

Expertise PA13, Module « Energie Nucléaire » Cycle thermodynamique d'un REP (palier N4)

F. Ravelet^a

^a *Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et Systèmes Energétiques,*
Arts et Metiers Institute of Technology,
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France
contact: florent.ravelet@ensam.eu

8 avril 2020

1 Introduction

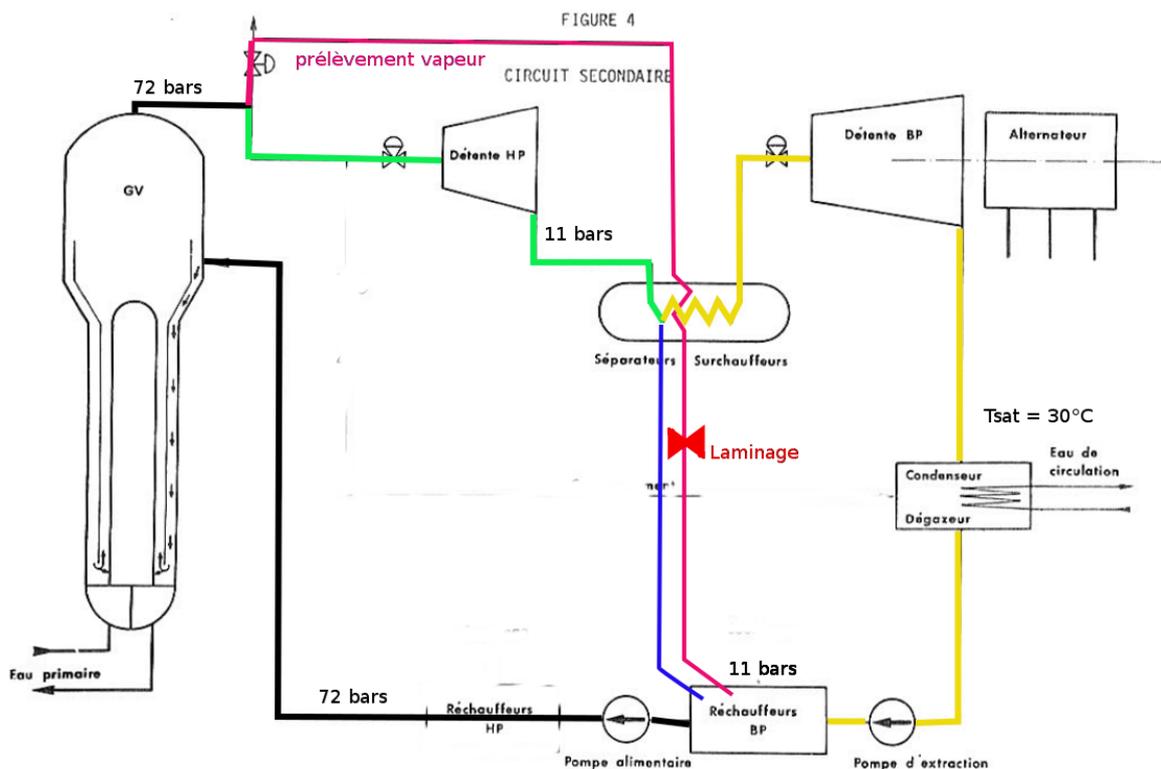


FIGURE 1 – Principe du cycle d'une centrale nucléaire à eau sous pression

Le circuit secondaire des centrales P.W.R.¹ est un circuit fermé, réalisant un cycle thermodynamique de Hirn-Rankine. L'objectif de ce TD est de modéliser le cycle du palier N4.

