

CAPTEUR D'ENCRASSEMENT PROTOTYPE DEVELOPPE ET VALIDATION

Dans ce chapitre, je présente tout d'abord une revue bibliographique de quelques capteurs utilisés pour détecter le facteur d'encrassement d'échangeurs de chaleur. Puis je décris les résultats obtenus suite au développement d'un capteur prototype non intrusif de mesure de l'encrassement dans une zone de chambrage. En particulier, je montre que ce dispositif est capable de rendre compte du facteur d'encrassement d'un échangeur de chaleur à plaques situé en amont et constituant une zone de chauffage.

3.1 BIBLIOGRAPHIE : LES CAPTEURS DE SUIVI D'ENCRASSEMENT

Même si, de nos jours, beaucoup de progrès ont été réalisés sur l'encrassement au sein de ligne de transformation ; ce phénomène n'est pas parfaitement contrôlé et il est nécessaire de disposer d'outils permettant d'évaluer le taux d'encrassement en temps réel. De tels dispositifs sont recherchés pour éviter de dépasser un certain niveau d'encrassement qui oblige à procéder à un nettoyage mécanique, nécessitant un démontage de l'équipement. Il est admis que la phase du nettoyage en place peut être optimisée par l'utilisation de capteur en ligne et hors ligne afin de réduire les temps de nettoyage et la quantité d'effluents (Alvarez, Daufin, et Gésan-Guiziou, 2010) mais, en pratique, de telles lignes instrumentées sont rarement présentes en industrie (Collier et al., 2015). Ainsi, bien qu'un nombre important de méthodes sont proposées pour détecter les facteurs d'encrassement des échangeurs de chaleur utilisés en industrie laitière (Collier, 2014 ; Wallhausser, Hussein, et Becker, 2012), il est aujourd'hui toujours difficile de déterminer de manière optimale le moment pour commencer ou terminer une opération de nettoyage.

Dans les deux paragraphes qui vont suivre, plusieurs méthodes de détection du facteur d'encrassement sont présentées et comparées. Cette description ne se veut pas exhaustive et si le lecteur souhaite connaître plus de méthodes utilisées ou de détails sur certain des principes de ces capteurs, il peut se référer aux nombreuses revues bibliographiques telle que celles proposées par Wallhausser, Hussein, et Becker (2012) et Collier (2014) spécifiques au secteur agroalimentaire. La présentation des méthodes de détection est divisée en deux parties, l'une concernant les mesures donnant une information globale sur le facteur d'encrassement de l'installation et l'autre concernant

les mesures locales. On peut classer les techniques suivant d'autres critères comme les mesures continues ou discontinues, intrusives ou non, en ligne ou hors ligne (Crattelet et al., 2013).

3.1.1 Les mesures globales

Les analyses hors ligne comme la pesée des masses de dépôt sont des techniques fiables pour mesurer le niveau d'encrassement mais cela nécessite le démontage de l'échangeur à plaques ce qui limite cette méthode aux études scientifiques.

Par contre, la mesure en ligne de la perte de pression (Corrieu, Lalande, et Ferret, 1986) est moins gênante et en dépit des imperfections (cf. 2.1.4), elle est utilisée par les industriels pour déterminer le niveau global d'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques.

La mesure des températures et des débits des fluides à traiter et des fluides d'usage permet aussi d'obtenir une information sur le niveau global d'encrassement au moyen du calcul du coefficient d'échange de chaleur global ou de la résistance (cf. 2.1.4).

Des modèles numériques ont aussi été proposés pour détecter l'encrassement à partir de ces mesures. La transformation en ondelettes (Ingimundardottir et Lalot, 2011) ou les réseaux de neurones (Lalot et Palsson, 2010) sont deux exemples de techniques capables de détecter l'encrassement en temps réel. La détection de l'encrassement se fait en estimant l'écart entre le modèle du système obtenu en condition propre et en condition de fonctionnement. Cependant l'implémentation sur des procédés réels doit être réalisée pour confirmer l'intérêt d'utiliser ces techniques à une échelle industrielle.

