



Université d'été 2022
SAUVONS LE CLIMAT

LE CYCLE THERMODYNAMIQUE ET
L'ENVIRONNEMENT

JM MONTEIL

SOMMAIRE

1. Machine thermique
2. Optimisation source chaude - GTA
3. Qualité de l'énergie
4. Optimisation GTA - source froide
5. Fonctions de réchauffage et soutirage vapeur
6. Conclusion

Objectif de cette présentation :

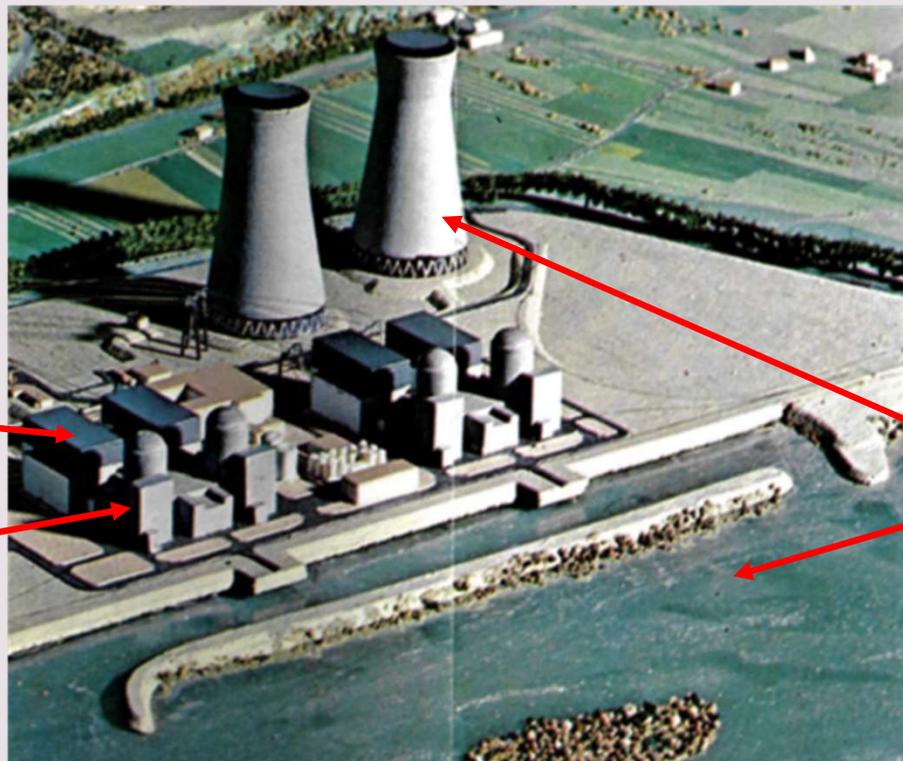
- Etablir le lien entre le cycle thermodynamique d'une machine thermique, telle une centrale, et l'environnement.
- Présenter les phénomènes théoriques sur lesquels il est possible d'influer pour **maximiser la production** d'électricité et **minimiser les rejets** dans le milieu ambiant
- Les contraintes réglementaires de :
 - Débit de prise d'eau
 - Température de rejet au milieu ambiant
 - Réchauffement du milieu ambiant
 - Dilution de tâche thermique
 - Dilution d'effluentsne sont pas abordées

1. Machine thermique

La machine thermique à laquelle nous nous intéressons se présente sous la forme suivante :

Moteur thermique

Source chaude



Source froide

1. Machine thermique

Analogie avec d'autres disciplines de la physique, notion de potentiel :

- Une ampoule, un moteur ont besoin d'une différence de potentiel (220V, 380V...) pour fonctionner (grandeur intensive : Tension)
- Un fluide ne se déplace que s'il est soumis à une différence de pression (grandeur intensive : Pression)
- Le moteur thermique ne peut fonctionner que s'il est soumis à une différence de températures (grandeur intensive : Température) :
 - ⇒ d'où les notions de source chaude (chaudière) et source froide (milieu ambiant) qui constituent les potentiels nécessaires pour le fonctionnement de l'installation

Les sources chaudes peuvent être : chaudière thermique fossile (fioul, charbon, gaz, biomasse), turbine à gaz, chaudière nucléaire, géothermie

Les sources froides sont le milieu naturel :

Eau : mer, rivière

Air : aéroréfrigérant (tirage naturel, tirage forcé), aérocondenseur

1. Machine thermique

Exemples de cycle thermodynamique sur un diagramme T S :

