

Descriptif
pour l'Exploitation
d'Installation Thermique
Vapeur

Juin 2007
Dominique TOUSSAINT



L'Eau : Equilibre entre liquide et vapeur

Suivant les conditions extérieures naturelles, l'eau apparaît sous trois états possibles : solide, liquide, et vapeur (gaz). Nous nous intéresserons essentiellement aux deux derniers. Partout, ces deux états sont présents simultanément, et interagissent pour évoluer d'un équilibre à l'autre.

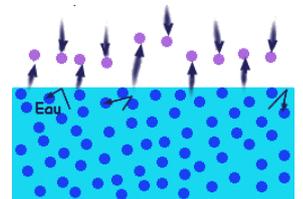
Voici comment cela s'imagine : en premier lieu l'eau, comme toute matière est constituée de molécules en agitation plus ou moins forte en fonction de leur température.

Il faut concevoir l'eau liquide, en bas, dans laquelle les molécules s'agitent et s'entrechoquent, mais restent prisonnières de l'ensemble. Forcément, de temps en temps, des molécules s'échappent de la surface de l'eau et deviennent donc du gaz, au dessus de l'eau.

Mais le phénomène inverse peut se produire : les molécules de la vapeur d'eau sont susceptibles d'être capturées par le liquide.

S'il y a assez de vapeur au dessus du liquide, il y a autant de gaz capté par le liquide, que de liquide qui s'évapore.

Il y a un équilibre. Cet équilibre est très important pour les propriétés physiques



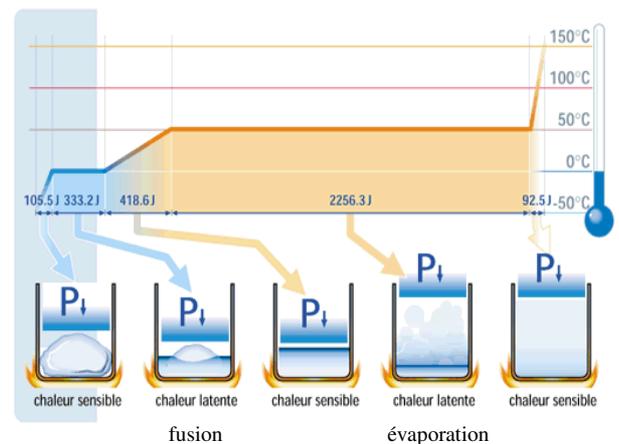
NB : Le zéro absolu est définit comme étant la température de 0°K (-273°C) à laquelle toutes les molécules de matière sont immobiles. Cela correspondrait à l'énergie intrinsèque = à zéro.

Le degré d'hygrométrie de l'air (ou titre de saturation vapeur) mesure -en fait- si on est proche ou pas de cet équilibre. A 100%, l'équilibre est atteint, cela signifie que l'air est saturé en vapeur d'eau : l'eau liquide ne s'évaporer pas. L'eau sera en équilibre avec la vapeur contenue dans l'air. En dessous de 100%, ce qui est tout de même la règle dans notre climat, l'eau liquide laissée à elle-même s'évaporer naturellement. C'est pour cela que le linge peut sécher à l'air libre. Ce n'est pas le cas dans des régions chaudes et très humides (proches de lagons ou mangroves), ou alors très froides et humides (permafrost), où l'air y est saturé en vapeur à presque 100%.

L'évaporation est le passage d'une substance, de la phase liquide à sa phase gazeuse. Comme toutes les matières, l'eau est constituée de molécules qui s'attirent mutuellement et vibrent plus ou moins fort selon leur niveau d'énergie, celui-ci est d'autant plus grand que la température est élevée. A contrario, la force d'attraction des molécules du liquide (indépendante de la température) rend difficile l'échappement des molécules de la surface du fluide vers l'atmosphère.

Pour vaporiser de l'eau, il faut permettre aux molécules d'eau d'échapper à l'attraction de leurs voisines. Il faut donc augmenter leur agitation, c'est à dire leur fournir de l'énergie. Ceci signifie que lorsque des molécules d'eau s'échappent du liquide, elles emportent avec elles une part de l'énergie prise au plus près d'elles. C'est-à-dire : soit dans le liquide qui reste, soit dans l'air ambiant. C'est cette énergie qu'on appelle l'énergie de changement de phase ("latente")

Le flux d'énergie occasionné par un changement de phase durant un transfert convectif est appelé "**chaleur latente**". C'est l'énergie absorbée ou dégagée par un corps lors d'un changement de phase. Ainsi la fusion, la vaporisation (ou la sublimation) requièrent un apport d'énergie alors que la solidification et la condensation (liquide comme solide) libèrent de l'énergie.



La chaleur latente est à différencier de la "chaleur sensible" qui représente l'énergie absorbée ou dégagée lors de l'évolution de la température d'un corps sans changement d'état physique. (réchauffer la glace avant qu'elle ne fonde et réchauffer l'eau avant qu'elle ne s'évapore)

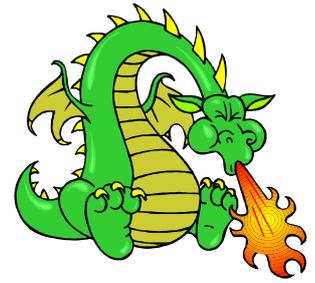
Un bon exemple, c'est la sueur : Quand il fait très chaud, on sue, notre peau se mouille et en s'évaporant, l'eau nous prend de la chaleur. Elle nous refroidit. C'est pour cette raison que les ventilateurs sont rafraîchissants : ça n'est pas qu'ils rendent l'air plus froid, c'est juste qu'ils amènent de l'air sec jusqu'à notre peau, et donc facilitent l'évaporation de la sueur.

C'est comme quand on court : quand on s'arrête on a plus chaud qu'en courant, où l'on rencontre de l'air sec, qui fait s'évaporer notre sueur. En s'arrêtant, l'air au contact de la peau se renouvelle moins, il est saturé en eau, l'évaporation n'est pas efficace, et on a la sensation d'avoir plus chaud.



Quand on dit que le temps est "lourd", c'est qu'en fait, l'air est saturé en eau.

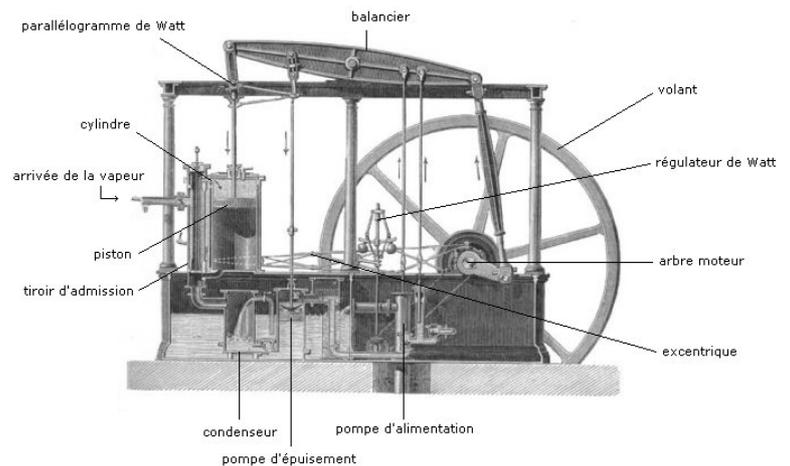
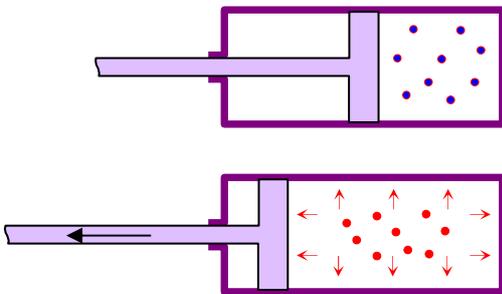
La Thermodynamique est une branche de la physique qui étudie la transformation de la chaleur en travail,... et sa réversibilité.