3.1.2 Les mesures locales

L'exploitation des ondes sonores a été récemment étudiée pour mesurer le facteur d'encrassement de manière non intrusive. L'utilisation d'ondes ultrasonores a aussi été étudiée pour déterminer la force d'adhésion des dépôts (Collier et al., 2015, Figure 27). Merheb et al. (2007) ont analysé la réponse acoustique d'un échangeur de chaleur à plaques soumis à des impulsions mécaniques générées par un dispositif électromagnétique (Figure 28) pour évaluer l'état d'encrassement de l'échangeur. L'inconvénient principal de ces deux techniques est qu'elles nécessitent l'installation de matériels coûteux et une analyse de signaux complexe qui freinent le passage vers des applications industrielles. Une technologie plus prometteuse pour suivre l'encrassement est basée sur l'utilisation de capteur de surface mécatronique (Pereira et al., 2006)

présentée dans la Figure 29. Ce dispositif donne une information sur la quantité de dépôt formé et ses propriétés élastiques. Le principe repose sur l'analyse de la réponse à une excitation mécanique de la surface en acier sur laquelle se forme le dépôt. Le capteur n'est pas intrusif mais il nécessite la fabrication d'une cellule d'écoulement semi-cylindrique spécifique qui intègre le capteur de surface mécatronique.

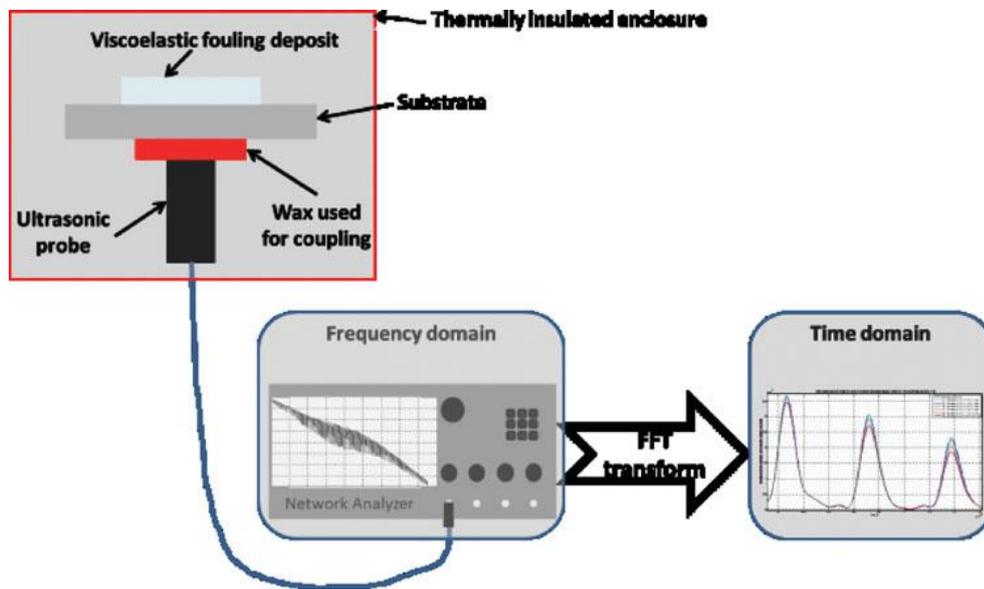


Figure 27. Schéma du dispositif ultrasonore (Collier et al., 2015).

