



HAL
open science

Etude expérimentale de la condensation d'hydrocarbures à l'intérieur d'un tube horizontal. Influence de la nature du fluide et de la surface interne

O. Beaugeois, Patrice Clément, Bernard Thonon, André Bontemps

► To cite this version:

O. Beaugeois, Patrice Clément, Bernard Thonon, André Bontemps. Etude expérimentale de la condensation d'hydrocarbures à l'intérieur d'un tube horizontal. Influence de la nature du fluide et de la surface interne. Journée SFT: Thermodynamique et transferts en condensation, Mar 2004, Paris, France. hal-00200613

HAL Id: hal-00200613

<https://hal.science/hal-00200613>

Submitted on 25 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

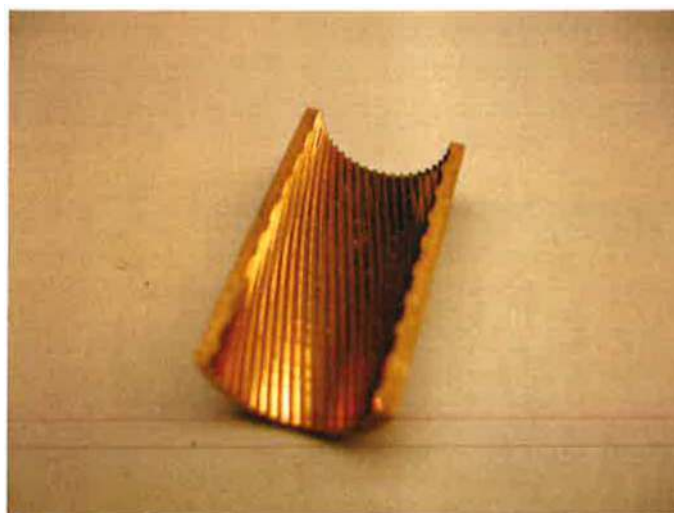
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CONDENSATION D'HYDROCARBURES A L'INTERIEUR D'UN TUBE HORIZONTAL. INFLUENCE DE LA NATURE DU FLUIDE ET DE LA SURFACE INTERNE.

Olivier Beaugeois, Patrice Clément, Bernard Thonon et André Bontemps

**CEA-Greth et UJF-LEGI
Contact: thonon@cea.fr**

L'objectif de ce travail est de participer à l'amélioration du dimensionnement thermique des condenseurs à tubes horizontaux, équipés de tubes lisses ou de tubes à micro-rainures internes. Ce travail, basé sur une installation expérimentale représentative des conditions de fonctionnement industrielles en condensation, a permis d'étudier trois hydrocarbures (butane, propane et mélange butane – propane) circulant avec des fortes vitesses massiques (120 à $900 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et à des pressions différentes. Une campagne expérimentale avec ces différents tubes a été réalisée en mettant en place une instrumentation locale (capteurs de pression, de débits et mesures de température). Une étude des cartes des régimes d'écoulements a été effectuée à partir de l'analyse des points expérimentaux pour les différentes géométries de tube afin d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes de transfert de chaleur. Cela a permis d'étudier différentes corrélations de prédiction du coefficient d'échange de chaleur en condensation à l'intérieur de tubes horizontaux. L'étude a permis la validation d'un modèle pour les tubes lisses et la proposition d'un nouveau modèle pour les tubes à micro-rainures internes. Une analyse des paramètres prépondérants dans le transfert de chaleur a été réalisée, et dans le cas des tubes rainurés, une amélioration du coefficient d'échange thermique d'un facteur 1.7 a été mesurée par rapport aux tubes lisses.