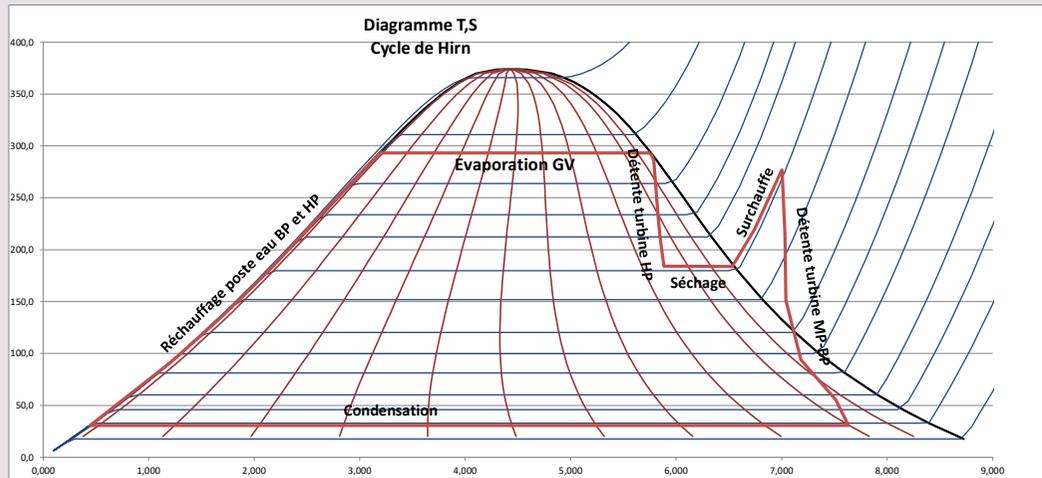
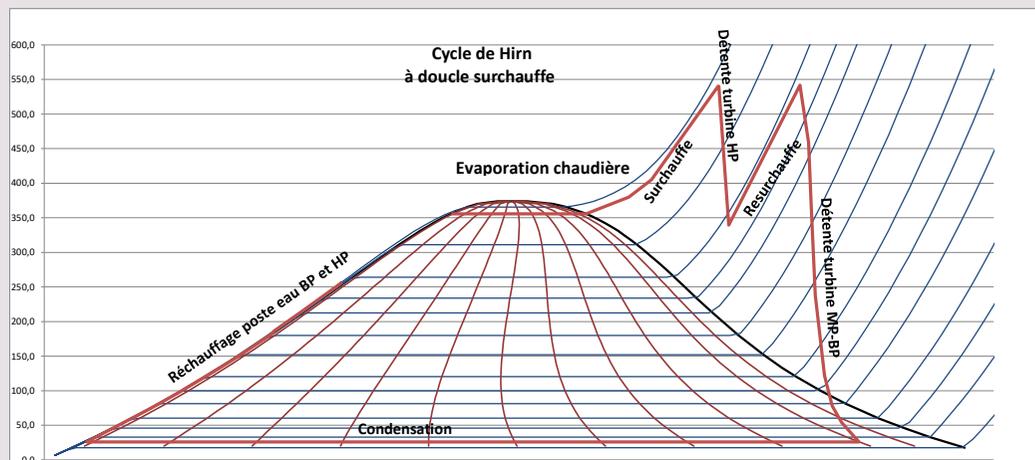
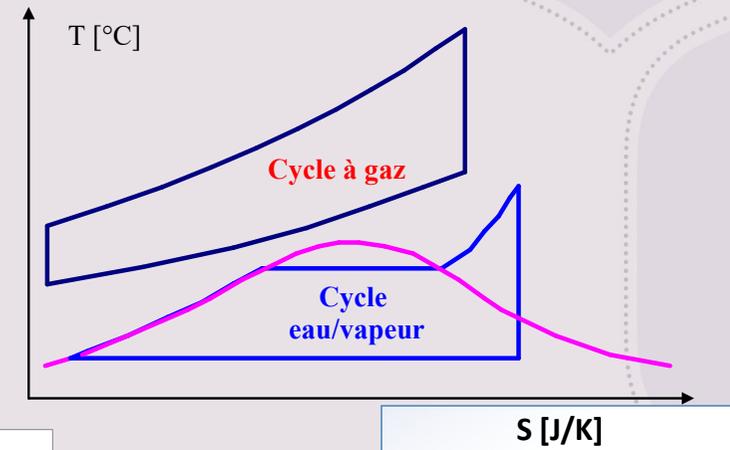
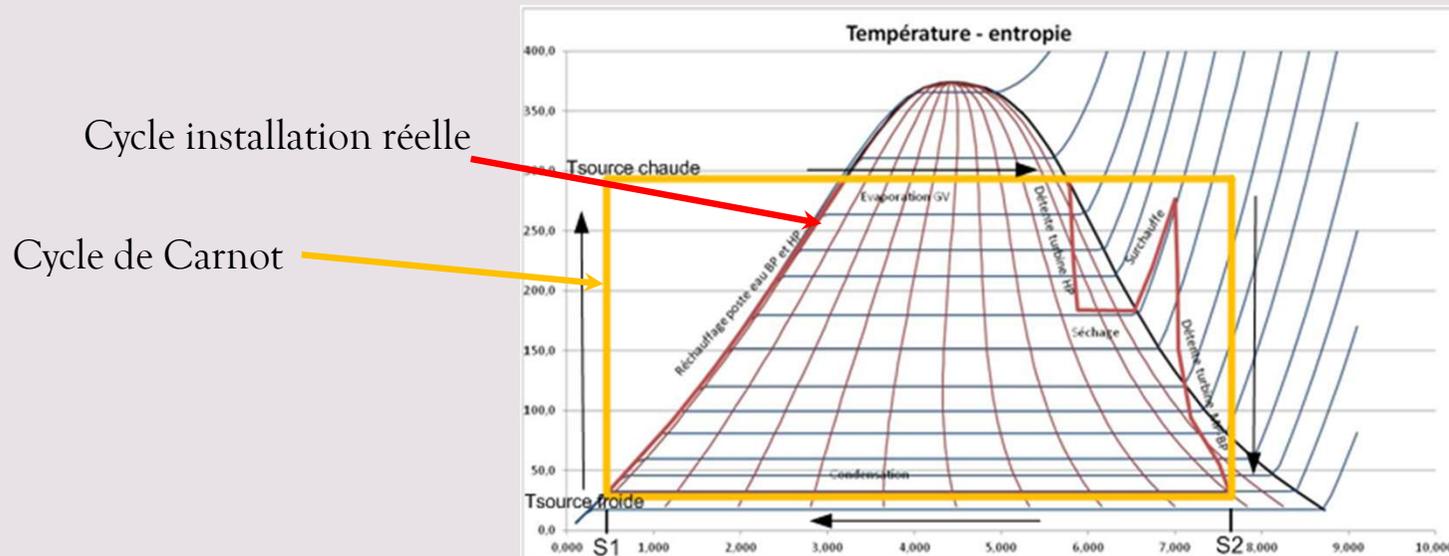


