

Mise au point d'une méthodologie permettant la quantification de condensats de vapeur

Ing. O.HABRAN
Ir R.LESCROART
PIERRARD – Virton

L'objet de cet article est de présenter la mise au point d'une méthodologie de quantification de condensats de vapeur issus de bains testeurs de flacons d'aérosols à L'Oréal Libramont. Cette méthodologie fait intervenir une validation des résultats obtenus via des méthodes purement théoriques, par des résultats obtenus expérimentalement. Cette quantification de condensats constituait une étape importante d'une étude plus large dont l'objectif consistait à imaginer et à projeter la mise en place d'équipements permettant la récupération et la valorisation de ces condensats.

Mots - clefs : économies d'énergie, condensats, récupération, convection.

The aim of this paper is to present a method to measure condensate flows. These condensates come from devices which test the mechanical resistance of aerosols bottles in L'Oréal, Libramont. This method requires a validation of theoretical calculation through experimental results. This study is an important part of a larger project. Its objective is to design and project the installation of equipment to collect and valorize these condensates.

Keywords : energy savings, condensates, recovery, thermoconvection.

1. Introduction.

L'étude ici présentée constitue une des parties principales d'un projet plus large destiné à permettre la valorisation des condensats de vapeur engendrés par la production de *L'Oréal Libramont*. On estime que la température de ces condensats est comprise entre 80 et 90°C.

Ce projet s'inscrit dans la politique actuelle du groupe *L'Oréal* en matière de gestion de l'énergie. Celui-ci se révèle en effet très avantageux pour l'usine tant du point de vue économique que par la dimension écologique qui le caractérise.

Le présent article traite d'un cas particulier de la quantification des condensats de vapeur générés par divers équipements (échangeurs de chaleur, cuves double enveloppe, etc.) utilisés à *L'Oréal Libramont*. Nous y étudions uniquement les condensats issus des testeurs de flacons d'aérosols qui équipent l'unité de production 1 (UP1) de l'usine.

Ces dispositifs, au nombre de huit, sont constitués d'un bain rempli d'eau chaude (52°C), dans lequel circulent les flacons d'aérosol après que du gaz propulseur y ait été injecté. L'eau du bain est maintenue à température par circulation permanente dans un échangeur de chaleur vapeur/eau.

Le bain sert à porter le contenu du flacon à une température qui tend vers 52°C. La montée en pression qui en résulte permet de tester la résistance mécanique des flacons.

Il est à noter que pour des raisons pratiques, nous avons choisi d'étudier un seul dispositif en détail (le plus représentatif) et de généraliser les résultats obtenus aux autres dispositifs.

2. Quantification des condensats issus des dispositifs – testeurs.

2.1. Méthodologie suivie.

Un premier objectif de cette étape de quantification est la détermination du coefficient d'échange thermique global (k en $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), caractéristique de l'échange de chaleur entre le contenu du flacon (milieu intérieur) et l'eau du bain (milieu extérieur).

Cette étape a été scindée en deux parties :

1. une détermination théorique de k .
2. une validation des résultats obtenus par deux expériences.

Etant donné que l'ensemble du dispositif-testeur étudié est très bien calorifugé, nous négligeons les déperditions thermiques par l'enveloppe extérieure du bain.

Sur la base des valeurs obtenues, il est possible d'effectuer le calcul des quantités moyennes de condensats générées par le testeur considéré.

2.2. Détermination théorique de k .

Pour cette détermination théorique, nous appliquons différentes formules relatives au transfert de chaleur par convection. Dans notre cas, les effets de la conduction au travers de l'aluminium du flacon sont négligeables.