1. Pressurized Water Reactor, en français Réacteur à Eau sous Pression REP.

La description du cycle s'appuie sur la figure 1. Ce cycle consiste tout d'abord en une vaporisation de l'eau au niveau de la source chaude, dans un organe appelé Générateur de Vapeur (GV). La source chaude est l'eau du circuit primaire, qui a été en contact avec le cœur du réacteur nucléaire. La vapeur sortant du GV à 72 bars (branche noire épaisse sur la figure 1) est séparée en 2 branches : une partie de la vapeur produite est utilisée pour la surchauffe (branche rose), le reste (branche verte) est détendu dans une turbine haute pression (HP) à une pression de 11 bars. Le produit de cette détente passe dans un séparateur-surchauffeur : on y sépare l'eau liquide (branche bleue) et la vapeur saturée à 11 bars (branche jaune), qui est surchauffée par échange avec la fraction de vapeur à 72 bars prélevée au GV (branche rose). Cette vapeur surchauffée est détendue dans une turbine basse pression (BP), avant d'être condensée au niveau de la source froide. La source froide pour le circuit secondaire est l'eau d'une rivière ou de la mer. La pression en sortie de la turbine BP est fixée par la température au condenseur (environ 30°C). L'eau séparée en fin de détente HP (branche bleue), l'eau issue du prélèvement pour la surchauffe (branche rose), et l'eau du condenseur (branche jaune) sont ramenées à la pression intermédiaire de 11 bars (laminage pour la branche rose, pompe d'extraction pour la branche jaune) pour être mélangées. La dernière étape du cycle est une compression pour amener l'eau au GV à 72 bars.

1.1 Commentaires sur les spécificités du cycle secondaire d'une centrale nucléaire

Par rapport à une centrale thermique classique, la température et la pression de la vapeur au point chaud sont faibles (72 bars et 287°C pour le palier N4) : compte-tenu des faibles écarts de température entre les circuits primaire et secondaire, la nécessité de transférer une puissance importante interdit en pratique de réaliser toute surchauffe dans le GV, car les coefficients d'échange entre le liquide primaire et la vapeur surchauffée seraient trop faibles : la vapeur sort du GV à l'état saturé sec (titre thermodynamique $\simeq 1$, sur la courbe de saturation). Les températures et pressions à la source froide sont de l'ordre de 30 °C et 0.04 bars.

Une détente directe de la vapeur entre ces deux états conduirait à un titre thermodynamique en fin de détente trop faible, ce qui serait à la fois pénalisant sur le plan des performances, et fatal pour la tenue mécanique des aubages des turbines. On n'acceptera que des titres supérieurs à $x \geq 0.85$ (85% de vapeur et 15% de liquide en masse dans le mélange).

La solution retenue consiste à scinder la détente en deux, avec une pression intermédiaire de 11 bars, et une utilisation d'une fraction de la vapeur du GV pour une surchauffe. Cela permet d'augmenter le rendement et de respecter la contrainte de titre de fin de détente dans la turbine basse pression.

L'objet de cette séance est de calculer tous les paramètres thermodynamiques pour un modèle de ce cycle. Les résultats obtenus permettront, connaissant la puissance thermique à la source chaude que nous supposons fournie par nos collègues étudiant la partie nucléaire de la centrale, de prédire la puissance électrique fournie, mais également le débit à assurer dans le circuit secondaire : nous pourrons alors fournir les paramètres dimensionnant pour les pompes, le condenseur, et le séparateur-surchauffeur.

2 Modélisation du cycle

Vous utiliserez les données thermodynamiques de l'eau sur le site <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (voir Fig. 2). On impose les conditions en sortie de GV : $P = 72$ bars, état vapeur saturée, et en sortie de condenseur : $T = 30^\circ\text{C}$, état liquide saturé.