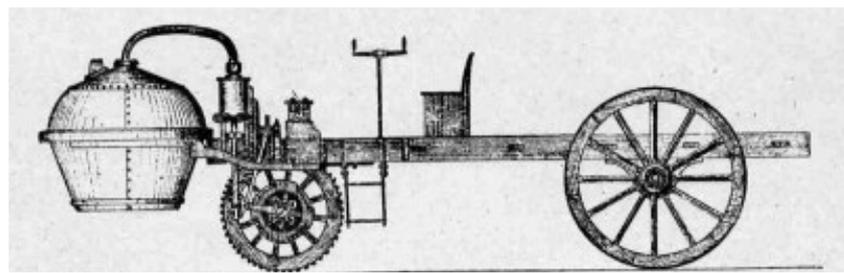
"La chaleur est le mouvement désordonné des molécules d'un corps"

Pour obtenir du travail, il faut donner un sens à ce mouvement en contraignant les molécules à se déplacer vers une direction à l'aide d'une machine. C'est donc donner un ordre à l'agitation de la matière.

Pour transformer de la chaleur en travail, on peut changer le volume d'un corps en le chauffant ou en le refroidissant et utiliser ce changement pour pousser sur un autre corps.



Machines de WATT



Un autre comportement intéressant est celui de la transition solide - liquide.

En effet si l'on prend de la glace et qu'on augmente la pression on voit qu'elle va fondre.

C'est ainsi que sous la pression d'un patin sur la glace celle-ci va fondre et le patineur évoluera sur un film d'eau liquide. L'eau sur la glace, se re-solidifiera derrière le patin. Pour une température donnée le passage d'un état à l'autre ne peut se faire qu'à un couple pression et température donné (et inversement).

En 'thermodynamique', l'Eau (comme les autres corps purs) sera caractérisée de certaines propriétés physiques importantes :

Son état => solide (glace, cristaux neige...) ;
liquide, mais aussi bruine, brouillard aérosol etc...;
émulsion : liquide + vapeur ;
vapeur : gaz vapeur saturée ou vapeur sèche (surchauffée)

son milieu => Pression, température

son volume => volume spécifique ou masse spécifique (*expressions rigoureusement inverses*)

l' Enthalpie => énergie qu'elle a accumulé à partir du "zéro absolu" pour parvenir à son état donné (état & pression & temp.). Exprimée en kJ/kg les valeurs d'enthalpie des différentes évolutions s'additionnent et se soustraient. C'est la donnée qui caractérise son énergie potentielle. C'est la valeur qu'on utilise le plus pour faire les bilans énergétiques et les dimensionnements des machines.

l'Entropie => énergie perdue lors d'une évolution. Elle s'apparente au frottement des pièces dans une machine mécanique, c'est "l'irréversibilité". Comme si les molécules que l'on chauffe perdaient de l'énergie par frottement entre elles. Exprimée en "kJ / °K . kg". Cette grandeur aussi se cumul.

La table des données physiques de l'eau montre l'échelle des grandeurs et les particularités très atypiques de ce corps que l'on croit connaître si bien, et qui nous apparaît si simple...

Notamment :

- Le poids spécifique maximum de l'eau n'est pas à 0°C , ni à 0°K mais à 3,98°C
- A plus de 374,2°C et 221 bar, point dit "critique", l'eau liquide et la vapeur ont la même densité, la même chaleur latente et la même entropie. On dit que le fluide est "hyper-critique". Il n'y a plus de séparation de phase entre le liquide et le gaz. Cet état permet d'augmenter le rendement thermique d'une chaudière au regard de l'énergie disponible par une source de chaleur très élevée (notamment nucléaire).
En conséquence : pas de surface de séparation de phase (primage, ciel vapeur...). Un tel générateur ne peut fonctionner qu'en circulation forcée.
(Actuellement 300 bar / 600°C ; objectif des installations les plus innovantes = 350 bar / 720°C)
- Dans la zone normale, la chaleur de l'eau est croissante avec la température alors que celle de la vapeur est décroissante. Donc plus on monte en pression dans les installations (pour un meilleur rendement des turbines) plus il faut envisager de solutions technique pour l'économie de la chaleur nécessaire à la phase liquide
(Cf. le § trois pages ci-dessous, intitulé "installation avec sous-tirage")

Petit calcul à partir de la table des données physiques de l'eau et la vapeur =>
 Pour réchauffer un kilo d'eau de 15°C à 200°C il faudra 796 kJ et
 pour évaporer ce kilo d'eau en vapeur à 200° il faudra 1 935 kJ.
 Soit 2,5 fois plus.



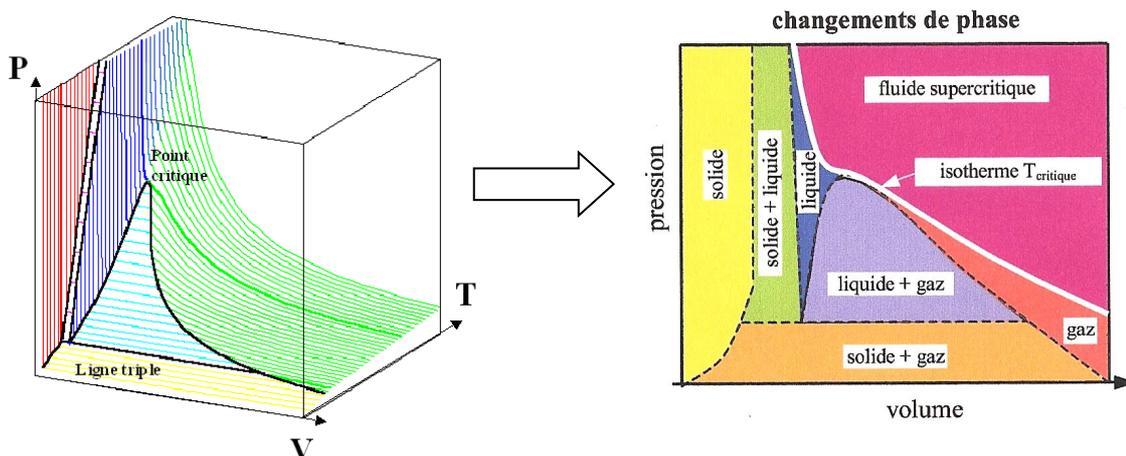
"TABLE VAPEUR"