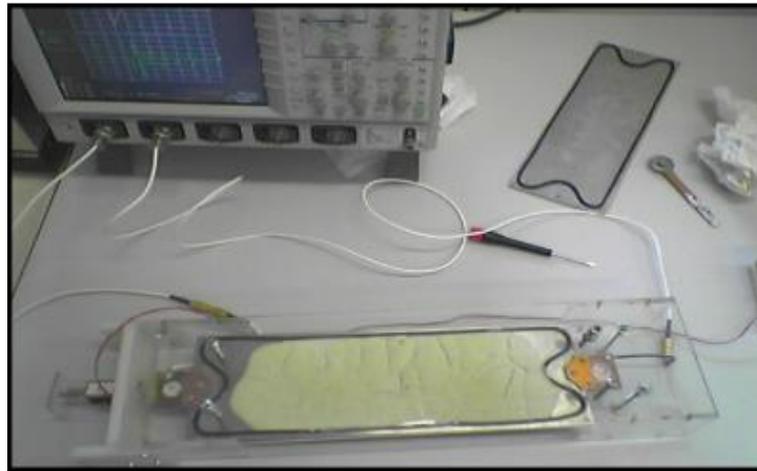
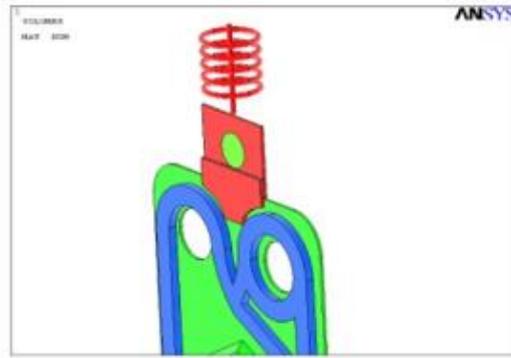


Figure 28. Schéma et prototype du dispositif de mesure du facteur d'encrassement par onde acoustique (Merheb et al., 2007).

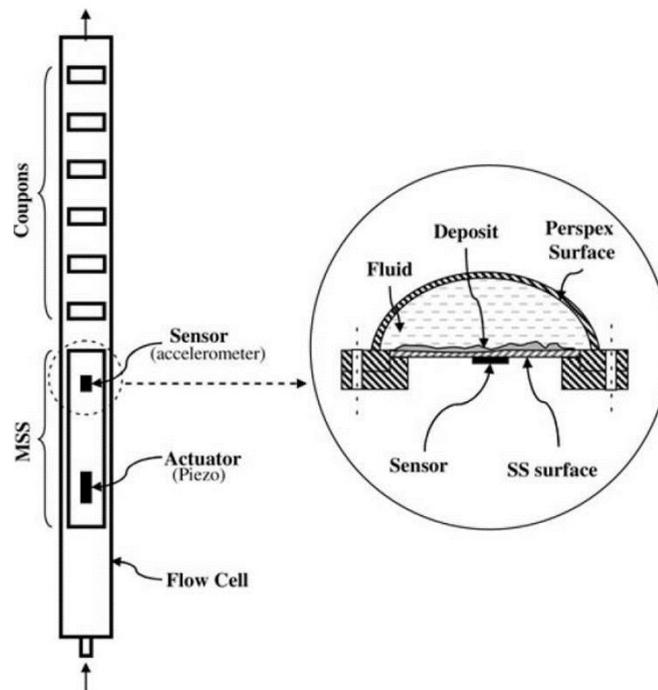


Figure 29. Représentation schématique de la cellule de mesure du capteur mécatronique (Pereira et al., 2006).

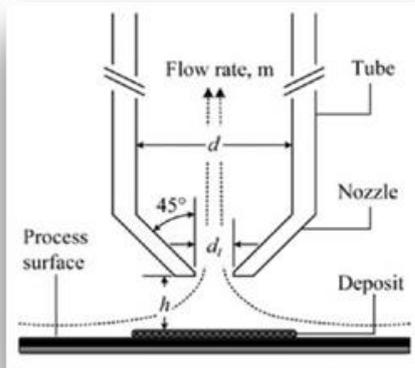


Figure 30. Schéma de la sonde FDG (Ali et al., 2013).

