

Fiche-guide de TD sur la modélisation d'un palier de centrale nucléaire N4 pour réacteur REP

1) Objectifs du TD

L'objectif est d'approfondir les possibilités qu'offre Thermoptim en matière de modélisation et de calcul de bilans énergétiques de cycles complexes. Par conséquent, on suppose que le lecteur est déjà un utilisateur de Thermoptim qui en maîtrise les fonctions de base. Si ce n'est pas votre cas, vous devriez plutôt commencer par travailler avec les séances Diapason sur les cycles à vapeur simples (S25 et S26¹).

L'exemple présenté ici est un circuit secondaire de centrale nucléaire: l'objectif est de le modéliser sous Thermoptim, de calculer son bilan énergétique, et de réaliser quelques analyses de sensibilité sur des paramètres modifiables².

2) Références

GICQUEL R., Systèmes Energétiques, Tome 2 : applications, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, novembre 2001.

3) TD principale

31. Présentation de l'installation

Les centrales nucléaires à réacteur à eau sous pression comportent deux parties pour convertir l'énergie calorifique dégagée par la fission du combustible nucléaire dans le cœur en énergie mécanique, cette dernière faisant fonctionner un alternateur qui fournit finalement de l'énergie électrique:

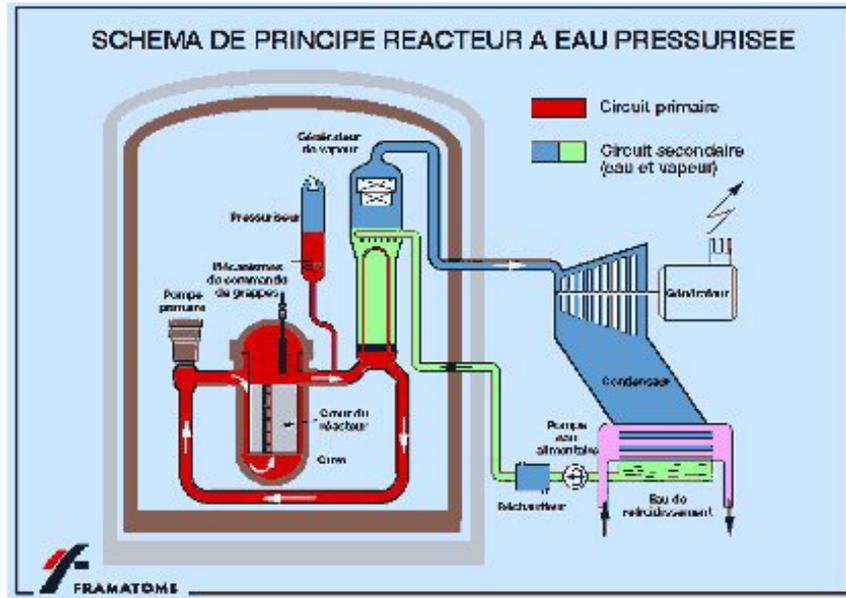
- *un circuit primaire* parcouru par de l'eau pressurisée à l'état liquide, qui passe dans le cœur du réacteur et récupère la chaleur produite par fission, et la transfère au circuit secondaire par le biais d'un générateur de vapeur (GV).
- *un circuit secondaire* parcouru par de l'eau, qui au contact de la chaleur transmise par le circuit primaire dans le GV, se transforme en vapeur sèche, et est ensuite détendue dans des turbines HP et BP, ces dernières faisant fonctionner un alternateur. La fraction d'eau restée à l'état de vapeur est ensuite condensée au contact d'une source froide, puis tous les condensats sont dirigés vers la bache alimentaire et remis en circulation dans le circuit. La source froide est généralement un élément du milieu extérieur, l'air ambiant, un fleuve ou la mer par exemple.

La présence de deux circuits est motivée par des considérations de sécurité, car l'eau du circuit primaire, en contact avec le cœur du réacteur, est radioactive. L'eau du circuit secondaire n'étant pas en contact direct avec celle du circuit primaire, elle ne l'est pas, ce qui limite au maximum le passage de produits radioactifs vers l'extérieur. D'autres circuits distincts assurent la sécurité et permettent de refroidir le réacteur rapidement en fonctionnement anormal.

