

1. INTRODUCTION

Si on souhaite concevoir un système vapeur en s'écartant de la simple recopie de systèmes ayant fait leurs preuves, il arrive vite un moment où l'on doit estimer au mieux les besoins thermiques. Pour disposer d'un système efficace, la compréhension de quelques principes physiques simples est utile.

2. CHAÎNE DE TRANSFORMATION

Elle se compose :

- d'une source de chaleur : brûleur gaz ou alcool. Les foyers charbons sont réservés aux grandes échelles et les foyers pour combustibles solides sont de conception spécifique adaptés en premier lieu à la récupération de la chaleur par rayonnement. Il ne sera pas question des foyers charbon dans ce document.
- d'un échangeur qui récupère la chaleur par rayonnement-conduction (foyer) et par convection-conduction (tubes de fumée). Cette chaleur vaporise un fluide de travail, de l'eau en ce qui nous concerne.
- d'un convertisseur thermodynamique qui transforme la chaleur du fluide de travail en énergie mécanique. En règle générale dans notre pratique modéliste on utilise un moteur alternatif à pistons.
- d'une chaîne cinématique se résumant souvent à un réducteur à engrenage ou des poulies.

3. PRE DIMENSIONNEMENT PAR LES RENDEMENTS

Le rendement est une notion intuitive, c'est dans notre cas l'énergie mécanique récupérée par l'arbre moteur ramenée à la totalité de l'énergie dépensée, par exemple la chaleur théorique contenue dans la combustion complète de la masse de combustible qui aura alimenté le foyer.

3.1. Rendement de nos machines

Il faut étudier la chaîne des rendements.

3.1.1 Rendement de combustion

C'est la quantité de combustible réellement transformée en chaleur récupérable sous forme de rayonnement ou de fumées chaudes qui compte.

Une partie de la chaleur sert à réchauffer l'air qui sert de comburant. Il y a des imbrûlés inévitables, entraînés avec les gaz chauds à la cheminée. Pour qu'un brûleur fonctionne correctement on est obligé d'ajouter une quantité excédentaire de comburant (air). Trop d'excès d'air peut être nuisible car cela diminue la température des fumées et par suite l'efficacité de l'échange de chaleur.

Par ailleurs il y a des pertes thermiques par les parois du foyer qui est à haute température par rapport à l'ambiante. On a coutume de comptabiliser les pertes foyer dans les pertes thermiques chaudière.

Même de petite taille un brûleur gaz a un rendement de combustion compris entre 0,85 et 0,95. Typiquement on prend une valeur de 0,90. Cela est moins le cas pour les brûleurs à alcool à mèches, il suffit de voir la couleur de flamme et les dépôts de suie.

Notons au passage que l'on admet que 60 à 70 % de la chaleur récupérable est transmise par le rayonnement dans le foyer et le restant par les fumées. Le foyer doit être soigné et le

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 1/10 - Avril 2023

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>


Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

FICHE TECHNIQUE BESOINS THERMIQUES

FTe06

brûleur doit « voir » la plus grande surface de chauffe possible. Les échangeurs à gaz chauds (fumées) demandent de grandes surfaces de chauffe car les gaz secs sont d'excellents isolants avec des coefficients d'échange faibles.

3.1.2 Rendement de la chaudière

Rendement d'échange :

C'est la quantité de chaleur que la chaudière récupère divisée par la chaleur émise par le brûleur. La suie, le tartre, une vitesse trop faible ou excessive des fumées tous ces facteurs nuisent au rendement. L'échange par récupération de la chaleur des fumées, convection-conduction au travers des parois de la chaudière, est très difficile à calculer. Au premier chef cet échange augmente :

- lorsque la surface d'échange augmente.
- la différence de température entrée-sortie des fumées augmente. On estime qu'avec une température des fumées en sortie de 180°C on aura fait pour nos minuscules chaudières une très bonne extraction de chaleur.