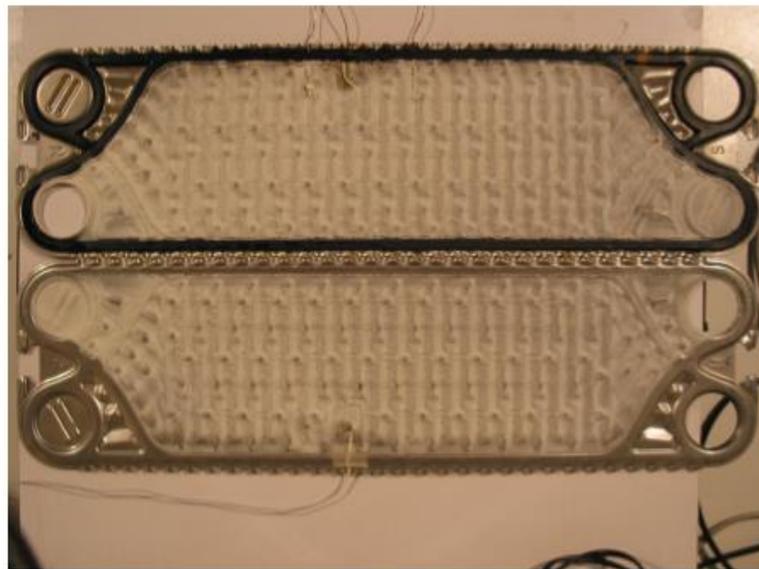


Figure 31. Photo du dispositif de mesure de la conductivité électrique (Guerin et al., 2007).

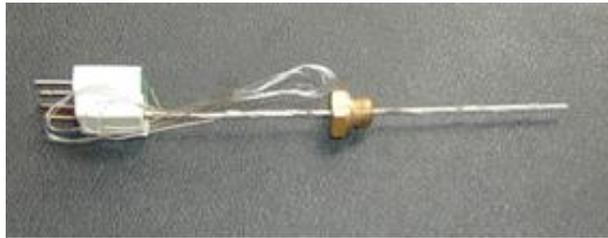


Figure 32. Sonde à fil chaud (Crattelet et al., 2013).

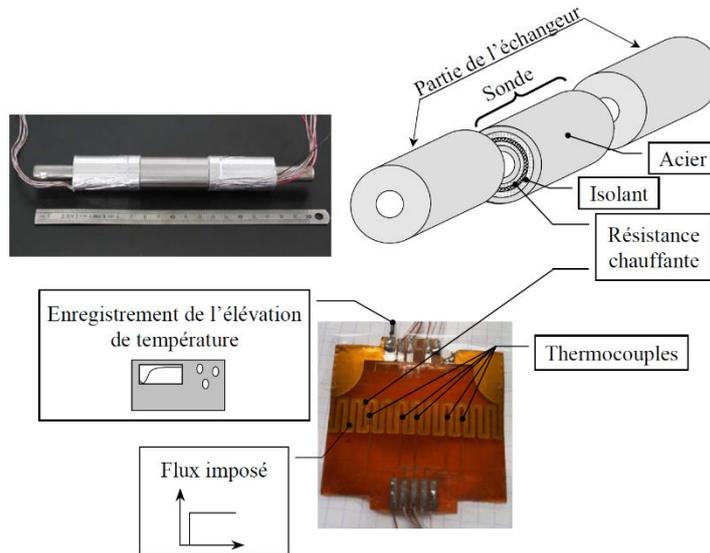


Figure 33. Schéma du capteur à excitation thermique interne (Perez, 2003).

L'étude menée par Ali et al. (2013) est une preuve de concept sur la capacité de la jauge de dynamique des fluides (Fluid Dynamic Gauging ou FDG) soumise à des pressions et des températures élevées à mesurer la croissance d'un dépôt en temps réel. La sonde FDG (Figure 30) permet une mesure sans contact à l'aide d'une buse immergée dans le liquide encrassant face au dépôt attaché à la paroi. Un débit de circulation du liquide dans la buse est établi à une valeur fixe. La distance entre la buse et la paroi ou la surface du dépôt est obtenue à partir de la variation de pression mesurée au niveau de la buse. L'application aux procédés agroalimentaires comme ceux traitant les produits laitiers est difficile car la sonde FDG est intrusive et risque d'être aussi sujette à l'encrassement.

La mesure de la conductivité électrique est une autre voie pour surveiller l'encrassement dans les échangeurs de chaleur à plaques. Chen et al. (2004) et Guerin et al. (2007) ont montré que cette technique permet d'évaluer l'encrassement laitier en ligne. Pour ces deux exemples, le montage

du dispositif n'est pas simple, les électrodes doivent être correctement isolées par rapport à l'échangeur de chaleur. Le dispositif utilisé par Guerin et al. (2007) est présenté dans la Figure 31.