¹ Séance S25 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S25/seance.html>

Séance S26 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S26/seance.html>

² Si vous travaillez sur une version éducation ou démonstration, les fonctions d'analyse de sensibilité et les pressions de contrôle ne sont pas disponibles; vous pourrez modéliser le cycle mais vous ne pourrez pas réaliser aussi facilement les analyses proposées.



L'installation modélisée dans cet exemple, et dont on souhaite déterminer le rendement, est le circuit secondaire d'une centrale nucléaire N4. Le circuit secondaire est la partie "classique" de la centrale, mais le cycle à vapeur qui est utilisé est soumis à un certain nombre de contraintes particulières qui le font différer des cycles de type Hirn des centrales à combustible fossile classiques.

3.2. Contraintes et hypothèses de modélisation

Température de condensation

La température du fluide de refroidissement (fleuve, mer, aéroréfrigérant) est à peu près la température ambiante. Pour des raisons de rapidité du transfert thermique, on garde une marge d'une quinzaine de degrés, et on prend une température froide du fluide, dans le condenseur, aux environs de 40°C. Néanmoins la température de condensation est un paramètre très important, que l'on pourra faire varier pour optimiser le rendement.

Température chaude

Dans le circuit primaire, la température de l'eau dans la cuve est limitée à environ 330°C par les conditions d'échange thermique au niveau de la gaine du combustible. L'eau est maintenue à une pression de 155 bars pour éviter l'ébullition ($T_{sat}(155 \text{ bars}) = 345^\circ\text{C}$). Dans le GV, la température du fluide primaire est en moyenne comprise entre 300°C et 320°C.

Compte tenu de la faible différence de température du fluide primaire entre l'entrée et la sortie du GV, du côté secondaire, l'eau est vaporisée mais n'est pratiquement pas surchauffée (l'état diphasique est plus favorable aux échanges de chaleur que l'état de vapeur). La température de la vapeur en sortie du GV se situe alors aux environs de 280°C.

Cette température est faible par rapport aux températures atteintes dans les cycles à vapeur des centrales à combustible fossile (560°C), où les conditions de sécurité n'exigent pas une telle limitation de la température chaude.

Le rendement maximal théorique d'une machine thermique fonctionnant entre $T_0 = 313 \text{ K}$ (40°C) et $T_1 = 553 \text{ K}$ (280°C) est donc assez faible, il est donné par:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_0}{T_1} = 1 - \frac{313}{553} = 0,43$$

Pressions dans le circuit

Le compresseur porte l'eau liquide à une pression de 70 bars, pour que, compte tenu des pertes de charges, la vaporisation dans le GV puisse avoir lieu autour de $P_{\text{sat}}(280^{\circ}\text{C}) = 65$ bars.

Par contre, la pression de la vapeur en entrée de turbine HP est choisie aux environs de 50 bars, afin de pouvoir mieux réguler la turbine. De même, la vapeur prélevée en sortie de GV pour la surchauffe est détendue à 51,5 bars.

La pression de condensation du cycle est $P_{\text{sat}}(40^{\circ}\text{C}) = 0,07$ bar.

Une pression intermédiaire de 11 bars est utilisée, et la détente de la vapeur est séparée entre une détente HP entre 50 et 11 bars, et une détente BP entre 11 et 0,07 bar.

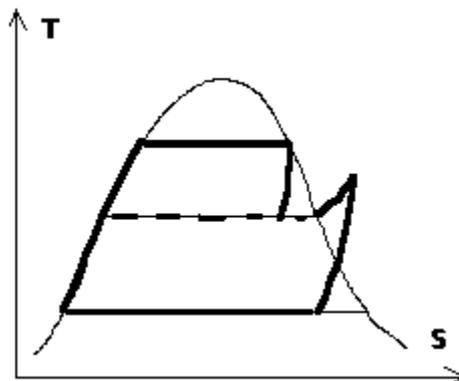
Séchage et surchauffe de la vapeur en sortie de turbine HP

La vapeur rentrant dans la turbine HP n'étant pas surchauffée, elle commence à se condenser dès le début de la détente. Les gouttelettes liquides formées diminuent le rendement de la détente et provoquent une érosion des aubes de la turbine. La teneur en liquide est limitée à 25% maximum.