Fluid Data

Isobaric Data for P = 72.000 bar

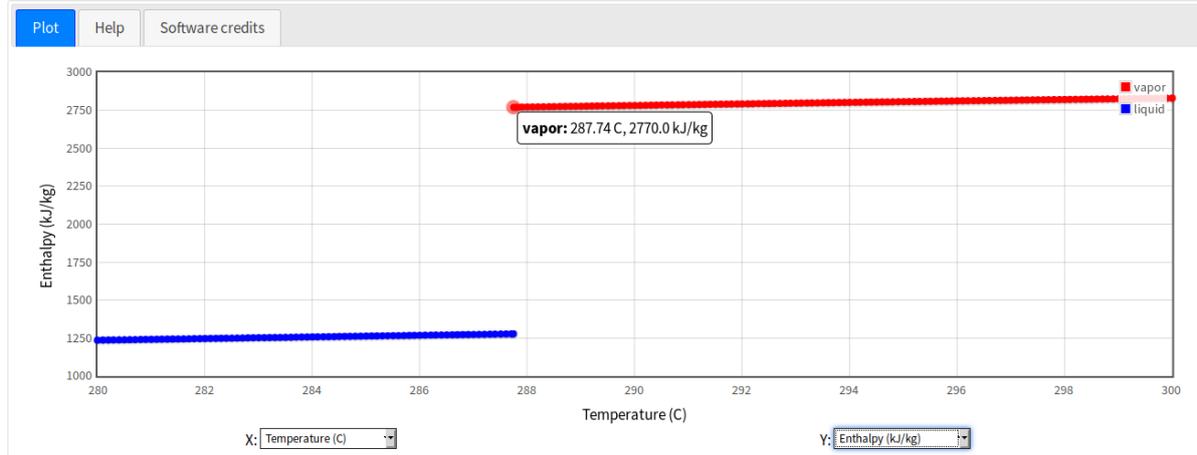


FIGURE 2 – Enthalpie massique de l'eau fonction de la température à 72 bars (image issue de :<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>)

2.1 Cycle de Carnot équivalent

1. Trouver les températures chaudes et froides du cycle. Calculer le rendement d'un cycle de Carnot qui fonctionnerait entre les mêmes températures.

2.2 Cycle de Rankine avec machines idéales

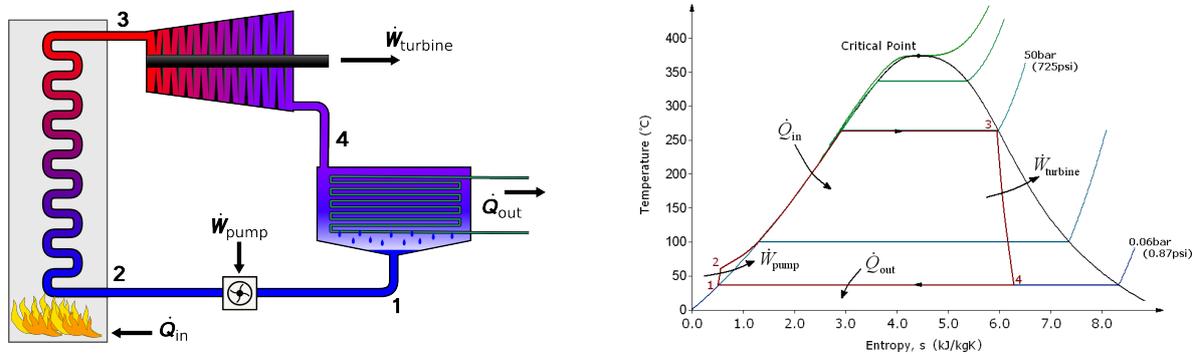


FIGURE 3 – Principe du cycle de Rankine : l'eau est vaporisée à la source chaude où elle reçoit $\dot{Q}_{in} > 0$. La vapeur saturée produite est détendue dans la turbine où le travail $\dot{W}_{turbine} < 0$ est produit. Le mélange eau-vapeur se condense en cédant $\dot{Q}_{out} < 0$ à la source froide. L'eau est ramenée à la pression de la branche chaude du circuit par le travail $\dot{W}_{pump} > 0$ de la pompe. Le travail utile est donc $\dot{W}_u = \dot{W}_{turbine} + \dot{W}_{pump}$. Attention aux signes! (images issues de : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Rankine)

On va considérer dans un premier temps un cycle sans étape intermédiaire. On le nomme cycle de Rankine. Un circuit réalisant un tel cycle est représenté en figure 3. On utilisera la numérotation de la figure pour notre exercice.