La technique du fil chaud (Crattelet et al., 2013) est utilisée à une échelle industrielle. Ces capteurs sont placés dans la solution encrassante et deux modes de fonctionnement sont proposés, le régime thermique permanent ou périodique. Cette technique est capable d'évaluer le phénomène d'encrassement et d'évaluer des propriétés physiques du dépôt. L'inconvénient de ce dispositif, présenté Figure 32, est qu'il est intrusif. Le principe de ce capteur consiste à générer une excitation thermique et à mesurer la variation de la température au niveau de la sonde sur laquelle le dépôt va croître. Un autre type de capteur à excitation thermique fonctionnant sur le même principe a été étudié dans le cadre de la thèse de Perez (2003). Ce capteur est présenté dans la Figure 33 et est intégré dans la paroi de l'échangeur.

Chacune des techniques présentées ont des avantages et des inconvénients. Le capteur d'encrassement proposé et présenté par la suite a été développé avec pour objectif d'être facile à installer, utiliser, non intrusif et peu cher. Les performances du dispositif ont été validées à l'échelle du pilote. Ce capteur nécessite la génération d'un flux de chaleur contrôlé à la surface externe d'une section de tube droit et la mesure d'une température à la surface externe du tube. Cette température augmente avec la croissance du dépôt du fait de l'augmentation de la résistance thermique provenant de dépôt encrassant. La méthode utilisée est proche de celle utilisée avec la sonde « neosens FS-1000 » mais avec un montage à l'extérieur de la conduite où circule le fluide encrassant et non pas à l'intérieur. Le Tableau 13 présente, de manière synthétique, les avantages, limitations et échelles d'application de plusieurs méthodes de mesure.

Tableau 13. Méthodes de mesure (Collier, 2014).

Méthode	Avantages	Limitations	Echelle d'application
Perte de charge	Pas d'instrumentation supplémentaire sur la ligne de transformation	Pas sensible à l'adhésion	Mesure globale du facteur d'encrassement et non invasive
Température	Pas d'instrumentation supplémentaire sur la ligne de transformation	Pas sensible à l'adhésion	Mesure globale du facteur d'encrassement et non invasive
Conductivité électrique dans le canal	Capteur peu onéreux	Pas sensible à l'adhésion, implantation nécessaire, mesure indirecte	Mesure locale et non invasive
Simulation numérique	Cartographie et distribution si emploi de paramètres appropriés	La validation nécessite des modèles de connaissances (réaction, constante de dépôt= $f(\text{paramètres procédés})$)	Mesure locale et globale du facteur encrassement, non invasive
MSS	Détection/suivi de la présence d'un dépôt	Pas sensible à l'adhésion, interprétation des paramètres acoustiques	Mesure locale et off line
Acoustique basse fréquence	Détection/suivi du facteur d'encrassement moyenné sur chaque plaque d'échangeur	Implantation des capteurs, répétabilité, interprétation des paramètres acoustiques difficiles	Mesure globale et non invasive

3.2 DEVELOPPEMENT D'UN CAPTEUR D'ENCRASSEMENT NON INTRUSIF

3.2.1 Principe et présentation du capteur

Ce capteur est composé d'une résistance électrique plane qui recouvre un thermocouple (Figure 34) en contact avec la paroi externe d'un manchon installé dans une zone de chambrage. Cette zone de chambrage est située en aval d'une zone de chauffe constituée par un échangeur de chaleur à plaques et au sein duquel on souhaite quantifier le facteur d'encrassement.



Figure 34. Photo du capteur de température collé à la surface du tube.

Le principe de mesure de ce capteur consiste à suivre l'évolution de la température au cours du temps, lorsqu'un flux thermique imposé par la résistance est dissipé au travers du capteur de température. Cette température évolue au cours du temps avec la formation de la couche de dépôt qui modifie le gradient de température local.

Le capteur se présente sous la forme d'un mince empilement en contact avec la surface externe d'une section de tube droit (Figure 35a). Il est composé d'un thermocouple de type T, d'une résistance de cuivre plane carrée de côté 50 mm de valeur $27,5 \Omega$ et d'un isolant à base de mousse élastomère. Le tube sur lequel est monté le capteur est disposé verticalement. Dans cette position, l'effet de la gravité sur le phénomène de déposition est minimisé.