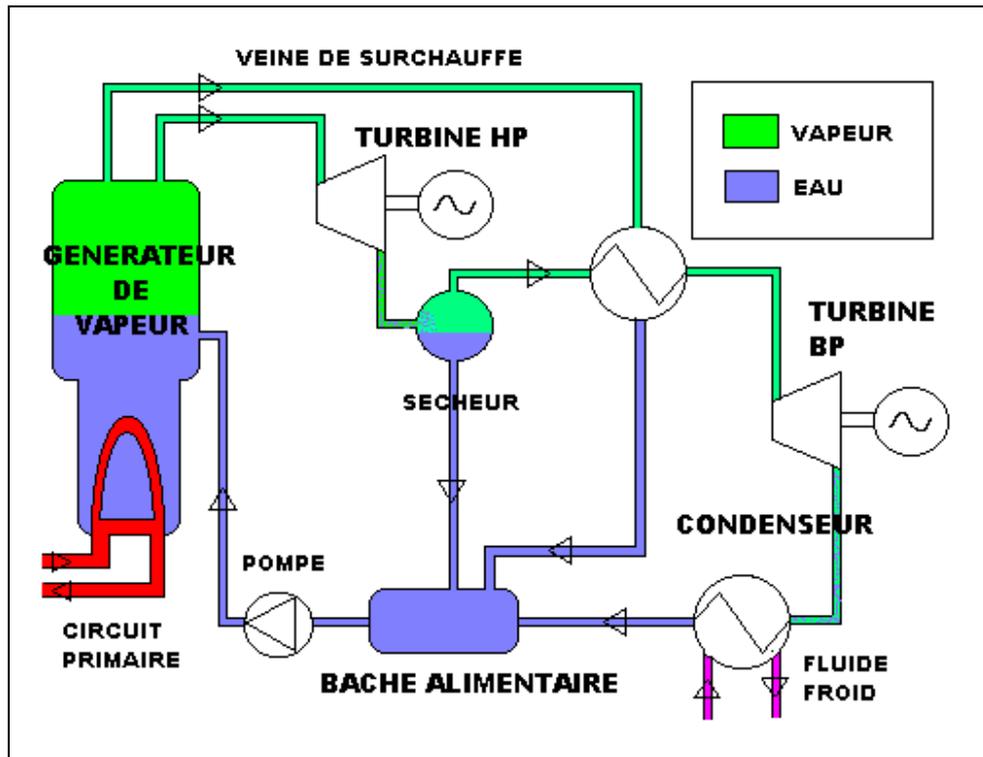
En sortie de turbine HP, on sépare donc les deux phases; l'eau liquide étant dirigée vers la bêche alimentaire, tandis que la vapeur est surchauffée avant de pénétrer dans la turbine BP. La surchauffe de la vapeur peut être effectuée à faible coût énergétique grâce à un prélèvement de vapeur en sortie de GV. Le gain mécanique de cette surchauffe est par contre important puisqu'il permet que la vapeur ne se condense qu'en fin de détente BP.

3.3. Schéma et description du cycle

Le cycle de la vapeur dans le circuit secondaire (cycle de Rankine) est illustré sur le diagramme (T,s) suivant:



Le schéma de l'installation est le suivant:



La bache alimentaire est maintenue à une pression de 11 bars. La température de l'eau en sortie est déterminée par les températures des différents condensats qui y sont mélangés. En sortie, la pompe alimentaire comprime l'eau jusqu'à 70 bars.