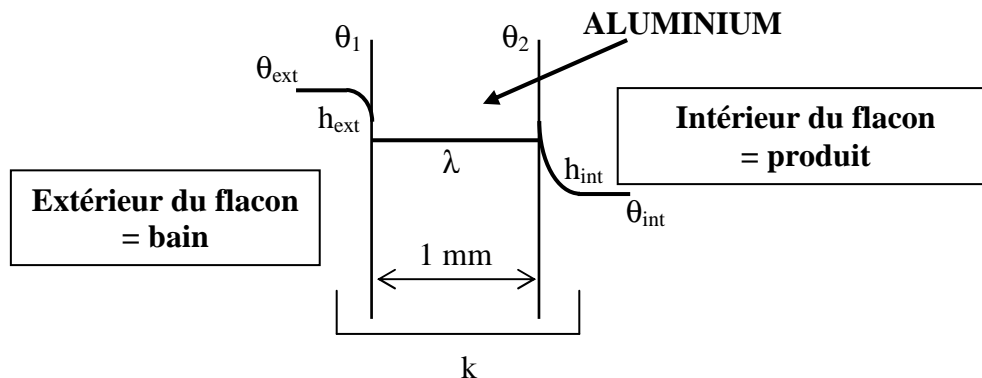


Figure 1 : transfert de chaleur à travers la paroi en aluminium du flacon.

Nous déterminons tout d'abord les coefficients de convection intérieur et extérieur au flacon, qui caractérisent respectivement l'échange de chaleur :

- entre la « paroi extérieure » et l'eau du bain (h_e).
- et, entre la « paroi intérieure » et le contenu du flacon (h_i).

Cette détermination nécessite l'utilisation de groupements adimensionnels tels que les nombres de Rayleigh, Reynolds, Prandtl, ect. faisant office de « super – variables ». Ces nombres sont calculés sur base de grandeurs physiques significatives (vitesse du fluide, masse volumique de celui-ci, conductibilité thermique, etc.) déterminées aux températures considérées.

Ensuite, sur base des coefficients de convection, la détermination du coefficient k est possible :

$$1/k = 1/h_e + 1/h_i$$

Les formules traitant de la convection thermique sont généralement peu précises. Lors de l'élaboration de cette étude, nous avons donc décidé d'utiliser un grand nombre de formules différentes, issues de sources diverses.

Ces calculs (formules dans [1] et [2]) nous ont permis d'établir deux tendances dans les valeurs de k . L'une fournit des valeurs situées autour de $460 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ tandis que l'autre génère des valeurs proches de $700 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Ces valeurs nous donnent donc une fourchette et « un ordre de grandeur » de la valeur de k .

C'est par souci de précision, mais aussi de par la volonté de pouvoir développer dans ce travail une « méthodologie théorique » applicable plus généralement, qu'il a été décidé de valider les formules utilisées par des expériences.

2.3. Une expérience en « grandeur réelle ».

Pour effectuer cette expérience, nous nous sommes placés dans des conditions normales de production (circulation des flacons dans le bain). A un instant donné, nous avons fermé la vanne d'alimentation en vapeur de l'échangeur de chaleur. Nous avons alors pu relever la variation de température de l'eau du bain (figure 2).