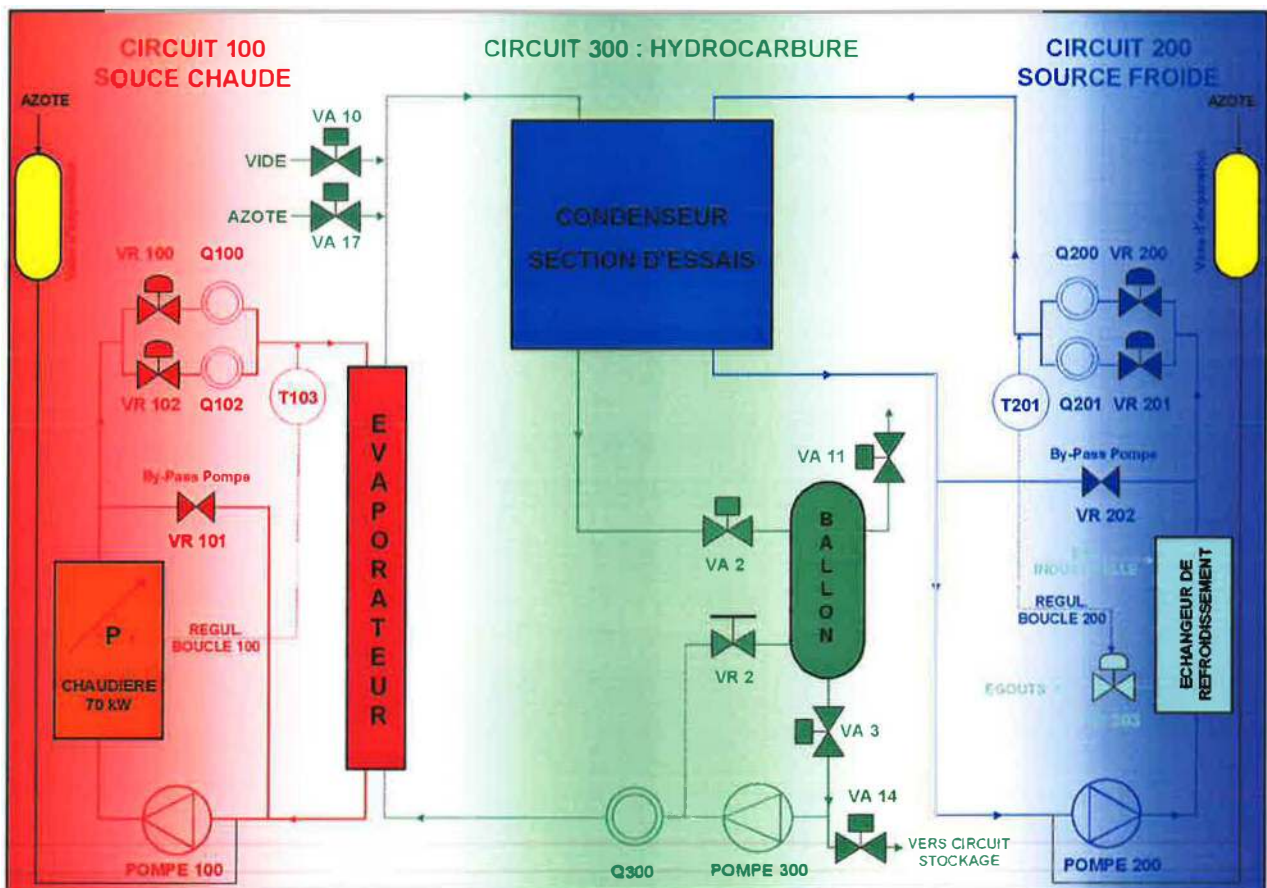
Les moyens expérimentaux

La boucle BUPRO est destinée aux essais d'échangeurs de chaleur compacts en situation de fonctionnement réelle en utilisant divers fluides primaires, des hydrocarbures purs ou des mélanges d'hydrocarbures :

- butane,
- propane,
- mélange butane-propane.

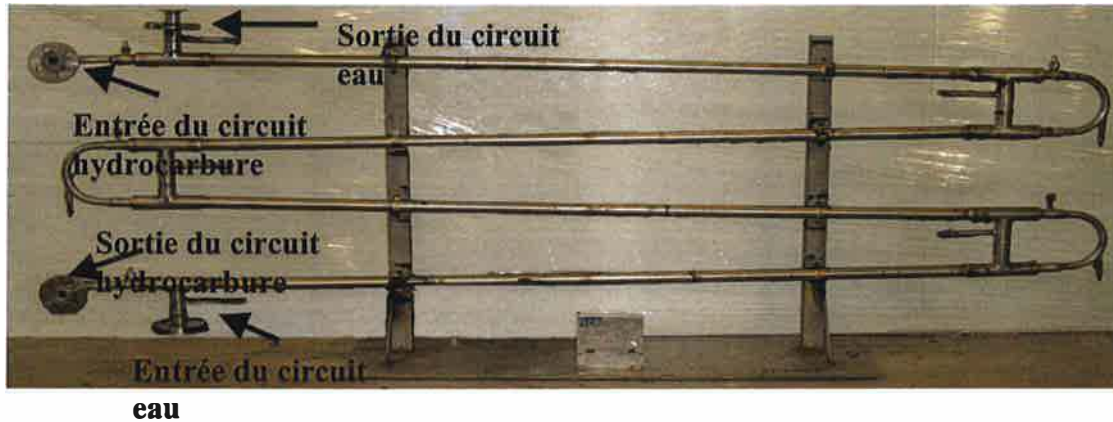
Caractéristiques :