Nota : dans nos chaudières la vitesse de passage des gaz est très faible. Pour l'augmenter il faudrait diminuer drastiquement le diamètre des tubes de fumée mais ce n'est pas possible car on opère par tirage naturel et l'augmentation des pertes de charges (frottements des gaz) bloquerait l'écoulement.

Rendement thermique net

Il intègre les pertes thermiques par les parois de la chaudière auxquelles on ajoute couramment celles du foyer

On peut tabler sur un rendement chaudière compris entre 0,6 et 0,8. Une fois la chaudière construite il sera possible de le vérifier par des mesures assez simples.<fiche ?>

3.1.3 Rendement moteur

Le rendement du moteur est soumis aux lois de la thermodynamique. Il ne peut être supérieur au rendement théorique qui s'exprime par :

$$\text{Rdt_réel} < 1 - (\text{Tf} / \text{Tc})$$

Tf = température froide

Tc = température chaude ; les températures sont en Kelvin soit °C+273

Prenons comme exemple de la vapeur à 140°C à l'admission et 100° à l'échappement.

$$\text{Rdt_théorique} = 1 - (100+273)/(140+273) = 0,097 \text{ soit } 9,7 \%$$

Le rendement théorique est la différence de température de la vapeur entre le moment de l'admission et le moment de l'échappement. Malheureusement le moteur a différentes pertes liées au remplissage imparfait, aux chauffages-refroidissement à chaque coup de piston, aux compromis sur l'admission de vapeur, au volume mort en fin de course, aux frottements internes, au réglage médiocre de la distribution, etc.

La revue anglaise Model Engineer s'est préoccupée très tôt d'évaluer le rendement des locomotives modèle réduit. Cela a donné lieu pendant quelques années à un challenge sur le rendement des machines locomotives majoritairement en voie de 5". Je vous laisse découvrir les machines arrivées les 5 premières du challenge 2008. La plupart des machines classées ont un rendement de l'ordre de 1%

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 2/10 - Avril 2023

Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE BESOINS THERMIQUES

FTe06

Source Model Engineer n°4333-Septembre 2008 p253-258

Locomotive	Voie en pouces	Rendement global %
N.G. 0-4-2ST	5	1,630
LNER B1	5	1,536
LNER B1	5	1,489
0-6-0 L&Y A class	5	1,445
LNER B2	3 1/2	1,355

3.1.4 Pertes vapeur :

Fuites bien sûr, mais aussi le laminage au régulateur, pertes de charge dans les tuyaux, une contre-pression en sortie des cylindres mal réglée et bien sûr... les pertes thermiques dans les conduites et équipements maintenus en température. Tout cela conduit à une baisse de la qualité de la vapeur.

On reviendra plus loin sur l'intérêt d'une surchauffe même légère de la vapeur produite : moins de pertes thermiques et meilleur fonctionnement par absence de présence de gouttelettes de condensat en aérosol dans la vapeur.

3.1.5 Pertes mécaniques

Ce sont les pertes par frottements liés à des erreurs dans la géométrie des éléments en mouvements ou encore le non respect des tolérances. Une réalisation soignée et des réglages minutieux permettent de réduire considérablement ces pertes.

Le gros des pertes mécaniques va venir du réducteur de vitesse. Pour des équipements grand public on considère que chaque étage de réduction a un rendement mécanique de 0,7 à 0,85. Si on a deux étages, cas fréquent, on a alors un rendement mécanique par exemple de **Rdt_méca = 0,85*0,85 = 0,72**

3.2. Evaluation de la puissance du brûleur

- Rdt combustion = 0,95
- Rendement d'échangeur chaudière = 0,80
- Rendement moteur : 0,8 fois le rendement théorique avec Rdt_théorique = 9,7 %
- Pertes thermiques et pertes vapeur 15% soit un facteur de réduction de Rdt_thermique = 0,85
- Entraînement direct donc pas de réducteur, Rdt_mécanique = 0,98

Le rendement de transformation de la chaîne complète est :

$$\mathbf{R_{total} = 0,95 * 0,80 * (0,80 * 0,097) * 0,85 * 0,98 = 0,049 \text{ soit } 5 \%}$$