On supposera que les détente et compressions se font de manière isentropique. L'eau est sous forme liquide aux points 1 et 2, et sous forme de vapeur saturée au point 3. Au point 4, on a un mélange liquide-vapeur à l'équilibre thermodynamique.

On prendra un débit de masse unitaire dans le circuit. Pour accéder aux « vraies » valeurs des chaleurs et travaux pour la centrale, il suffira ensuite de tout multiplier par le débit massique réel dans le circuit secondaire. On cherche à remplir le tableau suivant :

Point	T (°C)	P (bars)	h	s	x
1	30				0
2					
3		72			1
4					

1. Remplir les données manquantes aux points 1 et 3 à partir des tables thermodynamiques de l'eau.
2. On néglige les pertes de charge dans les échangeurs : reporter les valeurs de pression aux points 2 et 4 (c'est-à-dire que $p_2 = p_3$ et $p_4 = p_1$).
3. Commencer à traiter les transformations à partir d'un point où l'on connaît complètement l'état thermodynamique : par exemple, le point 1. Pour la transformation entre le point 1 et le point 2, on a une compression liquide *isentropique*. En utilisant cette contrainte ($s_2 = s_1$), relever dans les tables thermodynamiques $h_{2,s}$, en déduire le travail de compression par unité de masse de fluide.
4. Calculer ensuite la chaleur apportée par la source chaude par unité de masse de fluide.
5. Calculer la détente, en utilisant l'hypothèse que la transformation est isentropique : pour cela, il faudra passer par un calcul du titre thermodynamique. Quel est le travail par unité de masse de fluide à la turbine ? Le titre en fin de détente est-il satisfaisant, sachant qu'un titre de 0.85 est déjà très pénalisant (il y a trop d'eau liquide) ?
6. Finir le travail en calculant la chaleur par unité de masse de fluide cédée à la source froide, et le rendement du cycle. On le comparera au rendement du cycle de Carnot.

2.3 Prise en compte des rendements des diverses machines pour le cycle de Rankine

1. Reprendre alors le calcul du rendement du cycle en prenant un rendement isentropique de 0.9 pour la pompe, et un rendement isentropique, très mauvais à cause de la haute teneur en eau en fin de détente, de 0.8 pour la turbine.
2. Comment est modifié le titre en fin de détente ?

2.4 Cycle avec détente en deux phases, et séchage-surchauffage.

Nous allons maintenant étudier un cycle se rapprochant de celui d'une centrale nucléaire. Son principe est schématisé en figure 1. Quelques remarques : tout d'abord, il y a deux veines distinctes en sortie de GV. L'une d'elle est la veine principale (verte), qui est détendue dans la turbine HP. Le fluide en sortie de turbine HP est un mélange d'eau et de vapeur : la fraction d'eau est séparée et retourne directement à la bache alimentaire (branche bleue) tandis que la fraction de vapeur (branche jaune) passe dans le surchauffeur, la turbine BP, le condenseur, et une pompe qui ramène le fluide à la pression de la bache alimentaire. L'autre veine (rose) est réservée au

surchauffage : la vapeur vive passe dans la branche chaude du séparateur-surchauffeur, où elle s'y condense, puis est détendue par un laminage à la pression de la bache.