- débit $< 600 \text{ kg.h}^{-1}$,
- température maxi $< 85 \text{ °C}$,
- pression maxi $< 20 \text{ bar}$,
- capacité en hydrocarbure : 90 litres.



Les sections d'essais

Les sections d'essais sont constituées de 4 tubes de 1,795 m de longueur avec un diamètre interne de 17,3 mm.
Deux géométries ont été testées : un tube lisse et un tube micro-rainuré (société Wieland)



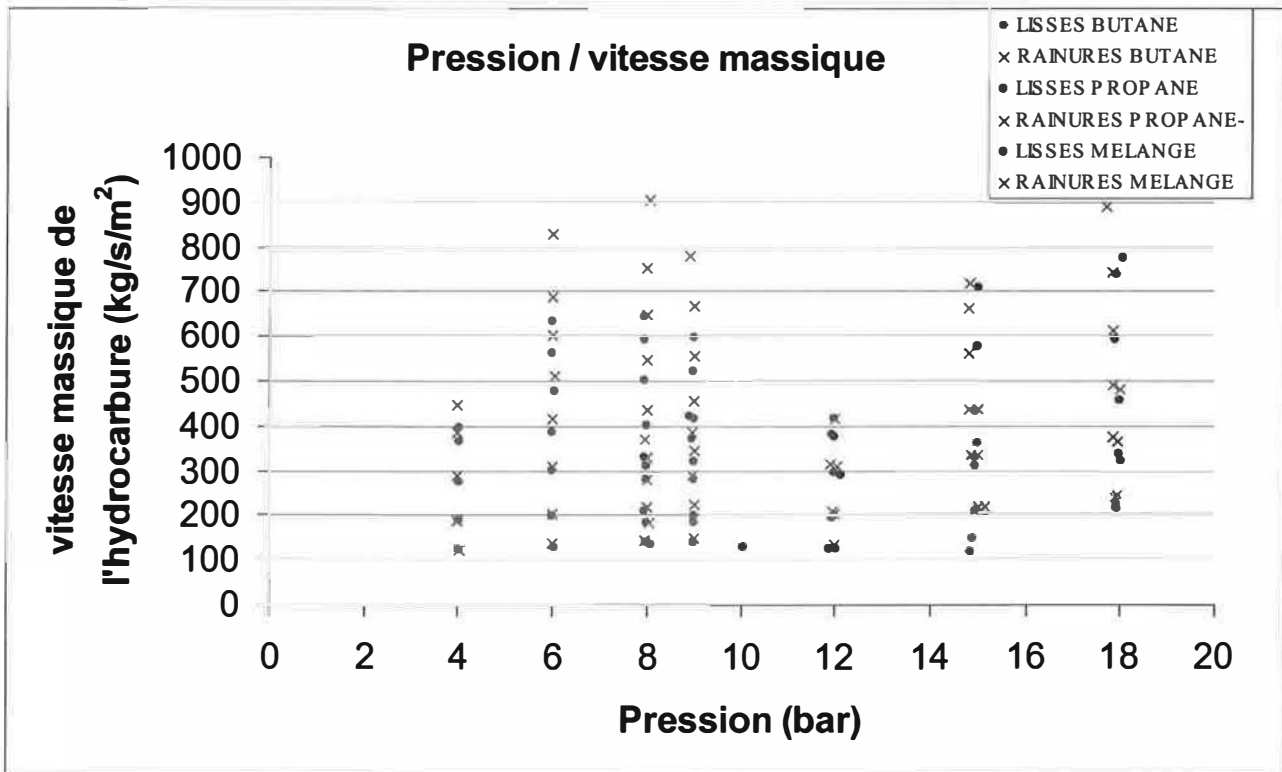
<i>Longueur d'un tube [m]</i>	1.795
<i>Diamètre intérieur du tube eau [m]</i>	0.025
<i>Diamètre intérieur du tube hydrocarbure [m]</i>	0.0143
<i>Section de passage de l'hydrocarbure [m²]</i>	0.0001 6
<i>Surface d'échange totale [m²]</i>	0.3214
<i>Épaisseur du tube hydrocarbure [m]</i>	0.0015
<i>Conductivité thermique de la paroi côté hydrocarbure (cuivre) [W.K⁻¹]</i>	390
<i>Inclinaison des tubes (%)</i>	2