Diagramme d'un Cycle Combiné



1. Machine thermique

Comparaison entre un cycle réel et le cycle théorique de Carnot sur un diagramme T S :



- Ce cycle est idéal et donc enveloppe de ce que nous savons faire !
- Le rendement maximal est alors égal : $\eta = 1 - \frac{T_{sf}}{T_{sc}}$
- On le calcule comme le ratio de l'énergie récupérée sur l'énergie consommée :

$$\eta = \frac{(T_{sc} - T_{sf}) * (S_2 - S_1)}{T_{sc} * (S_2 - S_1)} = 1 - \frac{T_{sf}}{T_{sc}}$$

2. Optimisation source chaude - GTA

Maximisation de la température source chaude :

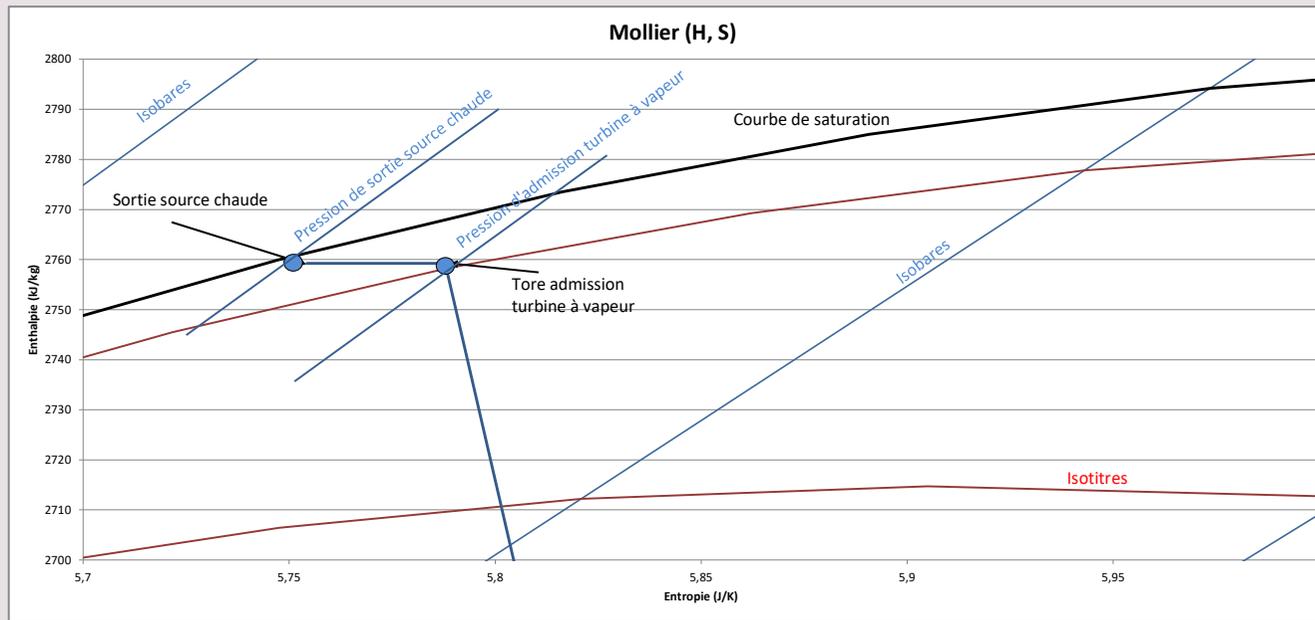
Compte tenu de la formule du rendement maximal : $\eta = 1 - \frac{T_{sf}}{T_{sc}}$ on a intérêt à maximiser la température de la source chaude.

| Nature | Caractéristique | Température | Pression |
|-------------------|--------------------|-------------|-----------------|
| Nucléaire (REP) | Vapeur saturée | 293°C | Max 78 bar |
| Thermique Fossile | Vapeur surchauffée | ~ 560°C | ~ 180 bar |
| Cycle combiné gaz | Vapeur surchauffée | ~ 560°C | ~ 130 - 140 bar |
| RNR | Vapeur surchauffée | 490°C | 177 bar |

Les contraintes liées à la tenue des matériaux à de fortes températures et pressions limitent le champ des possibles, notamment sur les REP.