Cela signifie que pour obtenir 5 W de puissance mécanique nette sur l'essieu moteur il faudra avoir une puissance de brûleur de $5/0,05 = 100$ W.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 3/10 - Avril 2023

Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE BESOINS THERMIQUES

FTe06

Le Butane commercial a un pouvoir calorifique (sans condensation des fumées) de :

45,6 MJ/ kg (MJ= 1 million de Joules)

Ce qui peut s'écrire :

Débit_masse_gaz (kg/s) = Puissance calorifique / (Pouvoir_calorifique)

Pour l'avoir en grammes par heure on écrit $100/(45,6*1000000)*(1000*3600) = 7,9$ g/h

Les valeurs choisies pour les rendements étant assez optimistes il serait prudent de tabler sur la moyenne des meilleures valeurs des locomotives de *l'Economy Challenge* soit $Rdt_challenge = 1,491$ %. Cela amène à un brûleur de 26,5 g/h.

3.3. Les bienfaits de la surchauffe vapeur

Pourquoi un liquide se met à bouillir ?

- ⇒ Tout d'abord il faut savoir qu'un liquide est toujours surmonté par sa vapeur. Un liquide ne se met à bouillir, c'est-à-dire à passer de l'état liquide à l'état gazeux, que sous certaines conditions de température et de pression. Si la pression au dessus du liquide est égale ou inférieure à sa pression d'émission de vapeur il se met à bouillir. Par exemple si à une température de 29°C on faisait dans une chaudière un vide tel que la pression descende à 0,05 bars alors il y aurait ébullition⁽¹⁾ spontanée. A 86°C l'eau se mettrait à bouillir si la pression descendait à 0,5 bars.

A la pression atmosphérique :

- l'eau bout à 100° C,
- le lait à 70° C,
- le butane à 0° C,
- le GPL à - 25° C,
- le propane à - 42° C.

Qu'est-ce que la surchauffe ?

Rien de bien compliqué. Considérons la petite expérience illustrée ci-après.

On suppose disposer d'un cylindre parfaitement isolé thermiquement dont on peut contrôler la température des parois et que l'on peut chauffer. Ce cylindre est muni d'un piston de poids négligeable, parfaitement isolé thermiquement et dont on sait contrôler la pression qu'il exerce. Plaçons de l'eau pure à 10°C dans notre cylindre, par exemple 1kg d'eau, et chauffons.

(1) Evidemment de la vapeur qui travaillerait entre 29°C et disons 18°C cela ne ferait pas lourd de rendement théorique.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