| Pression bar | Température °C | masse volumique kg / L | | Enthalpie massique kJ / kg | | | Entropie massique kJ / °K.kg | |
|---|-------------------|---------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|--------|
| | | liquide | Vapeur | Chauffe liquide de 0=>T° | Evaporation | kJ / °C.kg Surchauffe / 1°C | liquide | vapeur |
| <i>Absolue (// vide)</i> | | | | | | | | |
| 0,008 | 3,98 | 1,00 | 0,00001 | 16,9 | 2 491,1 | | 0,061 | 9,050 |
| 0,3 | 69,1 | 0,97 | 0,00019 | 289,2 | 2 336,1 | | 0,944 | 7,765 |
| 0,5 | 81,3 | 0,97 | 0,00031 | 340,5 | 2 305,4 | | 1,091 | 7,593 |
| 0,8 | 91,8 | 0,96 | 0,00045 | 384,4 | 2 278,6 | | 1,213 | 7,456 |
| 1,0 | 98,2 | 0,95 | 0,00056 | 411,4 | 2 261,8 | | 1,287 | 7,375 |
| <i>Relative // atmosphère (effective)</i> | | | | | | | | |
| 0,0 | 100,0 | 0,96 | 0,0006 | 419,0 | 2 257,0 | | 1,307 | 7,355 |
| 0,1 | 102,7 | 0,95 | 0,0007 | 430,2 | 2 250,2 | | 1,337 | 7,322 |
| 0,2 | 105,1 | 0,95 | 0,0007 | 440,8 | 2 243,4 | | 1,313 | 7,295 |
| 0,3 | 107,4 | 0,95 | 0,0008 | 450,4 | 2 237,2 | | 1,316 | 7,268 |
| 0,4 | 109,6 | 0,94 | 0,0008 | 459,7 | 2 231,3 | | 1,319 | 7,242 |
| 0,5 | 111,6 | 0,95 | 0,0009 | 468,3 | 2 225,6 | | 1,452 | 7,220 |
| 0,6 | 113,6 | 0,94 | 0,0009 | 476,4 | 2 220,4 | | 1,493 | 7,198 |
| 0,7 | 115,4 | 0,95 | 0,0010 | 484,1 | 2 215,4 | | 1,478 | 7,179 |
| 0,8 | 117,1 | 0,94 | 0,0010 | 491,6 | 2 210,5 | | 1,497 | 7,159 |
| 0,9 | 118,8 | 0,93 | 0,0011 | 498,9 | 2 205,6 | | 1,515 | 7,141 |
| 1,0 | 120,4 | 0,92 | 0,0011 | 505,6 | 2 201,1 | | 1,532 | 7,125 |
| 1,5 | 127,6 | 0,98 | 0,0014 | 536,1 | 2 181,0 | | 1,610 | 7,050 |
| 2,0 | 133,7 | 0,92 | 0,0017 | 562,2 | 2 163,3 | 2,20 | 1,675 | 6,990 |
| 3,0 | 143,8 | 0,91 | 0,0022 | 605,3 | 2 133,4 | 2,27 | 1,801 | 6,895 |
| 4,0 | 152,0 | 0,87 | 0,0027 | 640,7 | 2 108,1 | 2,33 | 1,862 | 6,820 |
| 5,0 | 158,9 | 0,89 | 0,0032 | 670,9 | 2 086,0 | 2,39 | 1,932 | 6,759 |
| 6,0 | 165,0 | 0,90 | 0,0037 | 697,5 | 2 066,0 | 2,44 | 1,993 | 6,708 |
| 7,0 | 170,5 | 0,89 | 0,0042 | 721,4 | 2 047,7 | 2,50 | 2,047 | 6,593 |
| 8,0 | 175,4 | 0,89 | 0,0047 | 743,1 | 2 030,9 | 2,55 | 2,095 | 6,627 |
| 9,0 | 180,0 | 0,86 | 0,0052 | 763,0 | 2 015,1 | 2,59 | 2,140 | 6,647 |
| 10,0 | 184,1 | 0,86 | 0,0057 | 781,6 | 2 000,1 | 2,64 | 2,180 | 6,553 |
| 11,0 | 188,0 | 0,86 | 0,0061 | 798,8 | 1 986,0 | 2,69 | 2,217 | 6,523 |
| 12,0 | 191,7 | 0,87 | 0,0066 | 815,1 | 1 972,5 | 2,73 | 2,252 | 6,494 |
| 13,0 | 195,1 | 0,87 | 0,0071 | 830,4 | 1 959,6 | 2,78 | 2,284 | 6,469 |
| 14,0 | 198,4 | 0,85 | 0,0076 | 845,1 | 1 947,1 | 2,82 | 2,315 | 6,444 |
| 15,0 | 201,5 | 0,86 | 0,008 | 859,0 | 1 935,0 | 2,86 | 2,345 | 6,421 |
| 20,0 | 215,0 | 0,82 | 0,011 | 920,3 | 1 880,2 | 3,02 | 2,471 | 6,321 |
| 25,0 | 226,1 | 0,83 | 0,013 | 972,1 | 1 831,4 | 3,22 | 2,574 | 6,241 |
| 30,0 | 235,8 | 0,81 | 0,016 | 1 017,0 | 1 787,0 | 3,41 | 2,663 | 6,172 |
| 35,0 | 244,3 | 0,78 | 0,018 | 1 057,7 | 1 745,5 | 3,59 | 2,741 | 6,112 |
| 40,0 | 251,9 | 0,78 | 0,021 | 1 094,6 | 1 706,3 | 3,78 | 2,811 | 6,058 |
| 45,0 | 258,8 | 0,76 | 0,023 | 1 228,7 | 1 668,9 | 3,97 | 2,875 | 6,009 |
| 50,0 | 265,3 | 0,77 | 0,026 | 1 160,8 | 1 632,8 | 4,17 | 2,933 | 5,964 |
| 60,0 | 276,7 | 0,74 | 0,031 | 1 218,9 | 1 564,4 | 4,58 | 3,038 | 5,881 |
| 70,0 | 286,9 | 0,72 | 0,037 | 1 272,1 | 1 498,7 | 5,03 | 3,132 | 5,807 |
| 80,0 | 296,0 | 0,71 | 0,043 | 1 321,5 | 1 435,0 | 5,54 | 3,217 | 5,737 |
| 90,0 | 304,2 | 0,65 | 0,05 | 1 367,8 | 1 372,7 | 6,10 | 3,294 | 5,672 |
| 100,0 | 311,8 | 0,66 | 0,06 | 1 411,9 | 1 310,9 | 6,74 | 3,368 | 5,608 |
| 110,0 | 318,8 | 0,61 | 0,06 | 1 454,3 | 1 249,3 | | 3,437 | 5,547 |
| 120,0 | 325,4 | 0,65 | 0,07 | 1 495,4 | 1 187,3 | | 3,504 | 5,410 |
| 130,0 | 330,8 | 0,62 | 0,15 | 1 526,1 | 1 139,9 | | 3,561 | 5,445 |
| 140,0 | 336,6 | 0,59 | 0,22 | 1 559,8 | 1 086,2 | | 3,623 | 5,374 |
| 150,0 | 342,1 | 0,56 | 0,28 | 1 594,7 | 1 027,2 | | 3,684 | 5,313 |
| 175,0 | 354,6 | 0,42 | 0,57 | 1 671,1 | 893,8 | | 3,834 | 5,152 |
| 200,0 | 365,7 | 0,45 | 0,26 | 1 817,0 | 604,0 | | 4,013 | 4,931 |
| 221,3 | 374,2 | 0,31 | 0,31 | 2 100,0 | 0,0 | | 4,296 | 4,296 |

Diagrammes

Afin d'illustrer les rendements énergétiques (chaleur et cinétique) des évolutions de l'eau dans les machines, quelques schémas sont intéressants pour mesurer directement et graphiquement les enjeux.