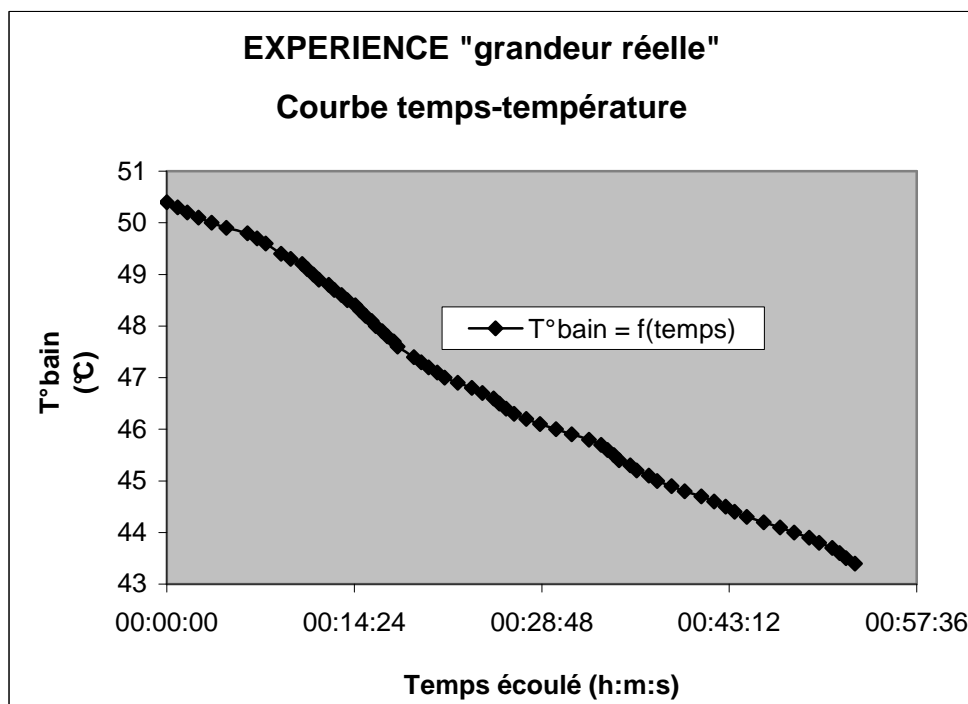


Figure 2 : décroissance de température de l'eau du bain en fonction du temps (alimentation en vapeur coupée).

Ensuite, connaissant le nombre de flacons qui avaient traversé le bain durant la période de mesure (environ une heure), le développement mathématique repris ci-dessous a permis d'évaluer le coefficient de transmission d'un flacon.

Mesures :

- $\theta_{\text{initiale bain}} = 50,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $\theta_{\text{finale bain}} = 43,4 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- temps écoulé entre l'obtention de ces températures : $t = 3171 \text{ s}$.

Avec $C_p = 4179,38 \text{ J/kg.K}$ et $\rho = 989,30 \text{ kg/m}^3$ à $\theta_m = (\theta_i + \theta_f)/2 = 46,9 \text{ } ^\circ\text{C}$.

→ Il y a $989,30 \cdot 1,4 = 1385 \text{ kg}$ d'eau dans le bain et $m \cdot C_p = 5788525 \text{ J/K}$.

$$\text{Côté bain : } J = dQ/dt = m \cdot c_p \cdot (d\theta/dt) \text{ (W)} \quad (1)$$

$$\text{Côté flacon : } J = k \cdot S \cdot \Delta\theta \text{ (W)} \quad (2)$$

avec :

- J (W), le flux de chaleur
- Q (J), la quantité de chaleur échangée
- S (m²), la surface extérieure totale des flacons immergés
- $\Delta\theta$ (°C), la différence entre les températures finale et initiale du contenu des flacons.

En égalant ces deux formulations du flux de chaleur, nous pouvons déterminer la valeur du k des flacons.

En posant dans (1) :

$$\Delta\theta = (\theta_i - \theta),$$

et en séparant les variables, on obtient :

$$d\theta/(50,4-\theta) = (k.S.dt)/(m.C_p),$$

et en intégrant,

$$\ln (50,4-\theta) = k.S.t/(m.C_p),$$

d'où finalement,

$$\theta = 50,4 - e^{(k.S.t)/(m.C_p)}. \quad (3)$$

Le graphe présenté en figure 2 permet de constater que le début de la décroissance de température relevée est quasiment linéaire (le fait que la linéarité ne soit pas parfaite est imputable aux fréquents arrêts et démarrages de la ligne pendant l'expérience). Cette quasi – linéarité permet d'exprimer l'exponentielle dans (3) par un développement de Taylor, limité au terme du premier degré : $e^x = 1+x/1!$

Ainsi,
$$\theta = 50,4 - (1+(k.S.t)/m.C_p),$$

et
$$k.S = ((49,4-\theta).m.C_p)/t.$$

On obtient :
$$k.ST = 10\,953 \text{ W/K}$$

où ST (m²) est la surface de l'ensemble des flacons ayant traversé le bain pendant l'expérience (soit 1494).

Finalement,
$$k = 10953/(1494.\pi.0,044.0,19) = 279 \text{ W/m}^2.\text{K}.$$

2.4. Une expérience « simplifiée ».

Celle – ci a consisté à remplir d'eau à température connue (θ_{bi}), une dizaine de flacons de 200 ml et à immerger ceux – ci dans une eau chaude, de température θ_{fi} connue. Cette eau chaude était contenue dans un petit bac très bien calorifugé. On a alors pu relever l'évolution des températures θ_b et θ_f (mesurées) en fonction du temps. Nous avons arrêté le chronomètre lorsqu'il y a eu stabilisation des températures (θ_{bf} et θ_{ff}). Un résultat représentatif obtenu par cette expérience, réalisée plusieurs fois dans un souci de reproductibilité, est présenté ci-dessous.

