

Classe externe *TechnoSteamGenerator*

La classe *TechnoEvaporator* a été développée pour modéliser un évaporateur en régime non-nominal. Elle permet de calculer le triple échangeur en distinguant les zones correspondant à l'économiseur, au vaporiseur et au surchauffeur, mais comporte un certain nombre de limitations. Même si elle permet de calculer des pertes de charge, elle suppose que la pression est uniforme dans chacun des fluides. Elle ne permet pas non plus de tenir compte d'une possible ébullition nucléée dans la partie économiseur.

La classe *TechnoSteamGenerator* permet de remédier à ces limitations.

Elle implémente pour cela :

- le calcul des pertes de charge et la modification des pressions à l'intérieur du générateur de vapeur, le reste des calculs étant effectué de manière habituelle, via les *FlowConfig*
- une méthode générique de prise en compte de l'ébullition nucléée.

Cette note présente les nouvelles fonctionnalités spécifiques à cette classe.

Calcul des pertes de charge

Le calcul des pertes de charge se fait de manière classique dans le cas monophasique et pour les pertes singulières. Dans le cas diphasique, elles sont estimées à partir de diverses corrélations. On en trouvera une synthèse très argumentée dans (Thome and A. Cioncolini, 2015).

La corrélation de (Lockhart-Martinelli, 1949) est l'une des plus utilisées, même si elle n'est pas parmi les plus précises selon les auteurs : nombreuses même sont les publications qui s'accordent pour considérer qu'elle les surestime significativement. Il semblerait que celles de (Müller-Steinhagen & Heck, 1986) et de (Sun & Mishima, 2009) ou celle de (Friedel, 1979) soient beaucoup plus précises. Les trois ont été implémentées dans la classe *TechnoSteamGenerator* et conduisent à des résultats très voisins.

Les notations utilisées dans la classe sont celles de la figure 1 qui représente schématiquement le refroidissement du fluide chaud et l'échauffement de l'eau jusqu'à l'état de vapeur surchauffée.

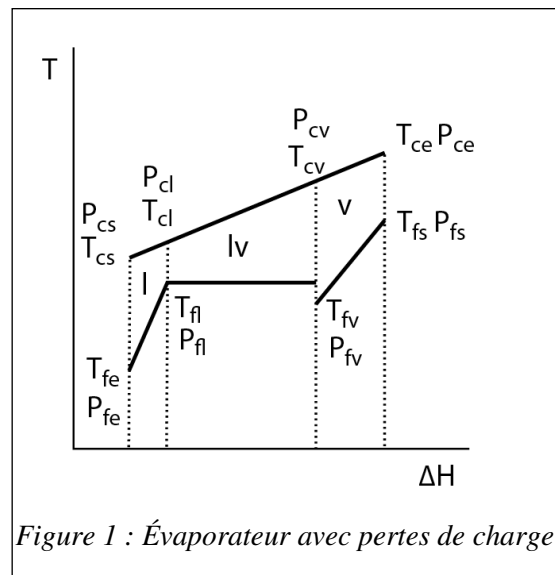


Figure 1 : Évaporateur avec pertes de charge

Si l'on excepte les pertes de charge singulières à l'entrée du fluide froid, les plus importantes prennent place lors de la vaporisation. Or, si l'on suppose que la pression baisse pendant l'évaporation, la température de fin d'évaporation est plus basse que celle d'entrée dans l'échangeur, de telle sorte que le débit de capacité thermique devient négatif, ce qui conduit à un calcul erroné de l'échangeur par la méthode du NUT. Le calcul est donc effectué en supposant que la perte de charge prend place après la fin de la vaporisation, comme indiqué sur la figure. La surchauffe est calculée avec la pression de sortie.

Calcul de l'ébullition saturée

La classe *TechnoEvaporator* utilisait la corrélation de Gungor-Winterton calculée de manière moyennée, ce qui était critiquable. Elle est maintenant implémentée en discrétisant la zone d'évaporation en 100 éléments, ce qui est beaucoup plus précis.