Le diagramme en P//V dit "de phase" ou "de Clapeyron" qui montre l'état de l'eau suivant sa pression et la température.



Le point 'triple' précise la pression et la température pour lesquelles on peut avoir coexistence des 3 états (0,01°C et 611 Pa)

NB : 611 Pa c'est une pression très faible : 1 Atm. = 10 130 Pa

Représentation d'un cycle sur un diagramme

(la courbe noire représente la saturation)

Par exemple :

De E vers A : il s'agit d'une pompe
Compression sans échange de chaleur (*presque*)

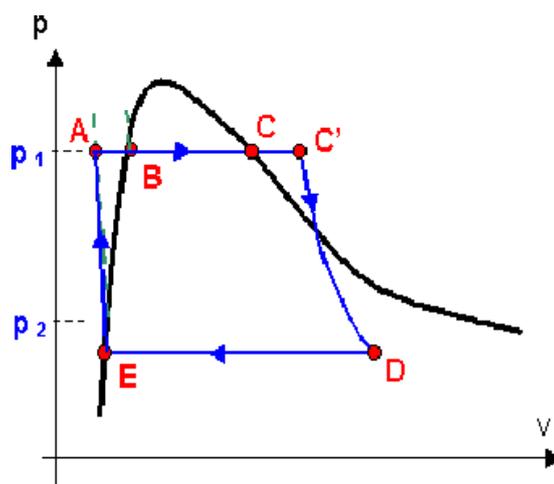
De A vers C puis C' : il s'agit de la chaudière

A->B chauffage de l'eau ; B->C évaporation ;

C->C' Surchauffe vapeur

De C' vers D : détente dans une turbine

De D vers E : Condensation et refroidissement dans un "aéro"



Le diagramme en T-S

Il est surtout utilisé à des fins pédagogiques : sur un tel diagramme, le cycle de Carnot est simplement représenté par un rectangle. Il a l'avantage de représenter la quantité de chaleur échangée, par la surface sous la courbe du processus correspondant. Donc la représentation graphique d'un cycle donne le rendement directement en surfaces

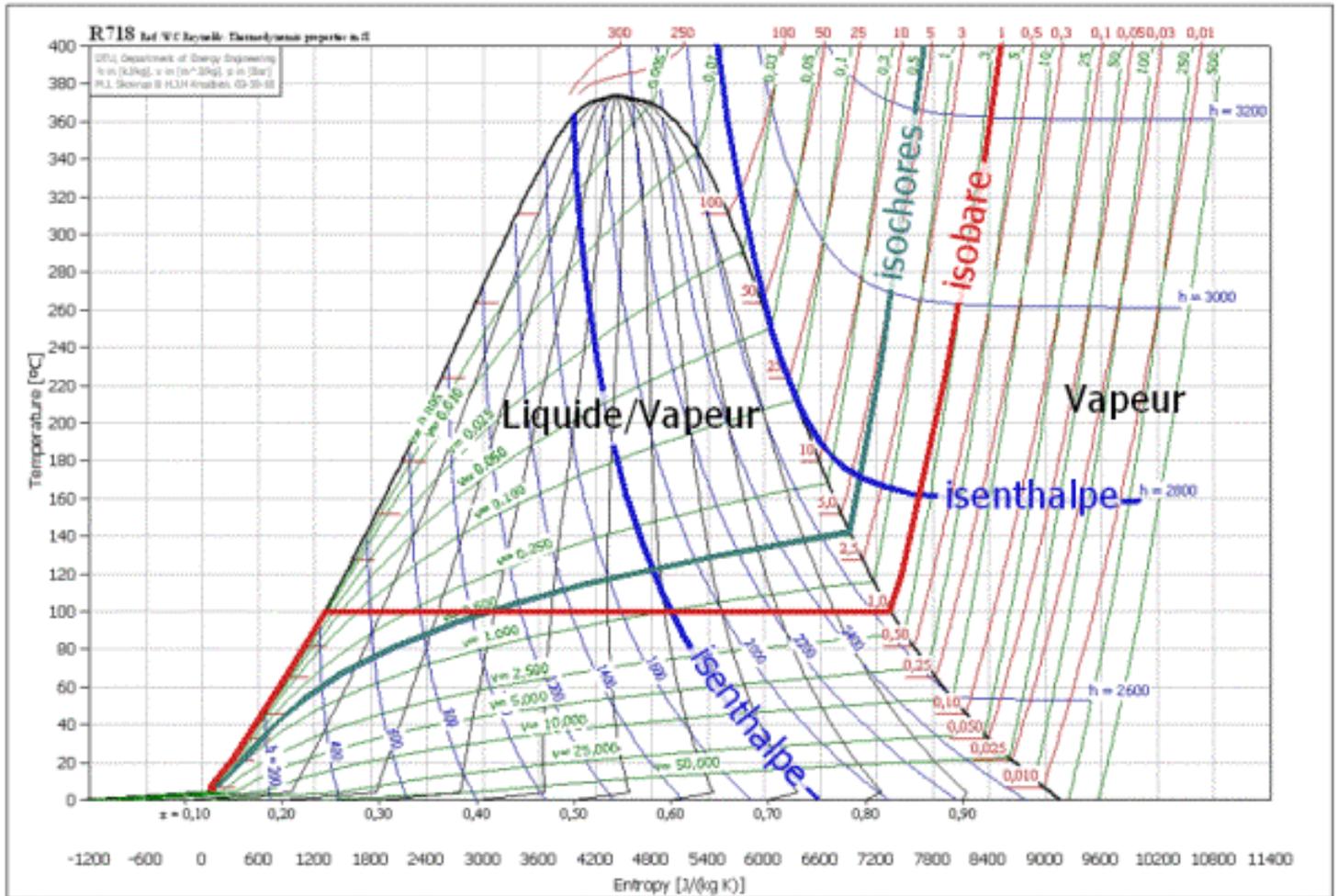


Diagramme Ts de l'eau

Les isenthalpes correspondent à une évolution à enthalpie constante, dans un détendeur, ou une vanne (pas d'échange de chaleur).

Les isobares correspondent à des évolutions à pression constante, qui sont réalisées en première approximation dans un échangeur thermique.

Les isochores permettent de déterminer le volume spécifique du fluide, paramètre essentiel pour le calcul des débits volumiques circulant dans les machines (et donc des tuyaux).