Les essais réalisés

3 séries d'essais ont été réalisées sur les deux géométries, avec des fluides purs (butane et propane) et avec un mélange (44 % butane et 56% propane en masse).

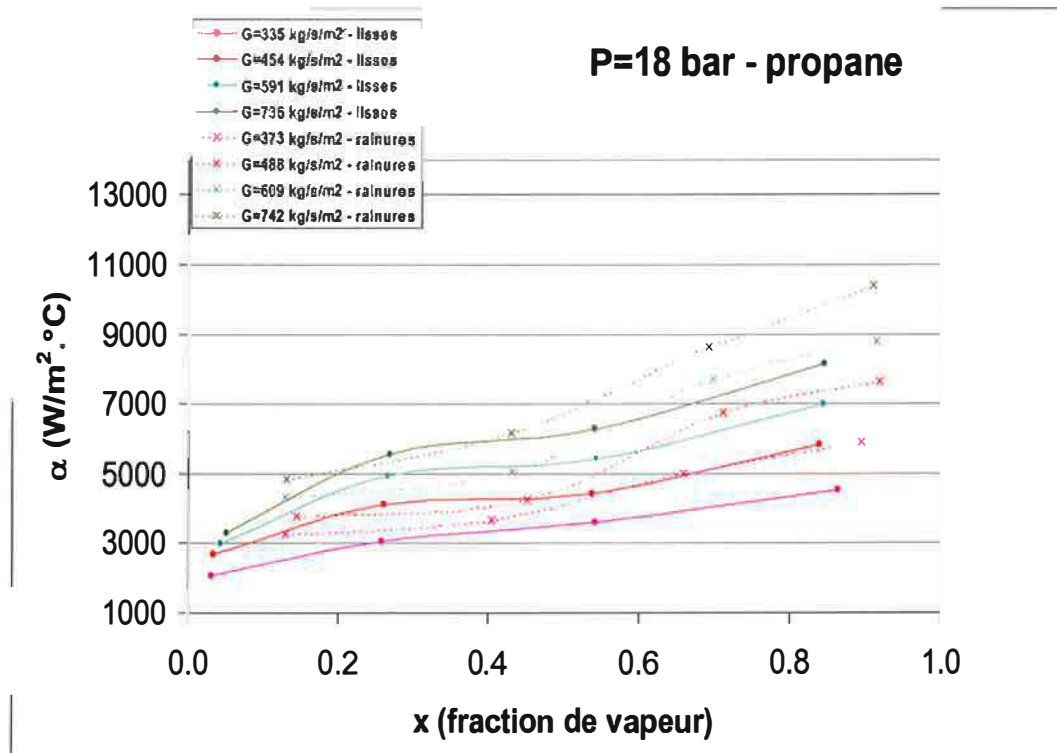
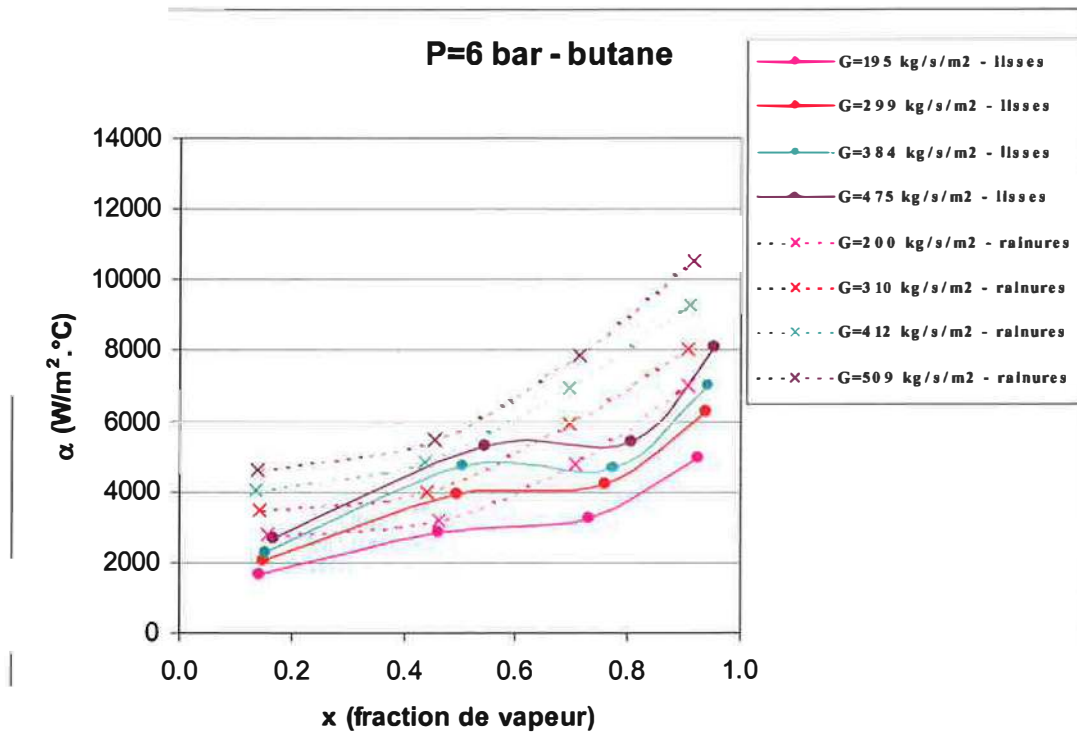
Pression : 4 à 18 bars