2. Optimisation source chaude - GTA

En zoomant sur la zone d'intérêt sur un diagramme de Mollier (H,S) :

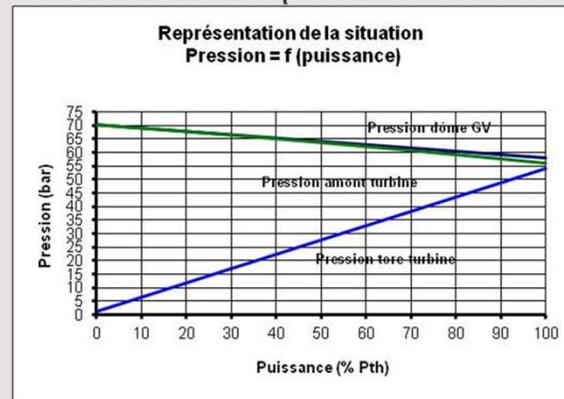


Le passage de la sortie de la source chaude à l'admission du tore de la turbine se fait par une détente isenthalpique sans émission de travail ni de chaleur. On ne parle pas de perte de puissance mais de dégradation de l'énergie par accroissement de l'entropie du système.

=> Il convient de réduire cette création d'entropie en minimisant la détente

2. Optimisation source chaude - GTA

- La détente est causée par les pertes de charge de liaison et le laminage des vannes d'admission de la turbine.
- Voici une représentation des évolutions respectives de ces deux mondes sur un diagramme Pression = f (Puissance)



- Chacun des deux mondes possède sa signature propre résultant de ses caractéristiques intrinsèques de dimensionnement thermo mécanique
- Deux solutions :
 - Relever la température de la source chaude mais les constructeurs sont confrontés à des contraintes de matériaux
 - Augmenter la pression requise à l'admission de la turbine

3. Qualité de l'énergie : l'exergie

- La minimisation de la distance (ou détente de la vapeur) passe par la diminution de la section de la veine vapeur de la turbine, de sorte à ce que la pression requise soit la plus importante (dans le domaine possible) et donc l'entropie de début de détente la plus faible possible.
- Cette optimisation est directement reliée à une notion théorique de qualité de l'énergie d'un point : l'exergie et son complément l'anergie
- Exergie = maximum d'énergie récupérable en un point
- Anergie = énergie irrécupérable en un point
- L'exergie en un point se définit comme $Ex = H - T_a \times S$ (T_a : température source froide)
- On maximise l'exergie du début de détente de la turbine en augmentant la pression requise au tore de la machine (pour un même débit vapeur), ce qui déplace le début de détente vers la gauche sur le Mollier vers les entropies plus faibles. En faisant ainsi, **on augmente l'exergie ou la part d'énergie récupérable sur l'installation** (plusieurs MW/bar sur de grosses installations)
- Mais cette optimisation ne peut pas être poussée à l'extrême car une installation nécessite des marges pour le fonctionnement (contraintes du réseau électrique, dérive des caractéristiques de la source chaude ...)