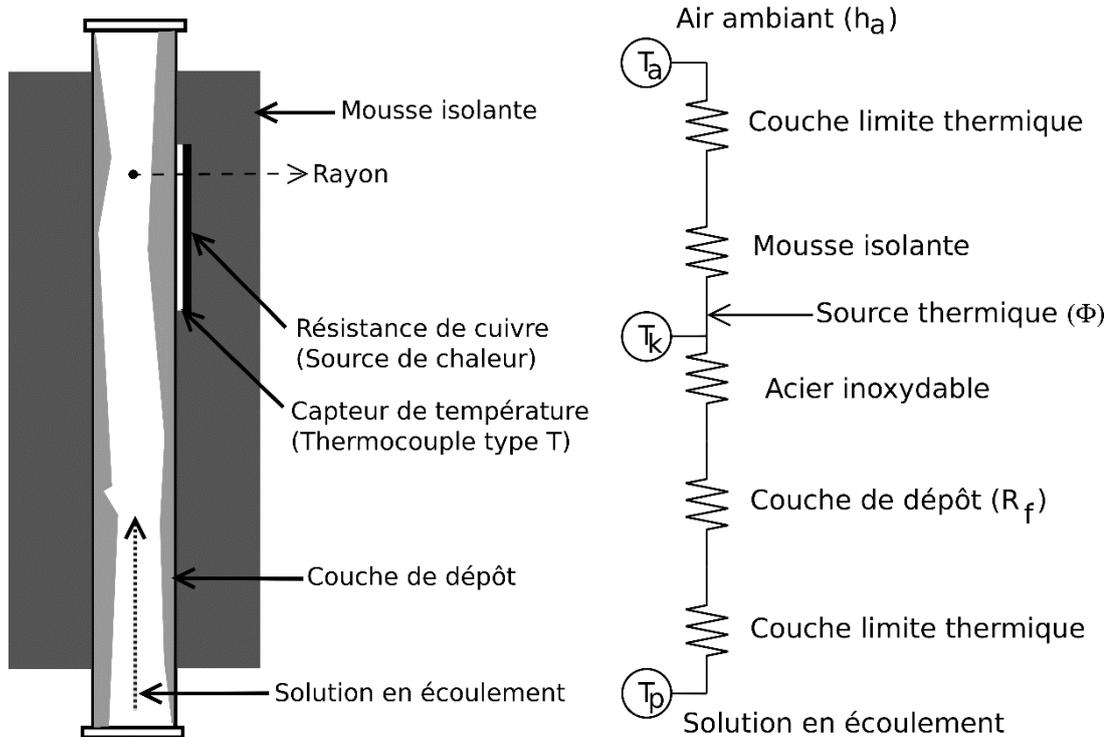


Figure 35. (a) Vue en coupe du capteur d'encrassement. (b) Schéma thermique équivalent sur un rayon. T_p , T_k et T_a symbolisent respectivement la température du fluide en circulation, du capteur et de l'air ambiant. h_a , Φ et R_f représentent respectivement le coefficient de transfert thermique vers l'air ambiant, le flux de chaleur surfacique et la résistance thermique d'encrassement.

Une tension inférieure à 10 V est appliquée à la résistance au moyen d'une alimentation stabilisée. Une centrale de mesure enregistre la température et la tension en continu. Dans des conditions stationnaires, en simplifiant le système à 1 seule dimension et en considérant le schéma thermique équivalent Figure 35b, on obtient l'expression suivante pour la résistance thermique d'encrassement du manchon (R_s). Le calcul est décrit dans l'annexe 2.

$$R_s = \frac{(T_{kf} - T_{kc}) - (T_{pf} - T_{pc})}{\Phi + h_a(T_a - T_{kc})} = \frac{\Delta T_f - \Delta T_c}{\Phi + h_a(T_a - T_{kc})} \quad \text{Équation 41}$$

Avec :

