de fission en fonction de la masse des éléments en présence $(m_{U5}, m_{PF1}, m_{PF2}, m_n)$ et de x, nombre de neutrons libérés par la réaction.

Thermodynamique

3. Repérer dans le diagramme de Clapeyron de l'eau du document 2 les zones correspondant à un liquide seul, à de la vapeur sèche et à un équilibre liquide/vapeur.
4. Quelle est la relation entre la variation d'entropie d'un corps pur et sa variation d'enthalpie lors d'une vaporisation totale isobare ? On démontrera la relation.
5. En déduire à l'aide du document 4, l'entropie massique de l'eau liquide à 573 K, 80 bar : s_l (573).
6. Sachant que la vapeur d'eau sous 0,023 bar et 293 K peut être considérée comme un gaz parfait, calculer son volume massique v_v (293).
7. Donner sans calcul la valeur de v_l (293).
8. Qu'appelle-t-on un système divariant pour un corps pur ?

PARTIE II : ANALYSE DE DOCUMENTS

9. Après avoir visionné les vidéos, préciser quelle est la différence entre une centrale nucléaire et une centrale thermique classique.
10. A quoi correspond le panache blanc visible sur les photos des aéroréfrigérants ?

Radioactivité

11. Déterminer l'énergie thermique libérée par une réaction de fission induite par neutron lent de $^{235}_{92}U$ qui s'accompagnerait de la production de $^{132}_{50}Sn$ et de $^{100}_{42}Mo$. Comparer cette valeur à la valeur donnée dans le document 5.
12. Quelle est en J puis en Watt.heure l'énergie libérée par la fission d'un gramme d'U_5 ?
13. Déterminer en grammes par seconde, et en tonnes par an, la consommation d'U_5 en régime continu pour fournir les 2,6 GW produits par le cœur d'un réacteur REP_{900} en régime continu.
14. Déterminer la masse de pétrole qui libèrerait la même quantité d'énergie que la fission d'1 gramme d'uranium 235. Commenter.
15. Expliquer en 5 lignes maximum le mode de contrôle de la réaction nucléaire.
16. Pourquoi existe-t-il un circuit secondaire et un circuit primaire. Autrement dit, pourquoi n'utilise-t-on pas l'eau chauffée par les réacteurs pour faire tourner les turbines ?

Etude du cycle primaire

17. Quel est l'état physique du fluide dans le circuit primaire ? Quel est le rôle du pressuriseur ?
18. Déterminer la pression minimale qui doit résider dans le circuit primaire afin d'assurer la condition précédente. Est-ce cohérent avec ce que propose le document 1 ?
19. Quels transferts énergétiques reçoit le fluide du circuit primaire ? Quel est leur signe ?

Etude du circuit secondaire (document 4)

20. Quels transferts énergétiques reçoit le fluide du circuit secondaire ? Préciser la source froide ainsi que la source chaude.
21. Recopier sur votre feuille la *figure 1* du document 4. Compléter le cycle de l'eau dans le diagramme de Clapeyron en plaçant les points correspondant aux états A, B, B', D et E. Justifier. Tracer entièrement sur ce diagramme les isothermes 573 K et 293 K. Placer le point critique C et nommer les deux parties de la courbe de saturation situées de part et d'autre de ce point.
22. Préciser sur le cycle la phase de contact avec la source chaude et celle avec la source froide.
23. Tracer qualitativement le cycle de l'eau dans le diagramme entropique (s, T). On placera les points ainsi que les isobares p_1 et p_2.
24. Comment est modifiée l'allure de ce cycle dans le diagramme entropique si l'évolution dans la turbine est irréversible ?
25. Calculer x_v le titre en vapeur en (E).
26. On notera w_a le travail utile reçu par l'alternateur par unité de masse de fluide écoulé (on négligera tout frottement). La turbine est calorifugée et horizontale. Calculez la valeur numérique de w_a.
27. Pour l'eau liquide, la capacité thermique massique est $c = 4{,}18\ kJ.K^{-1}.kg^{-1}$. Calculer le transfert thermique massique reçu par l'eau lors de son contact avec la source chaude : on le notera q_{ch}.
28. On définit l'efficacité $e = w_a/q_{ch}$. La calculer et la comparer à l'efficacité maximale qu'on aurait pu avoir avec les mêmes sources.