4. Optimisation GTA - source froide

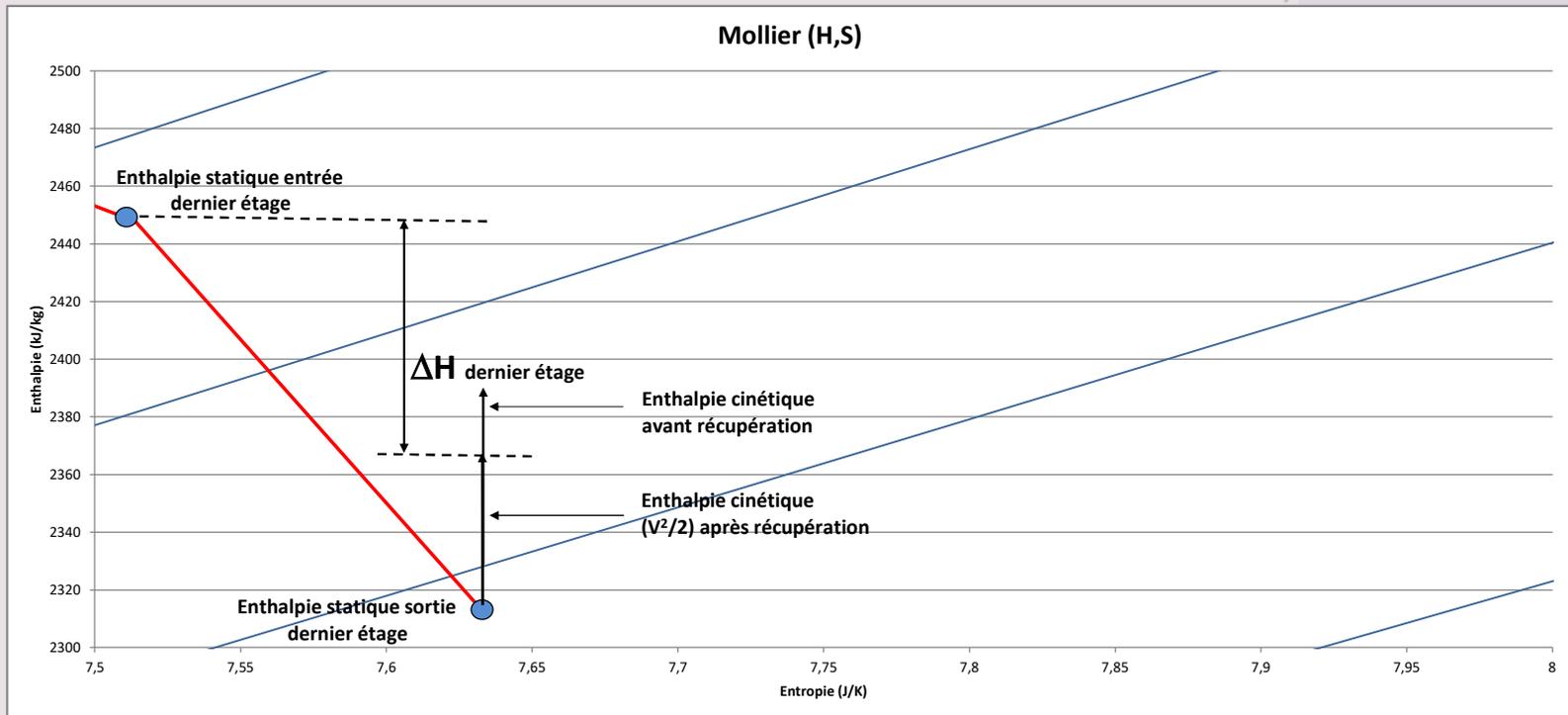
- Une machine thermique doit également adapter ses caractéristiques en fonction de la source froide avec laquelle elle va devoir fonctionner.
- On n'implante pas le même GTA :
 - dans le nord de l'Europe que dans des pays chauds,
 - sur une source froide bord de mer froide ou sur aéro réfrigérant
- Les études doivent, en fonction des contraintes environnementales et de la source froide potentielle, déterminer :
 - Les niveaux des températures potentielles de la source froide (fichiers météo)
 - Les fréquences d'occurrence de ces températures sur un cycle annuel
- De manière identique à l'optimisation de la section de la veine vapeur à l'admission de la turbine, l'optimisation avec la source froide passe par l'optimisation de la section d'échappement de la dite turbine associée à sa source froide.

4. Optimisation GTA - source froide

- Quels sont les phénomènes physiques impliqués ?
- La puissance mécanique délivrée par une turbine se calcule par la relation suivante : $P_{mécanique} = \sum_{i=1}^n Q_{vap_i} * \Delta H_i$
- i : étage de turbine à vapeur
- Sur la majorité des étages le terme ΔH_i se calcule comme la différence d'enthalpie statique (on néglige la variation de vitesse entre l'entrée et la sortie de l'étage ainsi que les termes potentiels)
- Sur le dernier étage, la sortie de la vapeur vers le condenseur se fait à des niveaux de vitesse importants
- Le terme ΔH_i est le résultat de la différence entre l'enthalpie statique (entrée) et totale (sortie)

4. Optimisation GTA - source froide

- Le terme ΔH_i est le résultat de la différence entre l'enthalpie statique (entrée) et totale (sortie)



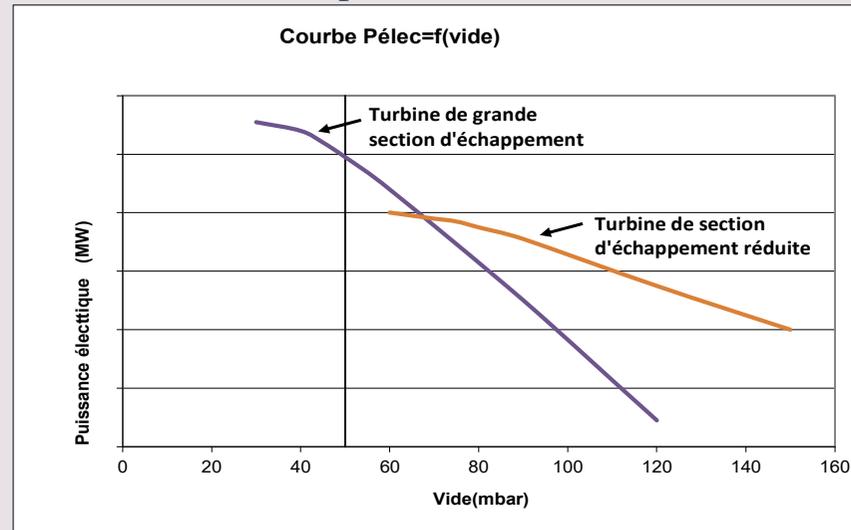
- La vitesse de la vapeur est d'autant plus importante que le vide au condenseur est bas
- La partie de vitesse non récupérable est aussi appelée « pertes par vitesse restante »