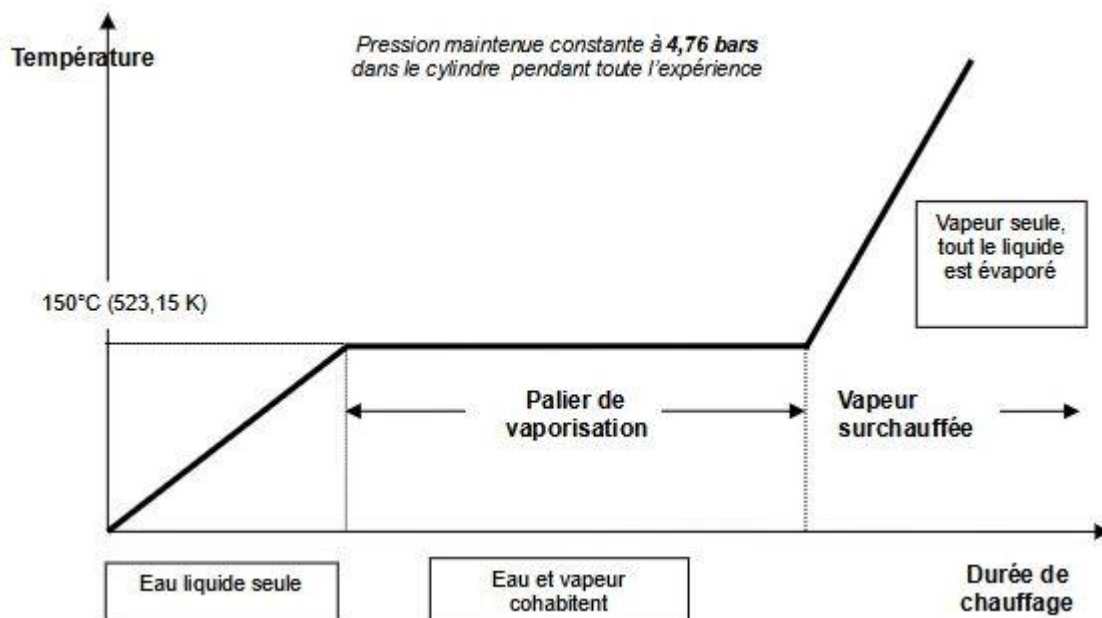
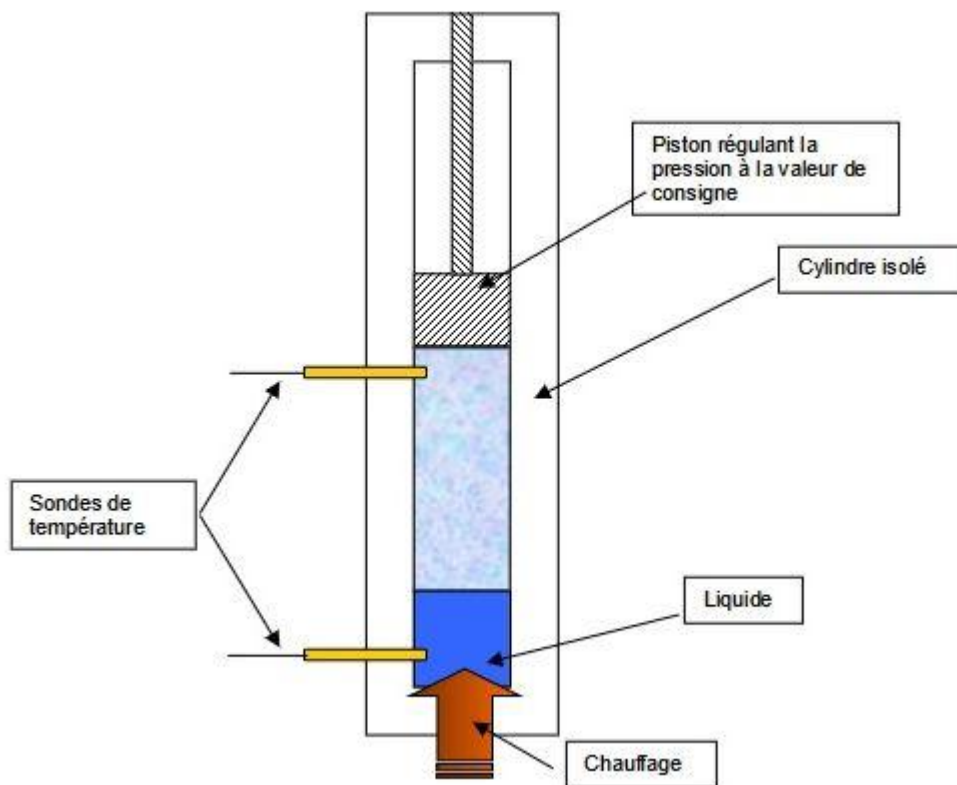
FOLIO 4/10 - Avril 2023

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE BESOINS THERMIQUES

FTe06



Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLI0 5/10 - Avril 2023

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE BESOINS THERMIQUES

FTe06

1 - Phase liquide

Dans une première phase le liquide s'échauffe mais sa pression de vapeur est inférieure à la pression ambiante. Il ne se met pas à bouillir.