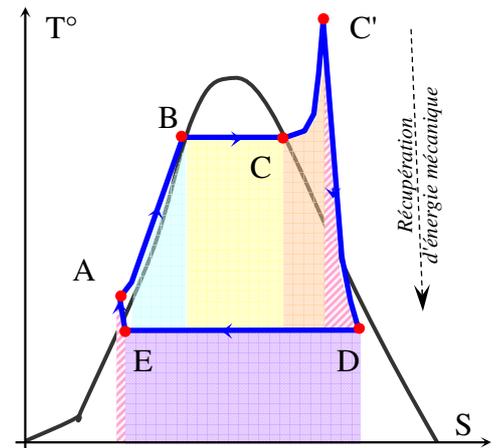
Les isentropes : transformation dans une turbine, sont représentées par des verticales

Les isothermes : transformation dans un évaporateur ou dans un condenseur, sont représentées par des horizontales.

Ce diagramme est particulièrement adapté à la description des évolutions par les machines. On représente ainsi le cycle de Carnot :

L'exemple pré-cité devient

-  Chaleur Sensible de l'eau
-  Chaleur Latente de vaporisation
-  Chaleur sensible Vapeur surchauffée
-  Chaleur Latente de Condensation
-  Pertes par entropie pompe & turbine (imparfaites)



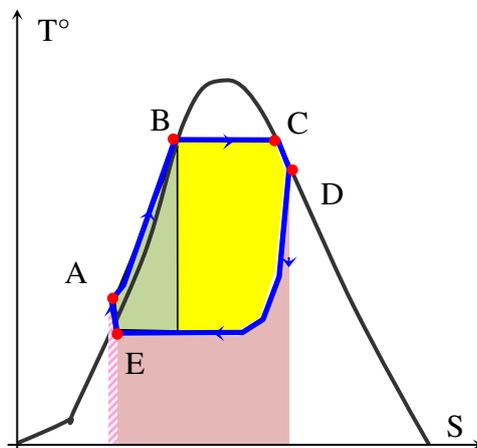
Cas particuliers :

Exemple d'une installation consommant uniquement de la chaleur (vapeur saturée)

Sans utilisation mécanique (électricité)
le trajet C→D correspond aux pertes en charge du rack de transport et à la détente de la vanne de réglage

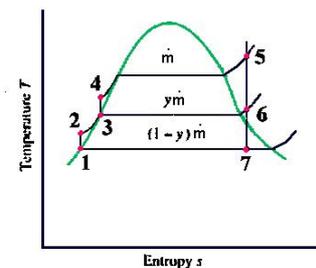
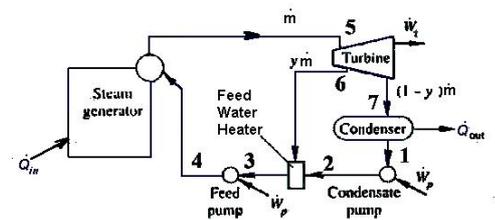
La chaleur fabriquée est la somme des zones  + 

La chaleur récupérée pour chauffage est la zone 



Exemple d'une installation avec Sous-tirage :

Le trajet 1→3 est + économique en vapeur désurchauffée (dont on a récupéré le potentiel mécanique) qu'en chauffage fioul par la chaudière
De plus on réduit le volume au condenseur



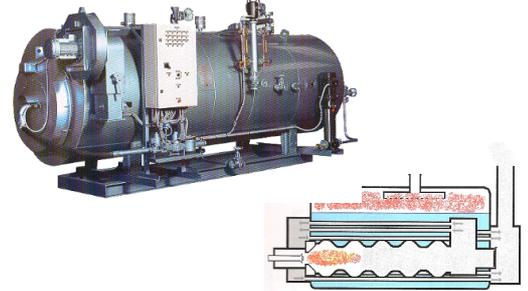
Constructions mécaniques

On vient de voir les atouts importants de la vapeur d'eau afin d'utiliser ou de déplacer de grandes quantités d'énergie. Parallèlement un certain nombre de contraintes mécaniques importantes sont à prendre en compte. Notamment la pression maximum de service d'une installation s'appelle le "Timbre" (il constitue une déclaration réglementée).

Les générateurs

Deux grandes familles de chaudières : "à tubes d'eau" ou "à tubes de fumée".
La différence est colossale pour la sécurité l'environnement d'exploitation

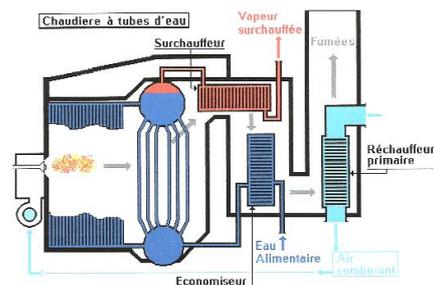
- Les chaudières à tubes de fumée sont de grandes cocottes remplies d'eau, et traversée de tubes dans lesquels on fait circuler les flammes et la fumée. Ces constructions sont plus adaptées aux unités moyennes car elles sont de construction plus simple et moins onéreuse. Cependant le risque est plus important puisqu'il s'agit d'un récipient monobloc sous pression qui peut exploser en cas de disfonctionnement.



- Les chaudières à tubes d'eau permettent de développer de très importantes surfaces d'échange thermique, à une exploitation sous très haute pression et conviennent pour de grosses unités de fortes productions.

L'intérêt majeur de cette technique réside dans l'adaptation à toute forme de foyer et de combustibles. On disposera ainsi en fonction des températures de combustion aux différents emplacements du foyer :

Le ou les surchauffeurs ; les évaporateurs ; puis les économiseurs et les pré-chauffeurs de soutirage.



Dans les deux cas, la conduite de ces installations nécessite un entretien rigoureux.

En effet tout encrassement agit comme une réduction de la capacité d'échange thermique et se ressent par une baisse de performance et l'augmentation des températures de rejets.

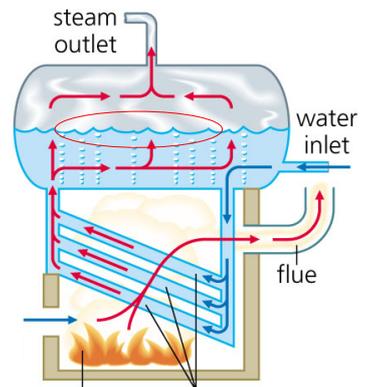
Le second point indispensable est de garantir le niveau de l'eau dans la chaudière. Nous avons vu l'énorme différence entre les chaleurs latente de vaporisation et chaleur sensible eau ou vapeur. Ainsi une chaudière en cas de manque d'eau se trouverait très rapidement détériorée par le maintien du foyer, car la vapeur seule présente, ne pourrait en aucun cas évacuer la chaleur du foyer, et le métal n'y résisterait pas. Il faut aussi intégrer l'inertie thermique des grands foyers qui peut suffire à fondre le métal.

Contraintes sur le niveau d'eau

Nous avons vu qu'une chaudière en fonctionnement est sur une isobare / isotherme de la courbe de vaporisation. Cela signifie que la chaudière et les tubes contiennent de l'eau sous ses 3 états simultanément : liquide ; vapeur ; et émulsion liquide+vapeur.

Une chaudière classique (hors point critique) est donc toujours constituée d'un ballon horizontal suffisamment grand pour créer une large surface destinée à la séparation entre eau et vapeur (on dit "ciel de vapeur").