4. Optimisation GTA - source froide

- La vitesse de la vapeur est d'autant plus importante que le vide au condenseur est bas
- Pour maximiser ΔH_i sur le dernier étage, on insère un diffuseur en sortie de turbine. Il est chargé de réaliser une recompression qui diminue la vitesse de la vapeur vers le condenseur
- Le constructeur de turbines veut conserver des niveaux de vitesse axiale de sortie de dernière roue identiques => il adapte la section de la machine et le diffuseur, au niveau de vide ayant la fréquence d'occurrence la plus élevée

4. Optimisation GTA - source froide

- Cette optimisation conduit à l'obtention des courbes suivantes en fonction de la performance de la source froide (capacité à atteindre des vides poussés) :



- La puissance rejetée à la source froide = $P_{th_source\ chaude} - P_{elec}$ => on identifie la nécessité d'optimiser la section d'échappement de la turbine et le diffuseur pour minimiser les pertes à l'environnement
- A noter qu'un relèvement de la température de la source froide (à P_{th} constante) génère automatiquement :
 - une augmentation de la pression au condenseur et de la puissance rejetée,
 - une baisse de la puissance électrique

5. La fonction réchauffage de l'eau (optimisation du cycle)

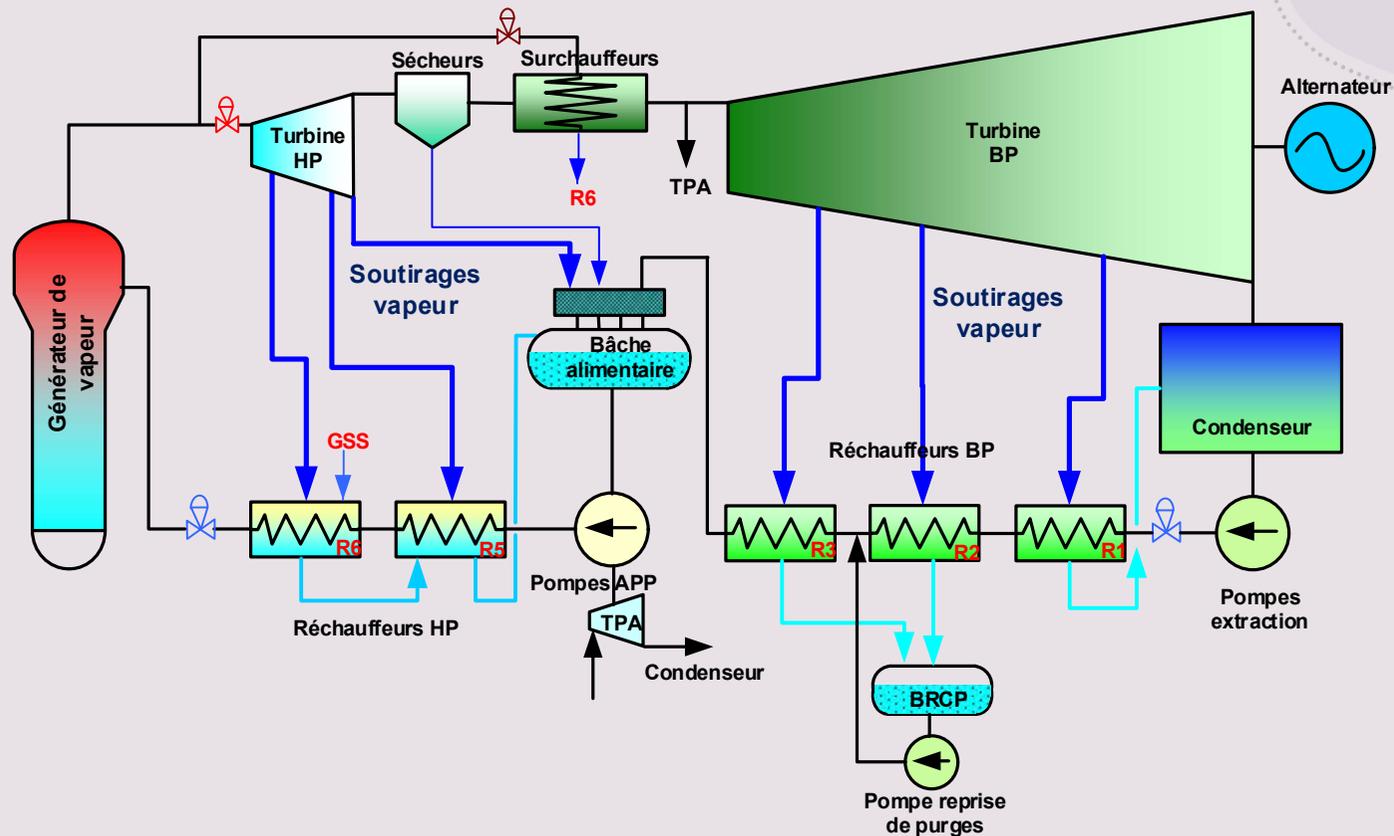
- Un élément important à connaître en thermodynamique :
 - Le chauffage d'un fluide par un autre fluide doit se faire avec des écarts de température minimisés. Si ce n'est pas le cas il s'ensuit une création d'entropie proportionnelle à l'écart de l'inverse des T des fluides.