Température (°C)	60	81,3	99,6	113,3	120,3	133,5	150
Pression de vapeur du liquide (bars)	0,2	0,5	1	1,6	2	3	4,76

La quantité de Chaleur apportée s'exprime par une relation simple

$$Q1 = m Cp (T_{finale} - T_{initiale})$$

Cp est un coefficient qui représente la capacité calorifique du liquide

Dans notre expérience $Q1 = 1 * 4186 * (150-10) = 586040$ J. Pour amener notre kg d'eau de 10°C à 150°C nous avons fourni 586 kJ sous forme de chaleur.

2 - Vaporisation.

Les deux sondes donnent la même température. Cette température ne varie pas tant qu'il reste du liquide à évaporer. La vapeur produite contient de microscopiques gouttelettes d'eau elle est dite vapeur saturante.

La chaleur nécessaire s'obtient par une relation simple :

$$Q2 = mL$$

Où **L** est une valeur qui caractérise l'énergie nécessaire pour vaporiser le liquide. Elle vaut 2256 kJ/kg pour l'eau. **L** est appelée chaleur latente de vaporisation.

$$Q2 = 1 * 2256 = 2256 \text{ kJ}$$

3- Phase gazeuse

Une fois toute l'eau évaporée on chauffe un gaz, la vapeur d'eau dans notre cas. Rebelote pour le calcul :

$$Q3 = m * Cp_{vapeur} * (T_{finale} - T_{initiale}).$$

Supposons que l'on surchauffe la vapeur à 300°C

$$Q3 = 1 * 1850 * (300-150) = 277500 \text{ J ou } 277,5 \text{ kJ}$$

La chaleur totale à fournir sera de : $Q1 + Q2 + Q3 = 586 + 2256 + 277,5 \text{ kJ} = 3119 \text{ kJ}$

Les dépenses calorifiques auront été en proportion pour chaque phase :

Chauffage 18,8 % ; Vaporisation 72,3 % ; Surchauffe 8,9 %.

On notera que le plus coûteux est la vaporisation.

Mais pourquoi diable surchauffer la vapeur ?

Pour pas mal de raisons dont la principale est d'augmenter le rendement⁽²⁾ et d'améliorer l'économie de fonctionnement.

En effet si notre moteur est alimenté en vapeur saturée (150°C ; 4,76 bars) et rejette la vapeur à 110°C son rendement théorique sera de $1 - 423,15/383,15 = 0,095$ soit 9,5%.

(2) en fait on augmente la puissance massique du moteur mais on complique la chaudière.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 6/10 - Avril 2023

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE

BESOINS THERMIQUES

FTe06

Si on l'alimente maintenant en vapeur surchauffée à (220°C ; 4,76 bars) le rendement théorique devient : $1 - 423/493 = 0,142 = 14,2 \%$.

En situation réelle le rendement ne fera pas un bond aussi spectaculaire. Cependant on peut noter qu'un gain substantiel sera acquis à bon compte car la surchauffe consomme moins d'énergie que la vaporisation. La contrepartie c'est que les gaz en général, vapeur d'eau surchauffée y compris, ont de mauvais coefficients d'échange calorifique. Donc la contrepartie ce sont des échangeurs avec beaucoup de tubes pour augmenter la surface : poids, coût, entretien. Dans un modèle réduit on est très limité par l'encombrement et les problèmes d'entretien. Il s'agira donc plus d'un sécheur que d'un surchauffeur réel, mais les quelques dizaines de degrés récupérés sur les fumées sont précieux. De toute façon il ne faudrait pas trop surchauffer car à partir de 220-240° l'huile vapeur qui sert à lubrifier le piston commence à se dissocier, perdant ses qualités lubrifiantes et laissant des dépôts carbonés très tenaces.

3.4. Quelles différences entre la vapeur surchauffée et la vapeur saturante

1/ La vapeur surchauffée passe d'abord par l'étape de vapeur saturante. Sa caractéristique est de ne contenir que de la vapeur d'eau sous forme gazeuse sans aucune trace de liquide.

2/ La température de la vapeur surchauffée est supérieure à celle de la vapeur saturante à la même pression. Pour une pression donnée le rendement de transformation sera meilleur sans surcoût mécanique lié à de hautes pressions.