Puis elle est chauffée dans l'économiseur et vaporisée dans le GV. On admet que les pertes de charge font chuter la pression à 65 bars en sortie d'économiseur et 56 bars en sortie de GV. La vapeur n'est pas surchauffée.

La majeure partie de la vapeur est détendue dans une vanne jusqu'à 50 bars avant d'être détendue dans la turbine HP jusqu'à 11 bars. En sortie de turbine HP, le fluide diphasique est séparé dans un sécheur. La fraction liquide est dirigée vers la bache alimentaire, tandis que la fraction vapeur est surchauffée, puis détendue dans la turbine BP jusqu'à 0,07 bar. Le fluide est ensuite condensé dans le condenseur, recompressé jusqu'à 15 bars, et dirigé vers la bache.

La surchauffe en sortie de sécheur est effectuée grâce à un prélèvement en sortie du GV. La vapeur prélevée est détendue jusqu'à 51,5 bars, puis elle cède sa chaleur en se condensant entièrement. Le condensat est ensuite dirigé vers la bache.

Rendements des compresseurs et turbines

Les rendements des compresseurs et turbines sont donnés par les constructeurs:

- *turbine HP*: rendement isentropique égal à 0,816; faible car vapeur très humide dans la turbine.
- *turbine BP*: rendement isentropique égal à 0,85; standard.
- *pompes*: rendement isentropique égal à 0,9

Remarque:

Un circuit réel comporte en plus différents prélèvements, qui pour des raisons de simplicité, n'ont pas été modélisés ici. On se référera à l'exemple sur les centrales à vapeur pour étudier l'influence de ces prélèvements.

pression imposée PI dont vous fixerez pour le moment la valeur à 11 bars, et une pression BP que vous fixerez à 0,07 bar.

Certains points de ce cycle nécessitent des prérequis, par exemple le point de sortie de la bêche, pour lequel la pression est connue a priori (11 bars), mais pas la température, qui dépend de la température et des fractions des condensats en entrée de bêche. De même, les points du circuit BP ne sont pas connus a priori, car ils dépendent de la température de la vapeur surchauffée.

Commencez donc par exemple par le point N (sortie d'économiseur), qui est connu sans prérequis:

- *Point N*: réglez $P = 65$ bars, $T = T_{sat}$, titre = 0. Calculez et sauvez.
- *Point A*: $P = 56$ bars, $T = T_{sat}$, titre = 1. Calculez et sauvez.
- *Transfo générateur*: choisissez "type d'énergie = payante", calculez, sauvez.
- *Nœud sortie GV*: ce diviseur permet de régler la fraction de vapeur prélevée pour la surchauffe en sortie de turbine HP. L'écran du diviseur fait apparaître les deux branches "vanne HP" et "vanne surchauffée". Il y a ici deux manières de paramétrer leurs débits:
 - 1) Sélectionnez avec la souris une des branches, puis cliquez sur "paramétrage du débit". Rentrez le facteur de débit (0,95 pour la branche principale et 0,05 pour la branche de surchauffe). Calculez.
 - 2) Imposez le débit dans une des deux branches. Pour cela, ouvrez l'écran de la transformation "vanne HP", cochez la case "débit imposé" et donnez la valeur du débit (réel et non relatif cette fois) (0,95). Sauvez et revenez à l'écran du diviseur. Faites simplement "calculer", la valeur du débit dans l'autre branche est calculée. Le message "débit imposé" apparaît en rouge

Imposer le débit dans la transformation "vanne HP".
sur l'écran du diviseur.

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
vanne HP	0,95	0,95	271,09	2 788,99
vanne surch	0,05	0,05	271,09	2 788,99

Débits imposés dans le diviseur.

La deuxième méthode ne peut s'utiliser que lorsque le diviseur a deux branches. Il vaut mieux ici choisir cette méthode, car elle permettra dans la suite de réaliser des études de sensibilité sur ces débits.