$$- dS = dQ * \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

- Dans le cycle on va devoir porter de l'eau proche de la température de la source froide, à la température de la source chaude, afin de produire de la vapeur. La chauffe d'eau à 30°C par de l'eau à 300°C serait totalement dés optimisée.
- Le réchauffage par de la vapeur, dont la température est proche de celle de l'eau (30, 40°C), est possible grâce aux soutirages réalisés tout au long de la turbine.
- On obtient ainsi une chauffe progressive qui minimise les irréversibilités thermodynamiques et optimise le rendement.

5. La fonction réchauffage de l'eau (optimisation du cycle)

Exemple d'installation

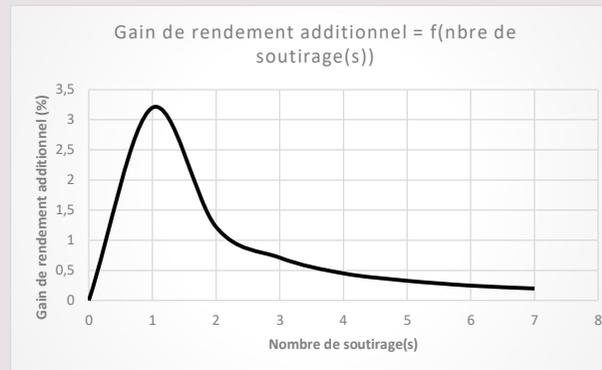
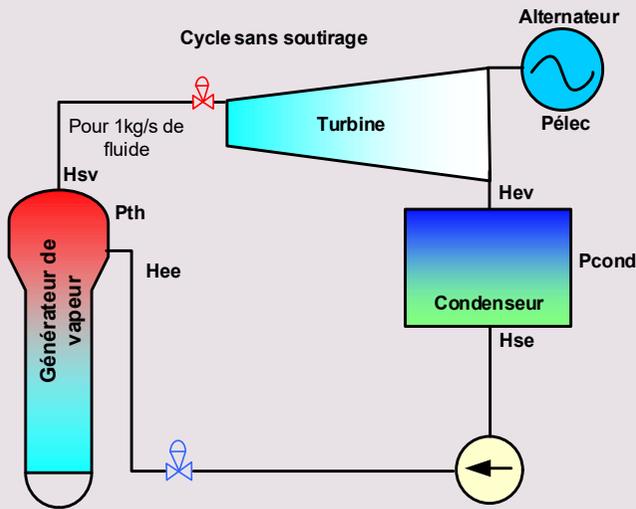


5. La fonction réchauffage de l'eau (optimisation du cycle)

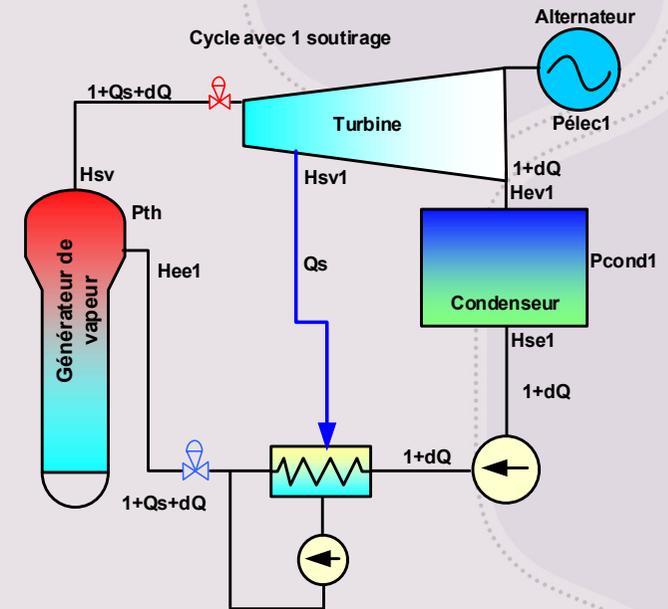
- Un cycle thermodynamique sans soutirage revient à :
 - Désoptimiser le réchauffage de l'eau vers la chaudière
 - Orienter tout le débit vapeur vers la source froide ce qui maximise la puissance transmise à cette dernière : $W_{sf} = Q_{vap} * (H_{vap\ f(titre)} - H_{sat_liquide})$
- Un cycle thermodynamique avec n soutirages contribue à :
 - Optimiser le réchauffage de l'eau vers la chaudière
 - Augmenter le débit vapeur à la turbine à Pth constante => hausse de Pélec
 - Diminuer la puissance transmise à la source froide :
 - $W_{sf} = (Q_{vap} - \sum_{i=1}^n Q_{sout_i}) * (H_{vap\ f(titre)} - H_{sat_liquide})$ en première approche sans termes de bouclage car Qvap augmente
- => Le nombre de soutirages est le résultat d'une optimisation technico économique : (capacité d'extraction de la vapeur au bon endroit en termes de température, coût des réchauffeurs....)