Cinq nouvelles corrélations d'estimation des coefficients d'échange pendant l'ébullition ont de plus été implémentées, celles de (Shah, 1982), (Borishanskiy, 1971), (Kim et Mudawar, 2013), (Kandlikar, 2017) et (Saitoh, 2007).

L'une des difficultés est qu'elles conduisent à des écarts significatifs dans l'estimation de h_{lvf} . Il est donc difficile de savoir laquelle choisir si l'on ne dispose pas de données relatives au GV étudié.

Calcul de l'ébullition nucléée

Le calcul de l'ébullition nucléée est beaucoup plus délicat que celui de l'ébullition saturée. C'est un domaine d'investigation relativement récent et de nombreuses publications existent, sans que des synthèses vraiment pertinentes soient disponibles.

La figure 2 précise les définitions des différentes phases de l'ébullition. Les courbes qu'elle montre permettent de visualiser les phénomènes en jeu.

En ordonnée se trouve la température du fluide T_b ou de paroi T_w , et en abscisse le titre x , que l'on considère pouvoir être négatif dans la zone d'ébullition nucléée.

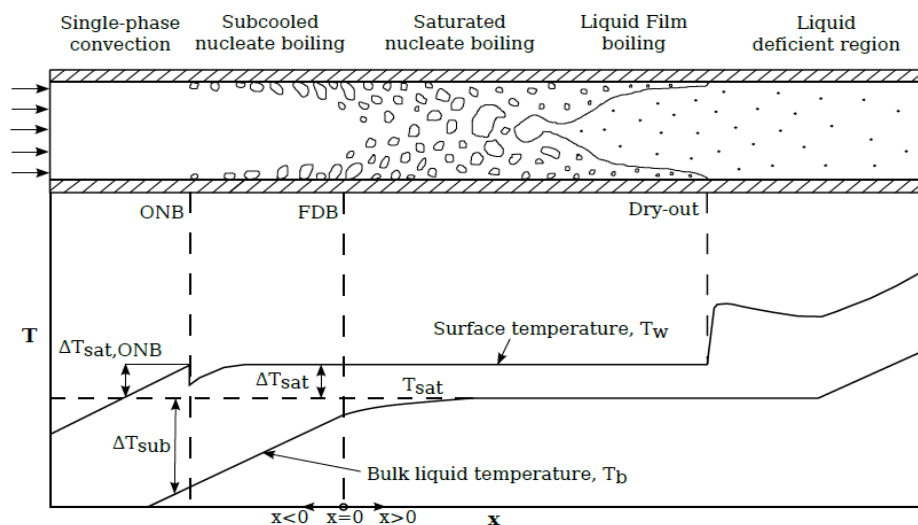


Figure 2 : Profils de température dans un évaporateur (Ohrby, 2014).

Lorsque la température de paroi T_w croît, trois seuils apparaissent :

- lorsque T_w atteint T_{sat} , des bulles peuvent commencer à apparaître,
- mais elles ne le font qu'avec un certain retard, lorsque $T_w = T_{w,onb}$ (Onset of Nucleate Boiling). Un flux complémentaire du flux purement convectif q_{fc} apparaît alors. Il est égal à q_{nb} pour nucleate boiling.
- l'ébullition devient complète lorsque $T_w > T_{w,fdb}$ (fully developed boiling), ce qui correspond à un titre x supérieur ou égal à 0.

Dans la classe TechnoSteamGenerator, l'ONB est détecté par une relation type (Thom, 1965), et le FNB par une relation type (Bowring, 1962).

On considère que h_{fnb} est égal à h_{lvf} calculé précédemment pour l'ébullition saturée, en fonction de la corrélation choisie.

Pour la transition entre l'ONB et le FDB, on fait une rampe entre le h_{fl} local et h_{lvf} atteint lors du FDB. Des méthodes plus sophistiquées sont proposées dans la littérature, mais elles sont complexes à implémenter et leur robustesse n'est pas garantie.

Déroulement des calculs

Vous trouverez en annexe un bref rappel de la manière dont sont structurées les classes externes permettant de réaliser des études de fonctionnement en régime non-nominal de systèmes énergétiques modélisés avec ThermoOptim.