Paramétrez et calculez maintenant les points et transformations de la branche principale HP jusqu'à l'échangeur "surchauffe vapeur":

- *Laminage "vanne HP"*: affichez le point de sortie B, réglez $P = 50$ bars. Calculez et sauvez.
- *Turbine HP*: rendement isentropique = 0,816. Réglez la pression de sortie: c'est la pression intermédiaire de 11 bars, sur laquelle on souhaite effectuer des analyses de sensibilité. Si vous ne disposez pas des pressions de contrôle, rentrez simplement la valeur de 11 bars dans le champ de la pression, sinon:
 - 1) Commencez par créer une pression imposée: dans l'écran du simulateur, cliquez sur le tableau des pressions imposées. Un écran de "pression de contrôle" apparaît. Entrez le nom de la pression (PI) et sa valeur (11). Sauvez. Dans l'écran du simulateur, le tableau des pressions imposées comporte maintenant un élément.

- 2) Ouvrez l'écran du point G (sortie de turbine). Pour régler sa pression, cochez "pression contrôlée", double-cliquez sur le champ vide qui apparaît au dessous, et choisissez "PI". Sauvez le point, calculez et sauvez la détente.

1 PRESSIONS IMPOSEES	
nom	valeur
PI	11

Pressions de contrôle dans l'écran du simulateur.

Système ouvert (T,P,h)		Système fermé (T,v,u)		Mélanges humides	
P (bar)	11	h (kJ/kg)	2 562,80466628		
<input checked="" type="checkbox"/> pression contrôlée	PI		<input type="checkbox"/> P et h connus	<input checked="" type="checkbox"/> P et T connus	
facteur de correction	1	exergie (kJ/kg)	812,1376		

Pression imposée pour le point G.

- *Nœud "sécheur"*: pour calculer ce séparateur, il faut indiquer quelle est la branche de sortie pour le liquide et celle pour la vapeur. Ouvrez les écrans des points d'entrée des transfos "surch vap" et "liq_turb_HP", et précisez leur titre, respectivement 1 et 0. Revenez au sécheur et calculez-le.
- *Echange "surchauffe vapeur"*: on ne peut pas calculer à ce stade la température du point de sortie, mais il faut indiquer une température arbitraire supérieure à la température d'entrée et calculer la variation d'enthalpie (positive) de la transformation, afin de préparer le calcul de l'échangeur, qui doit impérativement savoir quel est le fluide froid et quel est le chaud.

Paramétrez et calculez maintenant la branche de prélèvement de vapeur pour la surchauffe:

- *Laminage "vanne surchauffe"*: pression de sortie = 51,5 bars.
- *Transfo échange "surchauffe"*: on veut que le fluide chaud dans l'échangeur soit à l'état diphasique; en entrée, il se trouve déjà à T_{sat} , son titre valant quasiment 1. Réglez le point de sortie sur T_{sat} , et titre = 0, mais laissez ensuite la case "imposer Tsat" non cochée, afin que l'échangeur ne trouve pas lors de ses calculs une contrainte sur la température de sortie de ce fluide. Calculez la variation d'enthalpie (négative) de la transfo et sauvez. Dans le calcul de l'échangeur, la température de sortie du fluide chaud sera calculée en fonction des autres contraintes, notamment l'efficacité de celui-ci, et pourra donc être finalement plus basse que la température de condensation.

On peut maintenant paramétrer l'échangeur pour calculer les températures de sortie des fluides chaud et froid. Imposez l'efficacité de l'échangeur à 0,8 ainsi que les températures d'entrée et les débits: cela fait bien 5 contraintes. Thermoptim calculera les deux températures de sortie.

Terminez le paramétrage et le calcul des derniers éléments:

- *Laminage "bâche surchauffe"*: détente à 11 bars.
- *Turbine BP*: détente à 0,07 bar (créez une pression imposée BP valant 0,07 bar), rendement isentropique égal à 0,85.
- *Condenseur* à 0,07 bar.
- *Pompe à extraction*: compression liquide à 15 bars, rendement isentropique = 0,9.
- *Laminage "bâche BP"*: détente à 11 bars.
- *Bâche alimentaire*: ne pas oublier de préciser la pression en sortie, 11 bars (Thermoptim ne le fait pas automatiquement).
- *Compression liquide*: à 70 bars, rendement isentropique 0,9.
- *Economiseur*.