Vitesse massique : 120 à 900 kg/m² s



Les essais réalisés permettent d'extraire le coefficient d'échange pour chacune des passes de l'échangeur.

La comparaison des résultats entre le tube lisse et le tube rainuré montre une augmentation du coefficient d'échange qui peut atteindre un facteur 1,7 avec du butane mais seulement un facteur 1,4 pour le propane.



Analyse des résultats pour le tube lisse

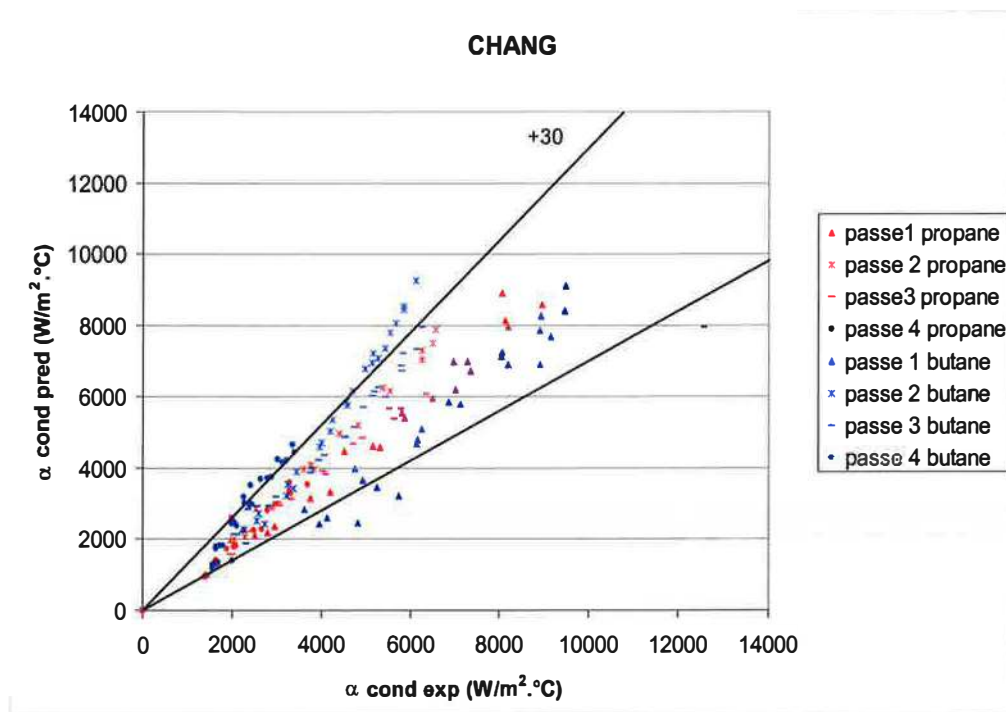
Les résultats ont été comparés à plusieurs corrélations de la littérature, et parmi celles-ci c'est la corrélation de Chang [2000] qui donne les meilleurs résultats.