Le principe général des calculs est le suivant :

- en mode dimensionnement, une fois les paramètres géométriques déterminés et les conditions de fonctionnement de l'appareil choisies, un calcul permet de déterminer la surface totale du GV et sa répartition entre les zones correspondant à l'économiseur, au vaporiseur et au surchauffeur
- en régime non-nominal, les conditions d'entrée étant connues, le pilote cherche une solution telle que la surface totale est la même que celle déterminée lors du dimensionnement, la répartition interne des surfaces étant généralement différente.

Comme pour les autres TechnoDesign, c'est la méthode `makeDesign()` qui coordonne les calculs de la classe `TechnoSteamGenerator`.

Après avoir rechargé les valeurs des points amont des deux fluides, elle commence par effectuer les calculs des pertes de charge grâce à la méthode `calcPressureDrops()`. Les pressions internes définies figure 1 sont alors mises à jour, ainsi que les états de sortie de l'échangeur, qui est recalculé plusieurs fois.

Les différentes zones sont ensuite réévaluées et recalculées, comme dans la classe `TechnoEvaporator`, à la réserve près que la pression n'est plus uniforme au sein de l'échangeur.

Les modifications prennent ensuite place dans les méthodes `getUl(techc.amont.X,0)` et `getUlv(techc.amont.X,0)`.

Ebullition nucléée

La méthode `getUl(double xc,double xf)` a été modifiée pour permettre la prise en compte de l'ébullition nucléée. Pour le fluide froid, elle appelle la méthode public void `calcNusseltUlf(double T, double P, double x, double Cp, boolean calcDP, TechnoExch te)`, qui renvoie sur `calcNuUlf(double P)`, où sont effectués tous les calculs.

L'échangeur est découpé en 100 parties et les différents équilibres thermiques sont calculés. La température de paroi est déterminée pour chaque intervalle, avec l'hypothèse que le coefficient d'échange côté chaud reste constant.

Différentes corrélations de détection de l'ONB ont été implémentées, et celle qui conduit à la valeur la plus élevée est retenue. Il suffit de la remplacer par une autre si on le souhaite.

De la même manière, différentes corrélations de détection de l'OFB (ou FDB ou NVG) ont été implémentées, et celle qui conduit à la valeur la plus élevée est retenue.

Quelques exemples sont donnés dans (Wang, 2011) ou (Ghione, 2017).

h_{fdb} est estimé égal à celui de l'ébullition saturée.

La figure 3 montre le type de résultats que l'on obtient. Elle donne l'écart $T_w - T_{sat}$ en degrés, et la valeur du coefficient d'échange en $\text{kW/m}^2/\text{K}$, en fonction de la longueur réduite de l'économiseur. Le coefficient d'échange monophasique diminue lentement du fait de l'augmentation de la température du fluide froid, puis le relais est pris à l'ONB par le coefficient d'échange diphasique, à partir de l'abscisse 0,7 environ. Dans ce cas, le FDB n'est pas atteint au moment où le titre devient égal à 0.

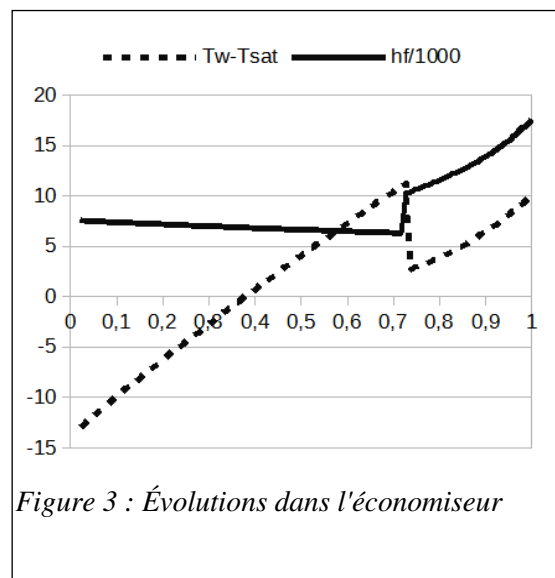


Figure 3 : Évolutions dans l'économiseur

Ebullition saturée

La méthode `getUlv(double xc,double xf)` passe le relais à la classe `TechnoSteamGeneratorConfigs` pour permettre la prise en compte de l'ébullition saturée. Cette classe se comporte de manière analogue à l'ensemble des `FlowConfig` dont elle est dérivée.