Echangeur de chaleur

nom: type:

fluide chaud **fluide froid**

Tce (°C) imposé calculé
Tcs (°C) imposé calculé
mc imposé calculé
Cpc
DHC

non contraint
 pincement minimum DTmin
 efficacité imposée epsilon

Tfe (°C) imposé calculé
Tfs (°C) imposé calculé
mf imposé calculé
Cpf
DHF

UA
R
NUT
DTML

dimensionnement non nominal

Le cycle est maintenant entièrement calculé. Vérifiez (avec les "Outils de diagnostic" du menu "Spécial" par exemple, si vous disposez de ces outils) les énergies utiles et payantes:

Afficher les transfos sélectionnées

système ouvert
 système fermé
 énergie utile
 énergie payante
 énergie autre
 calcul direct
 calcul inverse
 débit imposé

nom	type
compression liquide	compression
turbine HP	détente
turbine BP	détente
pompe extraction	compression

Afficher les transfos sélectionnées

système ouvert
 système fermé
 énergie utile
 énergie payante
 énergie autre
 calcul direct
 calcul inverse
 débit imposé

nom	type
economiseur	échange
générateur	échange

Outils de diagnostic: afficher les énergies utiles et les énergies payantes.

Affichez le bilan:

Bilan	
efficacité	0,306658
énergie utile	772,51
énergie payante	2 519,12

Le rendement de ce cycle est de 30,7%, à comparer avec les 43% du cycle de Carnot correspondant. Nous pouvons maintenant faire varier les valeurs du débit du prélèvement, de la pression intermédiaire, et de la température (ou de la pression) au niveau du condenseur, pour déterminer leur influence sur le rendement global du cycle.

4.3. Influence des différents paramètres

Débit du prélèvement de vapeur pour la surchauffe

On s'aperçoit, soit en effectuant une analyse de sensibilité sur le débit, soit en calculant le bilan pour quelques débits, que la variation du débit du prélèvement pour la surchauffe entre 1% et 10% ne fait varier le rendement global que de moins de 0,5%. On pourrait donc penser que ce débit n'a pas d'influence, mais c'est parce que Thermoptim ne modélise pas la variation du rendement isentropique des turbines avec l'humidité de la vapeur qui y est détendue.

En effet, plus la surchauffe est faible, plus la vapeur sera humide dans la turbine BP, ce qui a pour effet de faire baisser le rendement isentropique de la turbine, donc ici aussi le rendement global. De plus les gouttelettes de liquide provoquent une abrasion des aubes de la turbine.

On a donc intérêt à régler le débit du prélèvement pour que la surchauffe soit importante. Un prélèvement de 8% amène à une température de la vapeur de 250°C en entrée de turbine BP (contre 230°C pour un prélèvement de 5% par exemple). Des prélèvements plus importants augmentent peu cette température, mais réduisent le débit dans la branche principale.

Pression intermédiaire

A rendement isentropique de turbine HP constant, la variation de la pression intermédiaire ne génère pas non plus dans Thermoptim de variation significative du rendement. (pas plus de 1%).

Par contre, pour la turbine réelle, le titre en fin de détente doit être le plus élevé possible. Le choix de la pression intermédiaire se fait donc essentiellement en fonction des caractéristiques de la turbine, ce qui n'est pas modélisé par Thermoptim. La valeur retenue est 11 bars.

Température de condensation

Le choix de la température (ou pression) du condenseur est par contre un paramètre très important, qui induit des variations importantes du rendement global. L'impact de la pression BP dans le condenseur peut être étudié grâce à l'outil "Analyses de sensibilité" du menu "Spécial".

Ouvrez l'écran "Analyses de sensibilité", cliquez sur "Afficher les éléments modifiables"; une liste de paramètres modifiables du cycle apparaît. Ce sont:

- des pressions de contrôle.
- des points sans prérequis, dont on peut modifier la température.
- des transformations à débit imposé, que l'on peut faire varier.