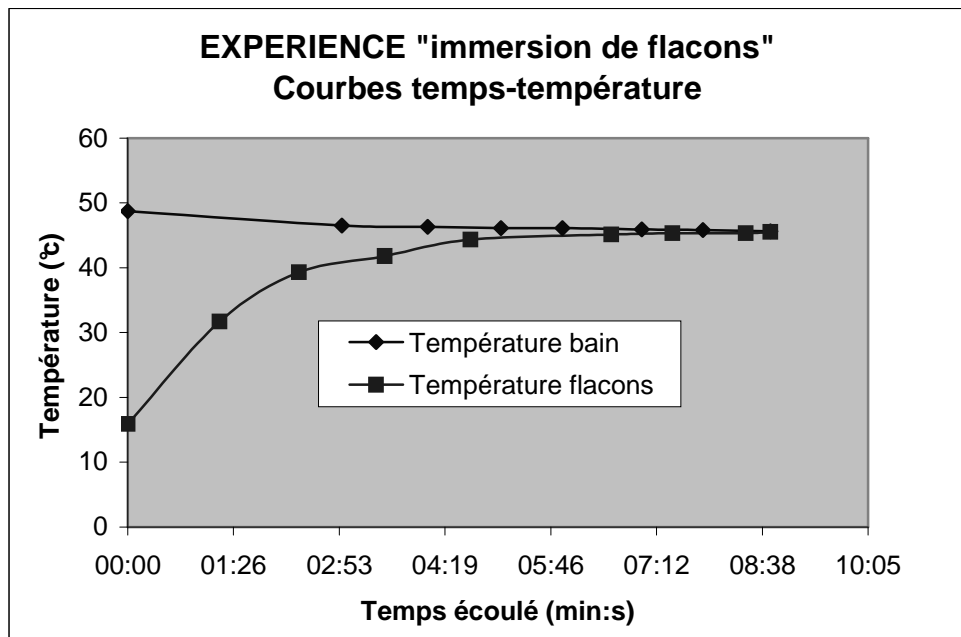


Figure 3 : évolution des températures intérieure et extérieure au flacon en fonction du temps (10 flacons immergés).

Ici aussi, un développement mathématique nous permet l'obtention de k.

Nous avons :

$$\begin{aligned} \text{à l'instant } t = 0 : \quad & \theta_{bi} = 48,7^{\circ}\text{C} \\ & \theta_{fi} = 15,9^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

à l'instant $t = 525$ s : $\theta_{bf} = 45,6^\circ\text{C}$
 $\theta_{ff} = 45,5^\circ\text{C}$

Sachant que :

- le bain contient 20 litres d'eau et chaque flacon 200 ml d'eau
 - 10 flacons sont immergés dans le bain
 - les caractéristiques ρ et c_p sont calculées à $(\theta_{bi} + \theta_{bf})/2$,
- nous pouvons calculer la quantité de chaleur échangée entre l'eau du bain et le contenu d'un seul flacon :

$$Q_{\text{échangée}} = (c_p \cdot m \cdot \Delta\theta) / 10 = 25127 \text{ J}$$

Calculons le flux de chaleur :

$$J = Q/t = 25127/525 = 48 \text{ W}$$

et : $J = k \cdot S \cdot \Delta\theta_m$

où : S (m^2) est la surface du bidon.

$$\Delta\theta_m = ((\theta_{bi} - \theta_{fi}) - (\theta_{bf} - \theta_{ff})) / (\ln((\theta_{bi} - \theta_{fi}) - (\theta_{bf} - \theta_{ff}))) = 5,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Cette formule, issue de [3], représente la moyenne logarithmique des différences de températures au long de l'expérience. Cette formule est empruntée à la théorie des échangeurs de chaleur. En effet, le cas traité peut être assimilé au cas d'un échangeur où le fluide chaud serait l'eau du bain et le fluide froid, l'eau contenue dans les flacons.

Nous pouvons donc déterminer le k pour un bidon :

$$k = J / (S \cdot \Delta\theta_m) = 48 / (\pi \cdot 0,044 \cdot 0,19 \cdot 5,6) = 323 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}.$$

Ce résultat est cohérent avec le précédent.