Pour le mélange, la méthode de la courbe de condensation a été adoptée

$$\frac{\alpha_{chang}}{\alpha} = 1 + \frac{2,5}{X_c^{0.912}} \quad X_c = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.8} + \left(\frac{P_{sat}}{P^*} \right)^{0.5}$$

	BOYKO & KRUSHILIN		SHAH		CHANG	
	E _{Moyen}	E _{Absolue}	E _{Moyen}	E _{Absolue}	E _{Moyen}	E _{Absolue}
Propane	8%	11%	-22%	26%	5%	10%
Butane	-32%	37%	-41%	44%	-8%	20%
Précision		24 %	Précision	35 %	Précision	15 %

	CHANG		CHANG + Courbe de Condensation	
	E _{Moyen}	E _{Absolue}	E _{Moyen}	E _{Absolue}
mélange	-21%	22%	-10%	15%



Analyse des résultats pour le tube rainuré

Les résultats ont été comparés à plusieurs corrélations de la littérature et une nouvelle corrélation a été développée pour améliorer la prédiction du coefficient d'échange avec des tubes rainurés et pour des hydrocarbures purs ou en mélange.

$$\frac{\alpha_{calculé}}{\alpha} = \left(1 + \frac{2.5}{X_c^{0.912}}\right) \times (Bo \cdot Fr)^{-0.038}$$

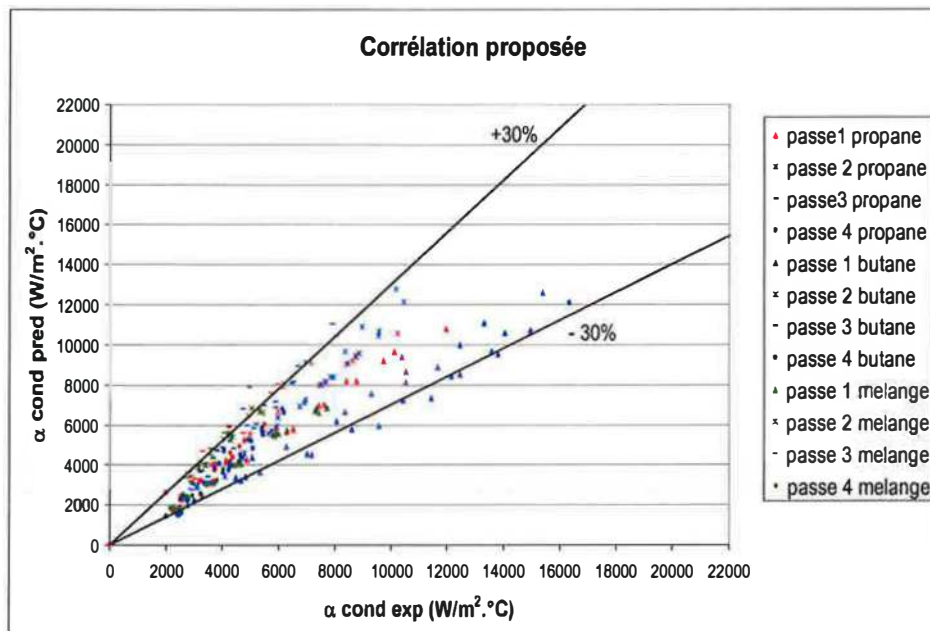
$$\alpha = 0.023 \times Re_L^{0.8} \times Pr_L^{0.4} \times \frac{\lambda_L}{D_i}$$

$$X_c = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.8} \times \left(\frac{P_{sat}}{P_c}\right)^{0.5}$$

$$Bo = \frac{g \cdot \rho_L \cdot h_a \cdot \pi \cdot D_i}{8 \cdot \sigma \cdot n_a}$$

$$Fr = \frac{u_{GO}^2}{g \cdot D}$$

	KEDZIERSKI & GONCALVES		GOTO		Corrélation proposée	
	E _{Moye} n	E _{Absolute}	E _{Moyen}	E _{Absolute}	E _{Moyen}	E _{Absolute}
Propane	24%	27%	2%	16%	-5%	12%
Butane	12%	25%	-2%	14%	4%	18%
Mélange	11%	20%	-13%	29%	-6%	19%
Précision		24	Précision	20%	Précision	16%