Les six corrélations disponibles sont calculées, celle retenue fournissant la valeur de Nusselt diphasique.

Références

- Borishanskiy, B.M., Andreevskij, A.A., Fromzel, V.N., Fokin, B.S., Cistgakov, V.A., Danilowa, G.N. and Bikov, G.S., (1971). Heat transfer during two-phase flows (in Russian). *Teploenergetika* 11, pp. 68-69.
- Bowring R.W., Physical model based on bubble detachment and calculation of steam voidage in subcooled region of a heated channel, Institute for Atomenergi, Halden, Norway, Report No. HPR-10, 1962.
- Friedel, L., (1979). Improved friction pressure drop correlation for horizontal and vertical twophase pipe flow. European Two-Phase Flow Group Meeting, paper E2, Ispra, Italy.
- Ghione A., Assessment and improvements of thermal-hydraulic correlations and methods for the analysis of the Jules Horowitz Reactor, Thesis for the Degree Of Doctor Of Philosophy, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2017
- Gungor, K. E.; Winterton, R. H. S.: A general correlation for flow boiling in tubes and in annuli. *Int. J. Heat Mass Transfer* 29 (1986) 351–358
- Kandlikar, Ch. 8. Boiling, *Multiphase Flow Handbook*, Second Edition by Crowe, Clayton T. Michaelides, Efstathios Schwarzkopf, John D., 2017
- Kim, S.M. and Mudawar, I., 2013, "Universal Approach to Predicting Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Mini/Micro-Channels Part II. Two-Phase Heat Transfer Coefficient," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 64, pp. 1239-1256
- Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C., (1949). Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Progr.* 45, pp. 39-48.
- Müller-Steinhagen, H. and Heck, K., (1986). A simple friction pressure drop correlation for twophase flow in pipes. *Chem. Eng. Process.* 20, pp. 297-308.
- Ohrby, Fredrik, Numerical modeling of subcooled nucleate engine cooling systems, Master's thesis in the Applied Mechanics programme Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2014
- Saitoh, S., Daiguji, H. and Hihara, E., (2007). Correlation for boiling heat transfer of R134a in horizontal tubes including effect of tube diameter. *Int. J. Heat Mass Transfer* 50, pp. 5215-5225.
- Shah, M.M. 1982. Chart correlation for saturated boiling heat transfer: equations and further study. *ASHRAE Trans.* 88(1):185–196.
- Sun, L. and Mishima, K., (2009). Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini-channels. *Int. J. Multiphase Flow* 35, pp. 47-54
- Thom J. R. S. , W. M. Walker, T. A. Fallon, and G. F. S. Reising, Boiling in subcooled water during annuli. In *Proceedings of Symposium on Boiling Heat Transfer in Steam Generation Units and Heat Exchangers*, 1965
- Thome J. R. and Cioncolini, A. *Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow I, Fundamentals and Methods*, Volume 3: Flow Boiling in Macro and Microchannels, 2015
- Wang, J, Y. Huang, Y. Wang, Visualized study on specific points on demand curves and flow patterns in a single-side heated narrow rectangular channel, *Int. J. Heat Fluid Flow* 32 (2011) 982–992.

Annexe : structure des classes pour le calcul des échangeurs en non-nominal

Les tomes 3 et 4 du manuel de référence de Thermoptim présentent les grandes lignes du mécanisme d'extension du progiciel sous forme de classes Java dites externes, le dernier tome se focalisant plus particulièrement sur le pilotage et sur les calculs en régime non-nominal.

La structure d'ensemble est expliquée section 3.2.2 du tome 4. Comme c'est indiqué, l'instanciation de ces classes externes se fait par l'intermédiaire d'un pilote, qui peut être générique ou spécifique.