Le maintien permanent d'un niveau précis passe aussi par une régulation qui saura s'adapter aux perturbations des trois composants.



L'eau est quasiment insensible aux variations de pression, alors que l'émulsion se dilate ou se tasse très rapidement, occupant ainsi une place très variable.

La vapeur est un fluide très mobile et véloce, qui réagit rapidement aux sollicitations de consommation.

Ainsi pour assurer une bonne régulation de niveau d'eau dans les chaudières on est amené à mesurer les éléments suivants => Régulation à 2 ou à 3 éléments :

- 1) Le niveau proprement dit. On utilise une sonde analogique (*à conductivité ; à effet capacitif ; ou en pression différentielle*) positionnée dans une bouteille indépendante reliée en haut et bas au ballon supérieur dit de "séparation de phase". On s'affranchit ainsi des turbulences du bouillonnement.
- 2) La pression au sein de la chaudière. On utilise généralement un capteur analogique de précision $< 0,1$ bar (*Capacitif ; piezzo-électrique ou à μ -résonance*).
- 3) Le débit instantané consommé qui permettra d'anticiper les appels de vapeur (*débitmètre massique électromagnétique ou à vortex ou effet coriolis*).

Enfin, lors d'un appel rapide de consommation de vapeur, l'émulsion a tendance à se soulever (comme l'eau bouillante lorsqu'on y plonge les spaghettis) et la vitesse d'élévation de la vapeur entraîne avec elle des particules d'eau. On appelle cela le "Primage". Pour éviter ce phénomène, on conjugue deux protections :

- L'installation d'une "Pipe de Captage" ou "anti-primage" qui agit comme un filtre.
- Le traitement de l'eau par un tensio-actif.

Les conduites

Le transport de la vapeur est sensible aux phénomènes de "coup de bélier". Il s'agit d'une augmentation ponctuelle de la pression qui se déplace à grande vitesse (comme une onde de choc) à l'intérieur d'une conduite. Un fort coup de bélier peut complètement détruire d'importantes canalisations. Il peut avoir deux causes possibles.



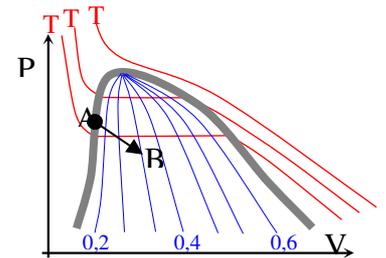
- L'origine hydraulique :

Si l'on ferme brutalement un réseau alors qu'il débite à son nominal, le fluide étant entraîné par son élan va s'accumuler à l'avant de l'opercule et créer une dépression à l'arrière. La surpression à l'avant va condenser un peu de vapeur en eau dont la densité est plus lourde et qui comme un ressort va repartir à contre courant. A l'arrière, le vide ponctuel fera aussi l'effet ressort mais sans quasiment de risque de condensation.

- L'origine thermique :

Si l'on ouvre brutalement une vanne pour mettre un circuit en service, on va mettre en présence deux fluides aux caractéristiques différentes (enthalpie, température, pression). A la rencontre des deux, l'eau va se vaporiser ou se re-vaporiser* et la vapeur va se condenser. L'échange thermique se faisant sur une faible surface, la pression ne pourra pas s'équilibrer et engendrera des poussées très importantes propulsant les fluides alternativement l'un vers l'autre et à leur rencontre.

* NB IMPORTANT : la re-vaporisation est une détente brutale d'eau liquide, initialement à une forte pression et température (on dit aussi éclatement). Le liquide contient assez d'énergie pour vaporiser une partie de lui-même jusqu'à trouver l'équilibre 'pression / température de saturation'.



Notamment, les conduites les plus exposées sont les retours de condensats des auxiliaires ou des traceurs de réchauffage, et des purgeurs de conduite vapeur.

Souvent, ils ne sont pas sous-refroidis, et ces conduites sont sensibles aux coups de bélier.

Les purgeurs

Il y a de nombreux types de purgeurs dans un circuit d'exploitation thermique pour de nombreuses utilisations.

Il est en effet nécessaire de purger l'eau éventuellement contenue dans les organes de vapeur ; de même il faut évacuer l'air ou d'autres gaz incondensables présents dans l'eau. Les purgeurs servent aussi en sortie des réchauffeurs pour assurer la condensation totale de la vapeur et ne laisser s'évacuer que de l'eau (*chaleur latente totalement récupérée*).

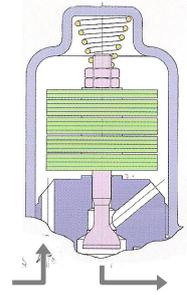
Bien qu'étant apparemment simples et robustes, ces organes sont les plus sensibles pour la maintenance des installations, puisque leur défaillance peut causer de graves dommages vers les machines utilisatrices, et occasionne des pertes de rendement.



Les purgeurs thermostatiques

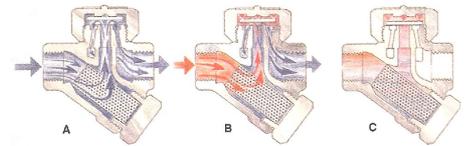
Un empilement de "bi-lames" se dilate avec la température et entraîne la fermeture du pointeau. Généralement le pointeau à un certain jeu de liberté qui lui permet de faire aussi office de clapet de non-retour. Ce système permet en choisissant la température de fonctionnement de s'adapter à toute condition de pression (purge de ligne, réchauffeurs, purge d'air en réseau surchauffé).

Ils permettent de récupérer la chaleur sensible en maintenant l'eau en amont jusqu'à son refroidissement sous la température pour laquelle le bilame est réglé.



Les purgeurs Thermodynamiques (ou à capsule)

Ils sont basés sur la différence de vitesse d'écoulement entre la vapeur et l'eau. Ils maintiennent donc toujours en amont l'absence totale d'eau, et en aval une fréquente faible fuite de vapeur. Ils sont généralement au meilleur-marché.

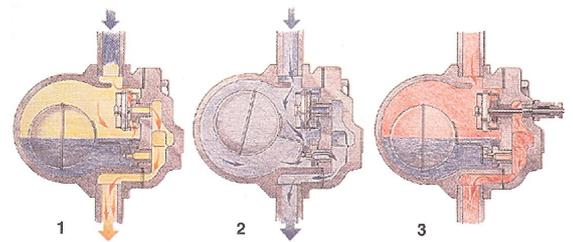


Les purgeurs à flotteurs fermés

Un flotteur placé dans un récipient commande mécaniquement un clapet. Il contient donc toujours du liquide (pas de fuite de vapeur). Un ressort maintient l'ouverture pour augmenter la différence de niveau à chaque vidage. Un bilame sur le clapet permet l'évacuation de l'air à la mise en service.

Le récipient garanti l'absence d'eau en amont. Les débits possibles sont importants.

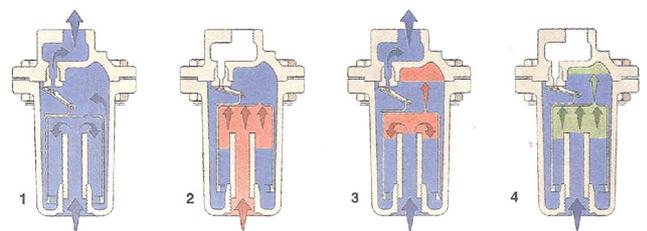
Le fonctionnement (mécanique basé sur la densité) est indépendant de la pression de service de la tuyauterie des condensats.