3/ Le volume de la vapeur surchauffée est plus grand que celui de la vapeur saturante à la même pression. Cela est dû au fait que pour un gaz, la pression, le volume et la température sont liés par une loi. En première approche on peut admettre que cette loi s'écrit :

$$P \cdot V = a T$$

P est la pression en Pa, **V** le volume en m³ ; **T** la température en K ; '**a**' est un coefficient constant.

Dans notre exemple où la pression est fixée à 4,76 bars, 1m³ de vapeur saturante à 383,15 K (150°C) va se transformer⁽³⁾ en 1,52 m³ à 583,15 K (300°C)

4/ La quantité de chaleur contenue dans la vapeur surchauffée est supérieur à celle de la même masse de vapeur saturante. Donc elle peut produire plus de travail.

5/ Un refroidissement, par exemple après détente dans un moteur, n'amène pas ou peu de condensation contrairement à la vapeur saturante. De même, la recompression après l'admission et l'arrivée au point mort haut du piston ne provoque pas de condensation. Sans rentrer dans les détails l'utilisation de vapeur surchauffée dans des machines « compound » (double ou triple expansion) n'amène pas des gains aussi substantiels que les mêmes moteurs fonctionnant avec la vapeur saturante. On simplifie la conception du moteur.

(3) $(P1 \cdot V1) / (P2 \cdot V2) = T1 / T2$ après un peu de passe-passe algébrique on obtient $V2 = (T2 / T1) * (P1 / P2) * V1$; comme dans l'exemple $P1 = P2$ on a $V2 = (T2 / T1) * V1$

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 7/10 - Avril 2023

Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE BESOINS THERMIQUES

FTe06

6/ La vapeur surchauffée est un très mauvais lubrifiant. Il convient d'être attentif sur ce point. L'utilisation de la fonte, du bronze ou du Monel⁽⁴⁾ est recommandée pour les parties délicates. L'huile doit être strictement adaptée à la surchauffe sous peine de carboniser et d'encrasser le moteur.

7/ La vapeur surchauffée pose des problèmes avec les distributeurs à tiroir plans qui se déforment (lubrification-température). On leur préfère des distributeurs cylindriques ou des distributions par soupapes comme dans les moteurs à combustion interne.

8/ La vapeur surchauffée conduit beaucoup moins bien la chaleur que la vapeur saturante. Ceci est un avantage car les pertes thermiques sont réduites à isolation égale. La contrepartie c'est un échange médiocre et donc des échangeurs longs et avec des risques de points chauds entraînant perçage, corrosion. Un véritable surchauffeur efficace et fiable est un équipement délicat à dimensionner et à optimiser en grandeur réelle, alors ne parlons pas des réchauffeurs sur des modèles réduits. Ce seront souvent plutôt, comme dit précédemment, des économiseurs sécheurs qui épuisent un peu plus la chaleur contenue dans les fumées.

9/ La vapeur surchauffée a une viscosité inférieure à la vapeur saturante. Cela signifie à pertes de charge égales (pertes par frottement du fluide dans les tuyauteries) une plus grande vitesse d'écoulement. Ou bien encore à vitesse d'écoulement donnée, des tuyaux plus petits

10/ La vapeur surchauffée est incompatible avec certains produits de traitement-tamponnage de l'eau de chaudière. La haute température les décompose et rend l'eau « moussante » avec des encrassements et autres désagréments.

Alors surchauffe ou pas dans nos machines ?

La réponse est oui d'autant qu'il s'agira le plus souvent, compte tenu de la surface d'échange réduite, d'un économiseur-sécheur. Attention à la conception car un tube de surchauffe vapeur placé directement dans le foyer ne fera pas « de vieux os ». Il devra être facile à remplacer en cas de fuite.

Dans un modèle réduit, on exploitera surtout les propriétés isolantes de la vapeur surchauffée ainsi que la résistance à la condensation et une viscosité moindre. Le plus efficace est de réaliser une surchauffe légère par récupération sur les fumées en ayant soin de ne pas détruire le tirage par l'utilisation d'une grille de tube de surchauffe trop serrée.