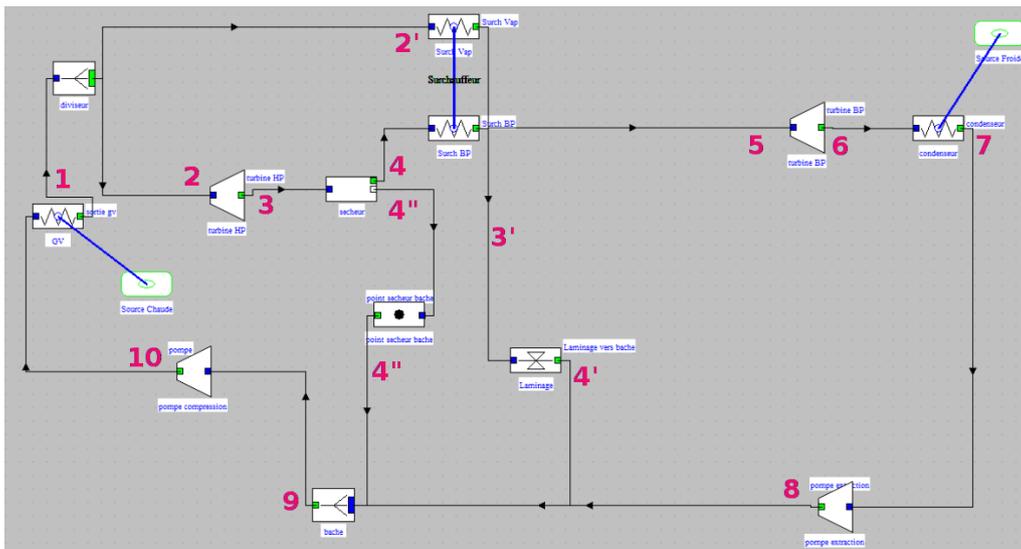


FIGURE 4 – Schéma du modèle de cycle traité

Pour la modélisation, nous adopterons le schéma de la figure 4. L'idée est là aussi de procéder par étapes, en commençant par l'un des deux points connus : point 1 ou point 7 sur le schéma. Les précisions et hypothèses nécessaires à la résolution sont les suivantes :

- Les états thermodynamiques en sortie de GV (point 1) et du condenseur (point 7) sont les mêmes. On a une première détente HP à 11 bars.
- Le débit dans la veine principale est 95% du débit total².
- L'échangeur « Surchauffeur » est conçu de telle sorte que pour sa branche chaude, le fluide sortant est de l'eau liquide à saturation (point 3'). Ceci peut-être une demande du concepteur de l'échangeur, qui se débrouillera pour le dimensionner de la sorte une fois que nous lui aurons fourni les résultats de nos calculs sur la branche froide.
- On supposera dans un premier temps toutes les turbines et pompes de rendement isentropique égal à 1, pas de pertes de charges dans les tuyaux, et un laminage (entre les points 3' et 4') isenthalpe.

On cherche à remplir le tableau ci-dessous :

2. Ordre de grandeur réel, on peut, à la fin du problème, refaire les calculs pour un autre débit prélevé pour la surchauffe.

Point	T ($^{\circ}\text{C}$)	P (bars)	h	s	x	\dot{m}
1		72			1	1
2		72			1	0.95
2'		72			1	0.05
3		11				0.95
4		11			0	
4''		11			1	
3'		72			0	0.05
5		11				
6						
7	30				0	
8		11				
4'		11				0.05
9		11				1
10		72				1

1. Calculer les chaleurs et travaux,
2. les titres en fin de détente HP et BP,
3. et le rendement du cycle.
4. A-t-on beaucoup gagné en termes de rendement, en termes de titres ?

2.5 Prise en compte des rendements des diverses machines pour le cycle complexe

Nous avons vu que la détente est partiellement humide, ce qui provoque des phénomènes d'érosion et de corrosion, et dégrade fortement le rendement. La conception des turbines de centrales nucléaires est donc très particulière, d'autant plus que les débits de vapeurs étant très élevés, les sections sont grandes et la vitesse de rotation faible. Afin de pallier à la présence de gouttellettes, certaines aubes ont des rainures parallèles au bord d'attaque, piégeant et centrifugeant les gouttes. On prendra pour rendement isentropique des pompes une valeur de 0.9, et pour les turbines de détente, cette fois-ci, un rendement meilleur (détente moins humide) de 0.85.

1. Refaire les calculs et relever les titres en sortie de détente HP et BP : le critère de tolérance sur la qualité de vapeur est-il respecté ?
2. Comparer le rendement réel du cycle au rendement réel du cycle de Rankine.