5. La fonction réchauffage de l'eau (optimisation du cycle)

Comparaison du rendement à P_{th} constante



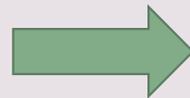
Gain de η à chaque soutirage supplémentaire



$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_{th}}$$

$$P_{elec} = (H_{sv} - H_{ev})$$

$$\eta = \frac{(H_{sv} - H_{ev})}{P_{th}}$$



$$\eta = \frac{P_{elec1}}{P_{th}}$$

$$P_{elec1} = (1 + Q_s + dQ)(H_{sv} - H_{sv1}) + (1 + dQ)(H_{sv1} - H_{ev1})$$

$$\eta = \frac{(1 + Q_s + dQ)(H_{sv} - H_{sv1}) + (1 + dQ)(H_{sv1} - H_{ev1})}{P_{th}}$$

Compte tenu des termes de rétroaction dans un cycle, cette approche constitue une simplification

5. La fonction soutirage vapeur (usage externe au cycle)

- Un cycle thermodynamique destiné à fonctionner en cogénération (production d'électricité et fourniture de vapeur à l'externe) est dimensionné spécifiquement pour :
 - Diminuer la puissance transmise à la source froide (soutirages à but interne + fourniture de chaleur)
 - Conserver une ligne de détente optimale de la turbine à vapeur (contre pression stable) même en présence de fourniture de vapeur à usage externe :
 - La section des étages inférieurs, à celui du prélèvement, s'adapte pour conserver une pression de soutirage ($T_{saturation}$) constante afin de ne pas déséquilibrer le réchauffage de l'eau et créer des irréversibilités importantes liées à la relation : $dS = dQ * \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$
 - La détente dans un étage est régie par l'équation de Stodola : $P_{amont}^2 - P_{ava}^2 = Ksto * Q_{vap}^2 * T$
 - $Ksto$ est une caractéristique de l'étage. Si on diminue le débit vapeur on modifie les pressions de détente et donc les températures dans les soutirages, d'où la désoptimisation du cycle sur ce point si la machine n'est pas, par conception matérielle, adaptée.
 - La causalité de la pression s'établissant depuis le condenseur, à turbine constante, les pressions chuteraient, sans dispositif adapté, dans la ligne de détente.

5. La fonction soutirage vapeur (usage externe au cycle)

- Pour un cycle thermodynamique destiné à fonctionner en cogénération (production d'électricité et fourniture de vapeur à l'externe) la production d'électricité est souvent dite **fatale**. La fourniture de chaleur est priorisée à celle d'électricité.
- Le rendement d'une telle installation est :
 - $$\eta = \frac{P_{elec} + \text{Puissance chaleur fournie}}{\text{Puissance thermique}}$$
- Sur une installation nucléaire de type REP le mode de pilotage actuel du réacteur n'est absolument pas adapté, sauf à recréer une loi de puissance totale additionnelle. La modification de la puissance électrique nécessiterait un recalibrage fréquent de la position de consigne des grappes du réacteur (contrainte d'essai périodique très lourde).
- La cogénération est un mode de fonctionnement qui doit être intégré **dès la conception** pour optimiser les matériels et le pilotage de tranches REP
- Vis-à-vis du consommateur de vapeur, cela nécessite un moyen de redondance 100% pour gérer les indisponibilités d'une tranche

6. Conclusion

- Le cycle thermodynamique d'une machine thermique, ou centrale de production d'électricité, doit forcément faire l'objet d'optimisations en fonction des caractéristiques :
 - **de la source chaude** afin de ne pas dégrader l'énergie avant même d'avoir démarré la détente de la vapeur dans le groupe turbo alternateur (optimisation de la veine vapeur à l'admission de la turbine)
 - **d'étagement** du réchauffage de l'eau (jusqu'à 7 niveaux)
 - **matérielles adaptées** à un fonctionnement en cogénération si c'est la destination principale de l'installation
 - **de la source froide** (optimisation dès la conception de la section d'échappement et du diffuseur de la turbine à vapeur en fonction de la fréquence d'occurrence du vide)
- pour :
 - **maximiser la performance énergétique**
 - **minimiser les rejets thermiques à l'environnement**

6. Conclusion

- Quelques ordres de grandeur de rendement de ce type d'installation

| Nature | Rendement (brut) |
|------------------------------------|--|
| Nucléaire REP | De 35 à ~ 39% |
| Thermique classique (700MW) | 45% |
| Cycle combiné (TAC + cycle vapeur) | ~ 55% en fct des sites (altitude et source froide) |
| RNR | 42% |

- Pour terminer avec une analogie, quant à la puissance rejetée à l'environnement, et son potentiel d'utilisation :
 - Ce n'est pas équivalent de disposer d'une puissance donnée sous une différence de potentiel de 380V ou de 3V !