Conclusion

L'ensemble de ce travail permet de caractériser, d'un point de vue hydrodynamique et thermique, des hydrocarbures en condensation à l'intérieur de tubes lisses et rainurés. L'ensemble des moyens expérimentaux mis en place s'est montré parfaitement adapté pour la compréhension d'un certain nombre de mécanismes qui prévalent dans les conditions qui sont celles des condenseurs industriels. La mise en place d'une métrologie locale a été déterminante dans la caractérisation de l'écoulement en condensation au sein du tube. Les résultats obtenus ont permis d'améliorer la compréhension des phénomènes de transfert de chaleur en présence d'un écoulement diphasique à l'intérieur des tubes à surface lisse et rainurée.

Les résultats expérimentaux obtenus mettent en lumière des différences importantes de comportement au niveau hydrodynamique et thermique entre les hydrocarbures. Cette différence s'explique par des propriétés physiques différentes pour les mêmes conditions de fonctionnement, telle que la masse volumique vapeur du butane qui est plus faible que celles du propane et du mélange. En outre, les coefficients d'échange de chaleur obtenus expérimentalement pour le butane ($1500 < h < 17000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) sont supérieurs à ceux obtenus en propane ($1500 < h < 12000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) eux mêmes supérieurs à ceux obtenus avec le mélange ($1500 < h < 8000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

La méthode d'analyse, qui consistait à étudier les valeurs locales de transfert de chaleur, a permis de dissocier les échanges de chaleur pour les trois hydrocarbures, et à conduit à proposer une méthode d'évaluation du transfert de chaleur dans les tubes lisses et les tubes à micro-ailettes internes pour un écoulement annulaire. Finalement, les analyses développées au cours de cette étude m'ont amenées à caractériser, à partir des mesures locales, les mécanismes de transfert de chaleur à l'intérieur de tubes ainsi que les régimes d'écoulements, et à établir le coefficient d'échange thermique basé sur des mécanismes physiques représentatifs de l'écoulement. L'évaluation du coefficient d'échange de chaleur a été obtenue à partir de la carte d'écoulement de BAKER modifié par BELL et le modèle de CHANG a été utilisé pour calculer le coefficient d'échange thermique en condensation à l'intérieur de tubes lisses

L'utilisation des tubes à surface interne rainurée a permis de valider un modèle pour déterminer le coefficient d'échange thermique en condensation à partir des points expérimentaux. Ce modèle est basé sur la corrélation de CHANG établi en tube lisse et en tenant compte de l'effet de tension de surface. Ces tubes à micro-ailettes internes ont permis une augmentation des transferts de chaleur d'un facteur maximum 1.7 par rapport aux tubes lisses. Ces constatations confirment que l'utilisation de tubes rainurés permet d'optimiser le dimensionnement des condenseurs industriels. Cependant pour les essais en propane, une limitation de l'intensification est apparue car le facteur d'intensification n'était ici que de 1.4.

Références

- L. BOYKO and G. KRUSHILIN, Heat transfer and hydraulic resistance during condensation of steam in an horizontal tube and in a bundle of tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 10, pp 361-373, 1967.
- Y.S. CHANG, Performance and heat transfer characteristics of hydrocarbon refrigerants in a heat pump system, *International Journal of Refrigeration* (23), pp 232-242, 2000.
- M.A. KEDZIERSKI, J.M. GONCALVES, Horizontal convective condensation of alternative refrigerants within a micro-fin tube *Enhanced Heat Transfer* (6), pp 161-178, 1999.
- M.GOTO, N. INOUE, R. YONEMOTO, Condensation heat transfer of R410A inside internally grooved horizontal tubes, *International Journal of Refrigeration* (26), pp 410-416, 2003.
- M. SHAH, A general correlation for heat transfer during film condensation in tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 22, 1979.