L'exploration dirigée (DTNN-1)¹ explique comment paramétrer un échangeur de chaleur simple². Il est recommandé de commencer par s'y référer avant d'aller plus loin.

La classe TechnoSteamGenerator est de type TechnoDesign, et plus particulièrement TechnoHx, classe générique pour les échangeurs de chaleur. Elle hérite directement de TechnoEvaporator, spécifique aux évaporateurs conçus comme des échangeurs à deux ou trois zones calculés globalement.

Chacun des deux fluides dont elle assure le couplage est représenté par une classe de type TechnoExch, et chacune de celles-ci définit une configuration d'écoulement définie dans une classe de type FlowConfig.

The screenshot displays the 'Steam generator' configuration window. On the left, there are several rows of calculated parameters in red and blue text. The main area is divided into two sections: 'circuit primaire' and 'GV'. Each section has a table of input parameters and a set of calculated output parameters. The 'circuit primaire' section uses the 'ext_tube | Colburn correlation for single phase flow outside tubes' and shows a total pressure drop of 0.096711. The 'GV' section uses 'Boiling | TechnoSteamGenerator correlations' and shows a total pressure drop of 0.054507. A 'Quit' button is located in the top right corner.

Figure A.1 : Écran de dimensionnement technologique

La figure A.1 montre l'écran de la classe TechnoSteamGenerator avec un paramétrage adapté au pilote de réacteur REP proposé dans le portail Thermoptim-UNIT³.

1 <https://diren.mines-paristech.fr/Sites/Thopty/fr/co/ed20.html>

2 <https://ctc.mines-paristech.fr/ed/Dtnn1EchAirEau.html>

Dans la partie supérieure apparaissent le choix des corrélations (ici « Saitoh & al. » pour le calcul du NUT, et « Sun & Mishima » pour celui des pertes de charge), ainsi que les résultats de calcul.

Le nombre d'itérations apparaissant en haut de l'écran est un paramètre qui permet d'affiner la précision des calculs d'ébullition nucléée, au prix du temps d'exécution d'autant plus grand qu'il est élevé.

Dans la partie centrale et inférieure sont situés les deux écrans des TechnoExch, « circuit primaire » pour le fluide chaud et « GV » pour le fluide froid. Les deux FlowConfig associés sont identifiés par les noms de leurs corrélations, « sp_plate | Single phase... » et « Boiling | TechnoSteam... ». Les paramètres des corrélations peuvent être affichés et modifiés.

C'est dans les TechnoExch que l'on précise les caractéristiques géométriques relatives à chaque fluide, comme la section de passage, le diamètre hydraulique...

Selon les cas, les calculs sont effectués directement dans le TechnoHx, dans le TechnoExch ou dans le FlowConfig. Il faut se reporter au code de chaque classe pour voir comment ils sont enchaînés.

Comme nous l'avons rappelé plus haut, il est nécessaire d'utiliser un pilote pour instancier un TechnoHx et les classes qui lui sont liées. Ce peut être un pilote générique comme expliqué dans l'exploration dirigée (DTNN-1), mais il est généralement préférable de créer un pilote spécifique, du type de ceux qui sont présentés dans les exemples relatifs au fonctionnement en régime non-nominal d'une centrale à vapeur ou d'un réfrigérateur⁴.

Remarques

L'implémentation qui a été faite des diverses corrélations correspond à des régimes d'écoulement turbulents. Si vous souhaitez étudier des régimes laminaires, il faudra les compléter de manière appropriée.

Certaines corrélations font appel à la tension superficielle. Les corps internes à ThermoOptim ont été modifiés pour en permettre le calcul. Si vous utilisez certains corps externes, il vous faudra les compléter soit directement en leur ajoutant les méthodes correspondantes, soit en modifiant la classe TechnoExch en y incorporant directement les méthodes appropriées, couplées à la méthode initLambdaMu() de cette dernière.

On fera attention au fait que les sauvegardes et relectures des paramètres se font pour partie depuis le TechnoHx, et pour partie depuis le pilote.

3 <https://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/pilote-gv-rep.html>

4 <https://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/exempl-dim-techno-non-nominal.html>