Les purgeurs à flotteurs ouverts

Compromis du précédent, pour une meilleure longévité et un moindre coût avec cependant de forts débits.

Le flotteur est une cloche munie d'un orifice supérieur. En eau le flotteur coule. A l'arrivée de la vapeur, la poussée monte le flotteur qui ferme le clapet. La vapeur contenue se condense et le flotteur coule, libérant ainsi le clapet pour évacuer le condensat.



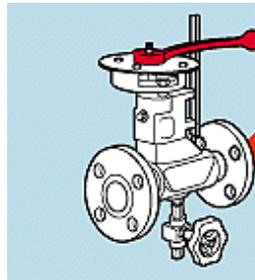
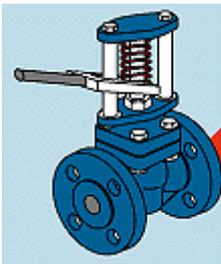
Les vannes

Il y a deux grandes familles de vannes : les vannes de réglage, et les vannes d'isolement.

Les technologies sont nombreuses, et leur maintenance dépend essentiellement de deux parties : l'étanchéité sur l'axe de commande, et la paire opercule / orifice.

Les étanchéités sont désormais de plus en plus "à vie". et les clapet, sièges, etc... sont désormais souvent interchangeables.

Les premières sont conçues pour supporter de n'être jamais totalement fermées ni ouvertes. En cas de commande manuelle on dit "tiercer une vanne", et en commande automatique on dit que la vanne "module".

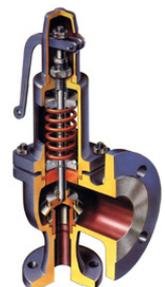


Les secondes sont prévues pour être totalement étanche lorsqu'elles sont fermées.

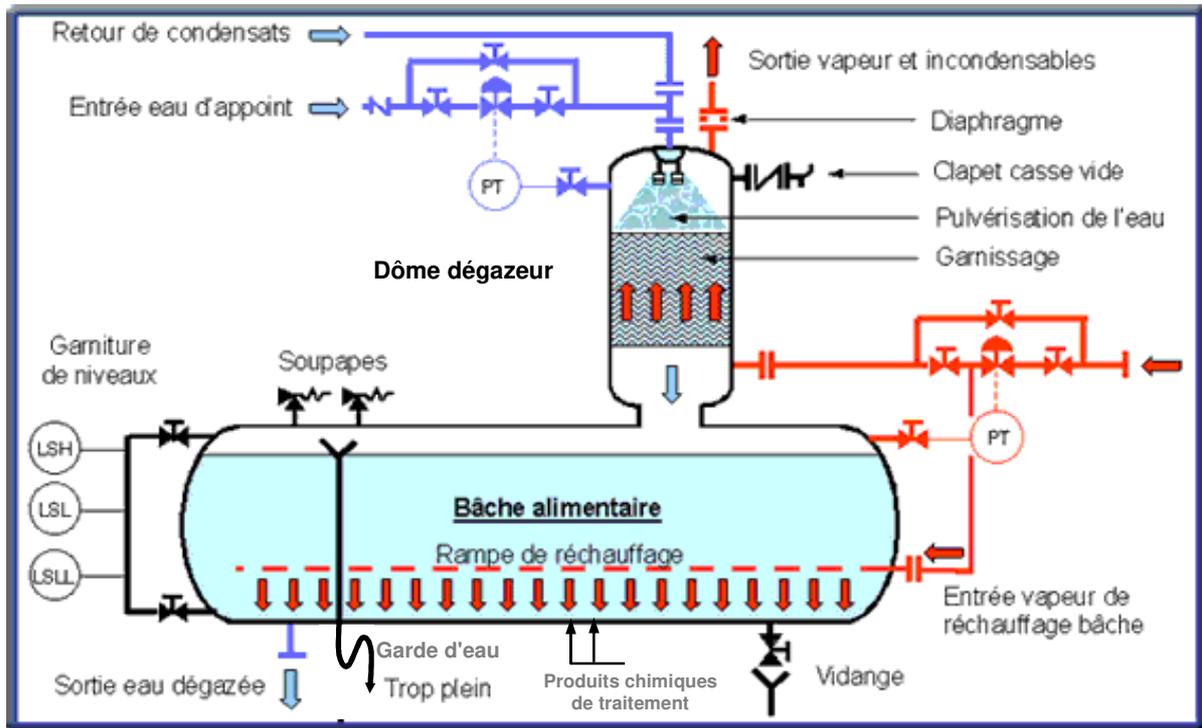


La soupape de sécurité

- Elle s'ouvre $\pm 1\%$ si la pression atteint la valeur du timbre
- Sa capacité de débit assure l'impossibilité de dépasser 10% du timbre à pleine charge
- Elle se referme 10% au dessous de la pression du timbre
- Le déclenchement manuel est prévu pour les contrôles



L'eau alimentaire



L'eau d'appoint ("nourrice") et les condensats (retour d'utilisation) sont stockés dans une "bâche alimentaire". Les "pompes alimentaires" y puisent l'eau pour alimenter la chaudière.

C'est à ce stade que les traitements chimiques sont dosés et que l'on réduit au minimum les gaz dissous dans l'eau (air, O_2 , CO_2 ...) en y maintenant une température d'environ $105^{\circ}C$ et une pression de 0,2 bar.

La pression est assurée par l'apport régulé de vapeur de réchauffage et la colonne d'eau du siphon de trop-plein (env. 3 à 4 m). La saturation est importante pour éviter les phénomènes de "cavitation" au niveau des pompes alimentaires. En effet si la pression baissait, même légèrement, il y aurait re-vaporisation, et les pompes aspireraient des bulles de vapeur qui provoqueraient des érosions très fortes (c'est la cavitation).

La difficulté de maintien en pression réside dans l'appoint d'eau. En effet, l'eau d'appoint dite "nourrice" étant froide va condenser rapidement la vapeur de réchauffage du dôme dégazeur, et va faire chuter la pression. Aussi, on anticipe le phénomène préchauffant l'eau nourrice et en augmentant arbitrairement le débit de vapeur de réchauffage à chaque appoint des pompes nourrices.

La purge continue des gaz dissous est assurée par la fuite permanente (diaphragme) au point le plus froid du dégazeur (Celle-ci doit toujours rester ouverte).

Le traitement chimique : Cf. dernier chapitre.

Les Turbines

Les Turbines se composent d'une alternance de tuyères ou de jets fixes, et d'ailettes ou aubes mobiles. La vapeur s'écoule dans les tuyères, dans lesquelles elle se dilate. Ainsi, sa température diminue et son énergie cinétique augmente. La vapeur en mouvement exerce une pression contre les ailettes, entraînant leur rotation.