(4) Le Monel est un alliage de Nickel (67% ou plus) et cuivre plus des additifs. Il extrêmement résistant à la corrosion.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 8/10 – Avril 2023


Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE BESOINS THERMIQUES

FTe06

4. ANNEXE

4.1. Quelques mots sur les unités de mesure

Il convient de dire quelques mots sur les unités utilisées par les physiciens. Elles ont été standardisées et unifiées dans un système international, d'où leur nom unités SI. Les formules de calcul sont généralement données en unités SI .

Force :

C'est le Newton (N). 10 N= 1,02 kgf ; en gros c'est un poids de 1kg

Travail-Chaleur :

La quantité de travail fourni ou la quantité de chaleur reçue ou perdue s'expriment en Joules (J).

Ainsi 1000 Joules noté 1kJ est la même chose que 238,85 cal c'est-à-dire à peu près la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1° la température de ¼ de litre d'eau liquide.

1000 Joules c'est aussi le travail que vous effectuez si vous poussez une brouette sur 50 m avec une force de 20 kg ou bien si vous élevez, à l'aide d'une corde et d'une poulie, un poids de 400 N sur 2,5 m soit un étage. Un travail c'est une force multipliée par un déplacement.

Pression :

Une pression c'est une force qui s'exerce uniformément sur une surface. Elle s'exprime en Pascal (Pa). 1Pa= 1 N/m². Cette pression est très faible, aussi on utilise un multiple comme le kilo Pa (kPa) qui vaut 1000 Pa ou le Méga Pa (MPa) qui vaut 1 million de Pa.

100 000 Pa= 100 kPa= 1 bar = 1,012 kgf/cm².

Température :

La température est une mesure un peu bizarre. Elle mesure l'état d'agitation désordonnée des molécules d'un corps. Sa plus grande particularité c'est que les températures ne s'additionnent pas. Si on se met à deux dans un lit, sous la couette la température ne passe pas de 37,2°C (tout seul) à 74,4°C (à deux). On réchauffe simplement le lit deux fois plus vite car il y a deux sources de chaleur à température constante au lieu d'une.

On a l'habitude des Degrés Celsius (°C) ; les physiciens utilisent les Kelvin (K). Pour passer des Celsius aux Kelvin il suffit de rajouter 273,15 K aux Celsius.

100°C = 373,15 K

Travail-Puissance

De nouveau une précision de vocabulaire. Il y a beaucoup de confusion entre Puissance et Travail. Une puissance, sous-entendue mécanique, est une quantité travail (donc une énergie) divisée par le temps pendant lequel ce travail a été effectué.

$$P = W/(t_2-t_1)$$

Les unités sont **P** en Watt, **W** en Joule, (**t₂-t₁**) en secondes. C'est en quelque sorte un débit d'énergie par seconde.

Par exemple si vous montez 10 sacs de ciment de 400N (environ 40,7 kgf) de 7 m en 20 mn d'effort continu (soit 1200 s) votre puissance moyenne est de $P = 10 * 400 * 7 / 1200 = 23,33$ W. Si vous utilisez un petit monte-charge qui effectue la même chose en 9 secondes, la

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 9/10 - Avril 2023


Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE BESOINS THERMIQUES

FTe06

puissance développée est de $P = 10 \cdot 400 \cdot 7 / 9 = 3000 \text{ W}$. Dans les deux cas le travail effectué est le même, il est de $10 \cdot 400 \cdot 7 = 280\,000 \text{ J} = 280 \text{ kJ}$ mais la puissance motrice est très différente.

Si maintenant c'est le contraire et que vous faites descendre les dix sacs de ciment en utilisant le frein de treuil, le frein de treuil va fournir un travail résistant de 280 kJ qui va être intégralement transformé en chaleur de frottement. S'il est facile de convertir du travail en chaleur le contraire est bien moins simple.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 10/10 - Avril 2023

 Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>