Sélectionnez la ligne de la pression BP.(double click). A droite, apparaît le message: "pression de contrôle | BP / pression P | valeur initiale 0,07". On veut étudier l'influence de cette pression entre les valeurs 0,01 et 0,07 bar ; rentrez la valeur 0,01 dans le champ "valeur minimale", 0,07 dans le champ "valeur maximale", et un incrément de 0,01. Appuyez sur "Itérer" ; ThermoOptim calcule et affiche les énergies utiles et payantes pour les valeurs de la pression demandées.

Analyses de sensibilité

Afficher les éléments modifiables

pression de contrôle | BP

pression P | valeur initiale : 0,06

valeur minimale : 0,01

valeur maximale : 0,07

incrément : 0,01

nombre maximum de recalculs : 10

valeur de test : 0,01

nom	type
PI	pression de contrôle
BP	pression de contrôle
N	point
A	point
b	point
f	point
null	point
K	point
1	point

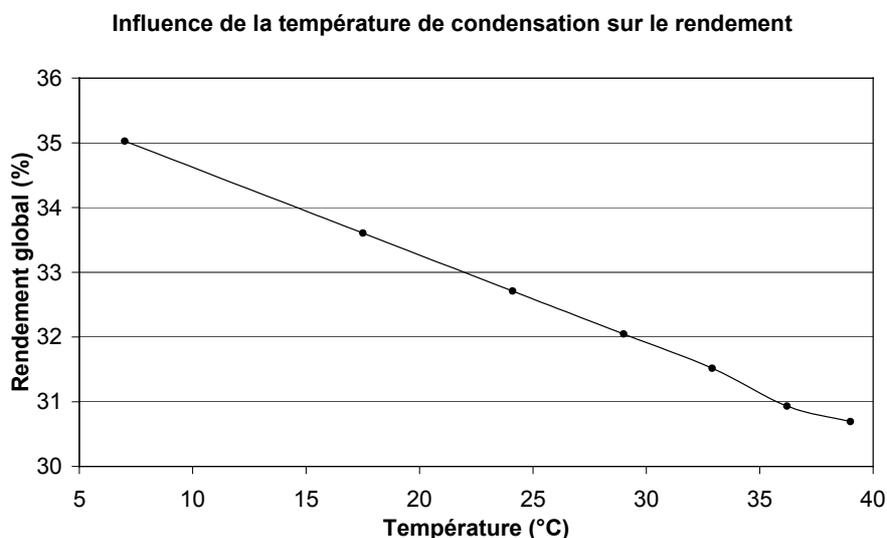
ANALYSE DE SENSIBILITE
 projet N4_II
 25 mai 2001 10 h 55 GMT+02:00

pression de contrôle | BP

pression P	utile	payante	itérations	précision
0,01	905,93	2585,97	3	0,000961714
0,02	857,01	2549,95	3	0,000940337
0,03	826,91	2549,95	2	0,000924655
0,04	804,56	2510,38	3	0,000904461
0,05	787,04	2496,97	3	0,000884905
0,06	772,66	2485,92	3	0,000865959
0,07	759,96	2476,03	3	0,0008476

Itérer Fermer

Vous pouvez ensuite continuer à travailler sur ces valeurs dans un tableur; sélectionnez le tableau de résultats, copiez-le et collez le dans un tableur. On a ainsi tracé la courbe représentant le rendement global en fonction de la température du condenseur :



Le rendement du cycle augmente significativement lorsque la température du condenseur baisse d'une dizaine de degrés. On voit là l'influence de la température de la source froide (cf Carnot)

De plus, le cycle réel comporte un certain nombre de prélèvements, qui améliorent de quelques % le rendement du cycle, mais que nous n'avons pas pris en compte pour des raisons de simplicité.

5) Fichiers de travail

Sont joints au dossier dans l'archive palierN4.zip les fichiers de projet et de schéma des modèles Thermoptim du cycle présenté ci-dessus.