2.5. Récapitulatif des résultats.

Nous obtenons trois valeurs différentes pour le coefficient de transfert global k , issues de trois méthodes différentes :

- méthode théorique : $k = 460 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (valeur choisie)
- méthode expérimentale « bain » : $k = 279 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- méthode expérimentale « flacons » : $k = 323 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Nous pouvons constater que les valeurs obtenues se situent dans une fourchette acceptable.

Les expériences vérifient donc assez bien les calculs effectués (formules dans [1] et [2]). Le fait que ces trois valeurs soient dans le même ordre de grandeur prouve la véracité de l'hypothèse posée : négliger les pertes par l'enveloppe extérieure du bac.

La valeur de k déterminée théoriquement est néanmoins largement supérieure aux autres valeurs. Cela ne doit pas nous étonner car, dans les calculs théoriques, nous avons toujours considéré une différence de température maximale bain/bidon ($\Delta\theta = 52 - 19 = 33^\circ\text{C}$). Ce choix de différence de température a eu pour effet de surestimer les coefficients de convection qui permettent de déterminer k . De plus, les valeurs obtenues par les formules empiriques sont en général peu précises.

Si la méthode expérimentale « flacons » est celle qui comporte le moins d'inconnues, la méthode expérimentale « bain » possède l'avantage d'exploiter des données issues de conditions réelles de production. Par ailleurs, ces deux méthodes fournissent des résultats relativement proches. Pour calculer la quantité de condensats rejetés, nous choisirons donc la moyenne des résultats de ces deux méthodes : $k = 300 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Calculons le flux de chaleur moyen :

$$J = k.S.\Delta\theta_m = 300.(\pi.0,044.0,19).(52-35,5) = 130 \text{ W}$$

où $\Delta\theta_m$ représente la moyenne logarithmique des différences de températures bain/bidon.

La ligne a normalement une cadence de 39 coups/minute et 183 flacons sont immergés : on en déduit que les flacons restent en moyenne immergés 4 minutes et 41 secondes.

Pour un bidon, la quantité de chaleur échangée vaut:

$$Q_b = J.t = 130.281 = 36,5 \text{ kJ}$$

Sachant que 2340 flacons passent dans le bain en une heure, on a :

$$QH = 36\ 500.2340 = 85\ 410 \text{ kJ}$$

Cette quantité de chaleur doit être fournie par de la vapeur 4 bars, de chaleur latente égale à 2133 kJ/kg

Donc, la quantité de vapeur consommée, en une heure, pour chauffer le bain testeur de la ligne 9 est égale à : $85\ 410/2133 = 40 \text{ kg}$ de vapeur par bain et par heure.

Nous aurons approximativement $40.8 = 320 \text{ kg}$ de condensats pour la totalité des bains testeurs de l'UP1 en une heure.

Ce qui correspond à $(320/965,3).1000 = 331 \text{ litres/heure}$ ou $0,385 \text{ m}^3/\text{h}$ en production normale. Pour dimensionner une installation de valorisation des condensats, nous pourrons ajouter cette valeur aux débits déterminés lors de la « quantification globale ».

4. Conclusions.

Sur la base des résultats obtenus ci-dessus, nous sommes maintenant à même de dimensionner certaines installations de collecte et de valorisation des condensats de vapeur.

La démarche suivie présente l'intérêt de permettre, sur base de résultats obtenus expérimentalement, d'effectuer un « retour sur les formules ». Celui-ci permet alors de cibler les formules qui fournissent les valeurs de k les plus probantes. Ainsi, lorsque nous serons à nouveau confrontés à un problème similaire, nous pourrons aborder celui-ci exclusivement de manière théorique, tout en conservant une précision optimale.

5. Références bibliographiques.

- [1] LESCROART, Ralph, *Transmission de la chaleur*, Belgique, ISI Pierrard, Haute Ecole Blaise Pascal, 2001.
- [2] ÖZISIK, M. Necati, , *Heat transfer, a basic approach*, Etats-Unis, McGraw-Hill, 1985.
- [3] LESCROART, Ralph, *Les échangeurs de chaleur*, Belgique, ISI Pierrard, Haute Ecole Blaise Pascal, 2002.
- [4] HOUBERECHTS, André, *La thermodynamique technique (tables et diagrammes)*, Belgique, Vander, 1996.