Elles se classent deux grandes catégories souvent combinées dans une même machine:



- Les turbines à action dans lesquelles la détente se fait uniquement dans les aubages fixes. Elles sont bien adaptées aux étages à forte pression et se prêtent mieux à la régulation de débit. Leur construction est plus coûteuse et réserve leur emploi aux premiers étages de la turbine.
- Les turbines à réaction dans lesquelles la détente est répartie entre les aubages fixes et mobiles. Le degré de réaction est défini par la répartition de la détente entre les aubages (généralement différent entre premier et dernier aubage). Elles se prêtent mieux aux étages à basse pression et leur coût est plus faible.

Ce sont des équipements assez coûteux, elles nécessitent une construction très précise avec des aciers fortement alliés (Cr-Ni-Va) pour résister aux contraintes thermiques, mécaniques (force centrifuge) et chimique (corrosion par la vapeur).

Les deux premières contraintes limitent le diamètre et donc le débit nominal. Ainsi des aubes de plus d'un mètre de longueur posent déjà de sérieux problèmes de réalisation. En effet, l'hétérogénéité radiale des vitesses impose une incidence variable de l'aube qui présente alors une forme gauche dont l'usinage est complexe.

Il faut ajouter à cela tous les auxiliaires : un palier de tourillon supporte l'arbre et un palier de butée le positionne de manière axiale. Un système d'huile assure le graissage des paliers ; des joints réduisent les pertes de vapeur près de l'arbre, tout au long de son trajet. Enfin, un système d'étanchéité (à "dumies") empêche la vapeur de s'échapper à l'extérieur de la turbine et l'air d'y entrer. La vitesse de rotation est commandée par des soupapes situées aux entrées d'admission de la machine et pilotées par des systèmes de régulation et de sécurité pointus.

Les turbines à réaction développent une poussée axiale plus forte, du fait de la chute de pression sur les ailettes mobiles. Cette poussée est compensée par l'utilisation d'un piston d'équilibrage

Le condenseur

C'est un faisceau tubulaire qui évacue la chaleur latente de condensation de la vapeur une fois détendue. Dans une installation uniquement thermique (sans turbine), généralement chauffage urbain, ou utilisation industrielle : fondoirs, stérilisateurs, cuiseurs etc... ce sont ces récepteurs qui assurent la condensation. Le condenseur n'a plus, alors, qu'un rôle de "déverse" de l'excédent de production.



Leur mise en service nécessite toujours un délai de progressivité assez important. En effet, par la présence mixte d'eau et de vapeur, il faut monter leur régime très progressivement pour éviter les chocs thermiques et mécaniques.

En aval de turbines le condenseur est à basse pression voire sous vide. Alors qu'en thermique ils sont sous pression.

Dans le premier cas on utilise généralement la proximité d'un grand cours d'eau pour disposer de la source froide (pour le nucléaire il faut un fleuve). Le condenseur se situe au niveau de la tour et la mise sous vide est assurée soit par des pompes spéciales soit par des éjecteurs venturi.

Dans le second cas les condensats sous pression seront refroidis avant de retourner à la bûche.

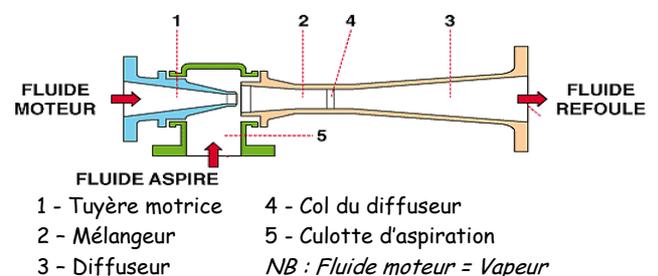
Deux solutions techniques : l'éclatement ou le sous-refroidissement.

L'éclatement consiste à évacuer les condensats directement dans un ballon à pression atmosphérique, il y aura alors une chute brutale de pression, et donc re-vaporisation d'une partie de l'eau jusqu'à la saturation atmosphérique. Le ballon d'éclatement est muni d'un large évent pour évacuer le panache de vapeur de *re-vaporisation*. C'est une solution économique du point de vue de l'installation mais qui amène une consommation d'eau permanente.

Le sous-refroidissement consiste à rajouter un aérotherme après le condenseur. Un ballon intermédiaire est alors disposé entre les deux pour bloquer la séparation de phase, et isoler les deux températures de fonctionnement.

L'éjecteur (ou "Ejectair")

Il est installé au condenseur pour le mettre en dépression et extraire l'air et les incondensables (uniquement installations à turbines BP)



Ce système permet facilement d'obtenir un vide de plus de 30 à 70 %, ce qui est largement suffisant pour le sous refroidissement des condensats et garantir l'absence de particules liquide dans les turbines BP.

Le Circuit "mono-hydrique" Éléments de Sécurité

L'exploitation de toute installation demande une bonne connaissance du circuit mono-hydrique. En effet, le circuit de l'eau à toutes ces étapes peu s'avérer complexe, et en cas de disfonctionnement, seule la maîtrise du circuit dans tout son ensemble permet un diagnostic sûr et rapide. Nous avons vu que le fluide vapeur est caractérisé par son enthalpie, et que celle-ci correspond à son énergie interne. Il faut donc bien garder à l'esprit que la vapeur a une énergie propre importante et qu'un disfonctionnement peut rapidement avoir des conséquences destructrices.

Certaines règles doivent donc être parfaitement connues, maîtrisées et appliquées.

🔧 Coups de bélier sur départ vapeur

Il faut réagir très vite : baisser immédiatement la dépense (consommation de vapeur) mais ne surtout pas la fermer. Le contre coup pourrait être fatal aux conduites sous pression. Il s'agit de "primage", vérifier le traitement chimique, le niveau moyen effectivement régulé (trop haut). Il peut aussi s'agir d'une dépense trop soudaine (ouverture trop rapide d'une machine utilisatrice). Dans une installation avec turbines contrôler aussi le surchauffeur (souvent un détecteur de primage est installé au vu du prix conséquent d'une telle avarie).

🔧 Chute brutale de pression

quelqu'en soit la cause la conséquence est un entraînement de vapeur (voire d'eau), et la chaudière risque de manquer d'eau. Baisser, voire arrêter la charge, surveiller attentivement le niveau, quitte à forcer les pompes alimentaires à 100%.

Une fois l'inertie thermique du foyer écoulée (jusqu'à plusieurs dizaines de minutes), stopper l'installation jusqu'à avoir remédié à la rupture.

🔧 Chute brutale du niveau d'eau

Deux causes possibles : défaut de l'alimentation, ou rupture de tube (chaudière ou conduite). Il faut de toute façon arrêter immédiatement la charge. Si le niveau revient, la fuite est interne à la chaudière, et il faudra refroidir pour isoler la partie rompue.

🔧 Augmentation de la pression

Suite à une baisse de consommation, il y a un défaut sur la déverse (condenseur). Il faut baisser la charge et déverser par un évent. Cette situation ne doit être que provisoire pour diagnostiquer le défaut.

🔧 Agitation et bullage dans la bêche

Arrivée trop massive d'eau d'appoint. Il faut alors tiercer légèrement sur l'eau d'appoint ou augmenter le forçage de vapeur correspondant.

Arrivée de condensats trop chauds. Ceux-ci éclatent alors au sein même de la bêche et se re-vaporisent partiellement.