- T_{kf} Température du capteur avec encrassement, °C
- T_{kc} Température du capteur sans encrassement, °C
- T_{pf} Température du produit avec encrassement, °C
- T_{pc} Température du produit sans encrassement, °C
- h_a Coefficient de transfert thermique vers l'air ambiant, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- Φ Flux de chaleur surfacique produit par la résistance, $\frac{V^2}{RS}$, $W \cdot m^{-2}$
- T_a Température de l'air ambiant, °C

On peut alors estimer l'épaisseur du dépôt à partir des propriétés physiques du dépôt.

$$d_f = R_s \lambda \quad \text{Équation 42}$$

Avec :

R_s Résistance d'encrassement mesurée par le capteur, $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

λ Conductivité thermique du dépôt protéique, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

La conductivité thermique du dépôt encrassant est, a priori, inconnue mais plusieurs auteurs ont essayé de la mesurer. Les valeurs citées dans la littérature varient entre 0,13 et 0,38 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (Tuladhar, Paterson, et Wilson, 2002). Pour tous les calculs qui vont suivre, une valeur moyenne de 0,25 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a été choisie pour k.

3.2.2 Installation expérimentale pilote mise en place

Les essais d'encrassement ont eu pour but de montrer que la réponse de ce capteur est corrélée à la formation de dépôt qui a lieu dans l'échangeur de chaleur à plaques situé en amont.

Les essais d'encrassement pour la validation de la sonde ont été réalisés sur une installation pilote présentée Figure 36. La solution de protéines de lactosérum est préparée dans une cuve équipée d'un système d'agitation. La solution est préparée à partir d'une poudre de protéines d'ultrafiltrat (Promilk 852 FB1, Ingredia, Arras, France) dissoute dans de l'eau osmosée à une concentration de 1 % (p/p). La concentration en calcium est ajustée par ajout de CaCl_2 à (95 ± 5) ppm. Cette concentration est mesurée à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique suivant la même méthode décrite par Khaldi, Blanpain-Avet, et al. (2015) ; Khaldi et al. (2018). La solution contenant très peu de matière sèche, les propriétés physiques de la solution sont considérées comme identiques à celle de l'eau. Le débit de circulation est fixé à l'aide du variateur mécanique de la pompe volumétrique (marque PCM). Un débitmètre électromagnétique enregistre le débit du produit. Deux échangeurs de chaleur à plaques (Vicarb, model V7) assurent la montée en température du produit depuis la température ambiante de 22 °C jusqu'à 65 °C en zone de préchauffage et de 65 °C à 80 °C ou 82 °C en zone de chauffage. Deux boucles d'eau chaude sont utilisées et permettent d'ajuster indépendamment la température à la sortie de ces deux zones de chauffage. Le capteur d'encrassement est installé immédiatement après la sortie de la zone de chauffage.

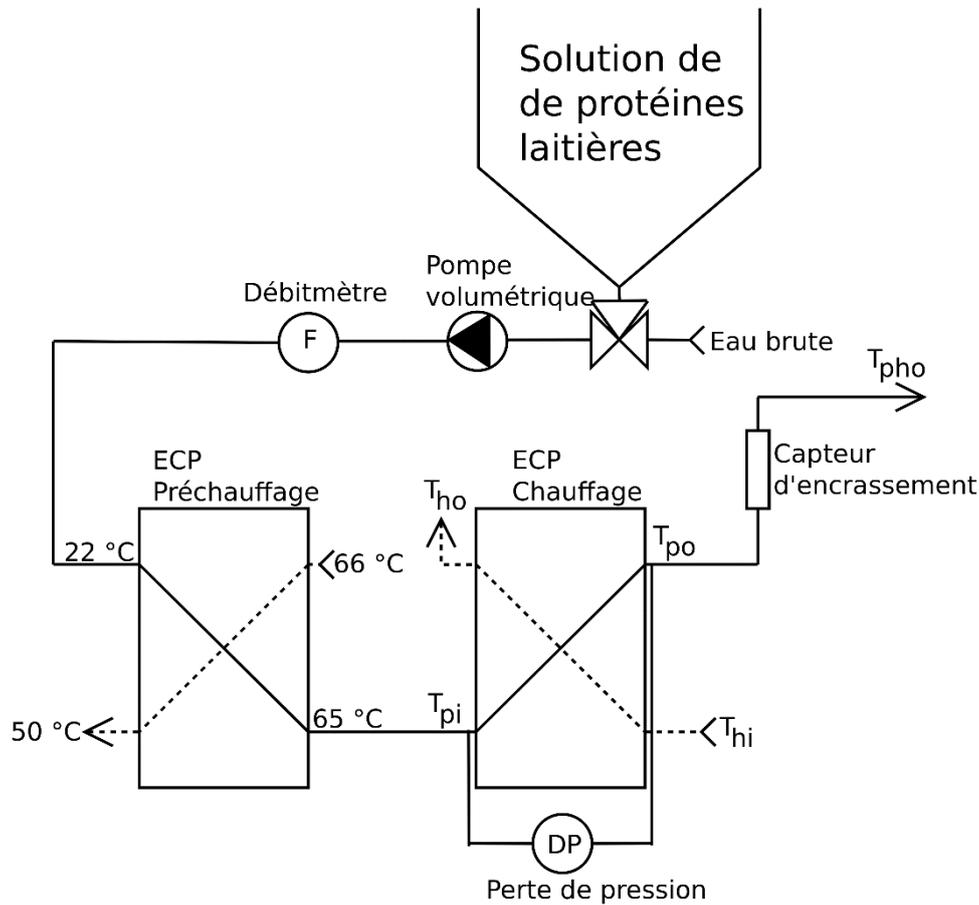


Figure 36. Schéma de l'installation pilote. T_{hi} , T_{ho} , T_{pi} , T_{po} et T_{pho} correspondent respectivement à la température d'entrée et de sortie du fluide chaud, d'entrée et de sortie du produit et de sortie de la zone de chambrage. Les circuits d'eau chaude sont symbolisés par des traits en pointillé.

La zone de chauffe est composée de 10 plaques en acier inoxydable comportant des corrugations horizontales, qui constituent 5 canaux pour le produit et 4 canaux pour l'eau chaude. La température de la solution de protéines est maintenue constante en sortie d'échangeur en augmentant progressivement la température d'entrée de l'eau chaude T_{hi} . Le débit de produit est maintenu constant à la valeur de $0,833 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en utilisant une pompe volumétrique. Le coefficient de transfert de chaleur global de la zone de chauffage exprimé en $\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ est défini par :

$$U = \frac{Q_p}{S \times \Delta T_{ML}} \quad \text{Équation 43}$$

Avec :

Q_p Quantité de chaleur échangée avec le produit, $\rho \dot{m}_p C_p (T_{po} - T_{pi})$, W

ρ Masse volumique du produit, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

\dot{m}_p Débit massique de produit, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

C_p Capacité thermique du produit, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

S Surface totale d'échange dans l'ECP, m^2

DTML Différence de température moyenne logarithmique, $\frac{(T_{hi}-T_{po})-(T_{ho}-T_{pi})}{\ln\left(\frac{T_{hi}-T_{po}}{T_{ho}-T_{pi}}\right)}$, K

La résistance thermique d'encrassement (R_f) s'écrit :

$$R_f = \frac{1}{u_f} - \frac{1}{u_c} \quad \text{Équation 44}$$

Dans cette expression, U_f et U_c représentent respectivement les coefficients globaux d'échange de chaleur exprimés en $W.m^{-2}.K^{-1}$ en conditions encrassée et propre.

3.2.3 Conditions opératoires des tests d'encrassement

Trois conditions expérimentales de chauffage notées A à C ont été explorées dans la zone de chauffe et correspondent à des débits et températures différents. La condition A correspond à une température de sortie de produit de 82 °C et un débit d'eau chaude de $0,833.10^{-4} m^3.s^{-1}$, respectivement 82 °C et $2,777.10^{-4} m^3.s^{-1}$ pour le cas B et 80 °C et $2,777.10^{-4} m^3.s^{-1}$ pour le cas C. Les profils de température du produit pour les trois conditions sont présentés sur la Figure 37. Les profils sont obtenus par calcul avec le logiciel SPHERE v4 qui a été développé par l'INRA en collaboration avec Danone. Les essais d'encrassement ont été répétés respectivement 5, 4 et 2 fois pour les profils A, B et C.

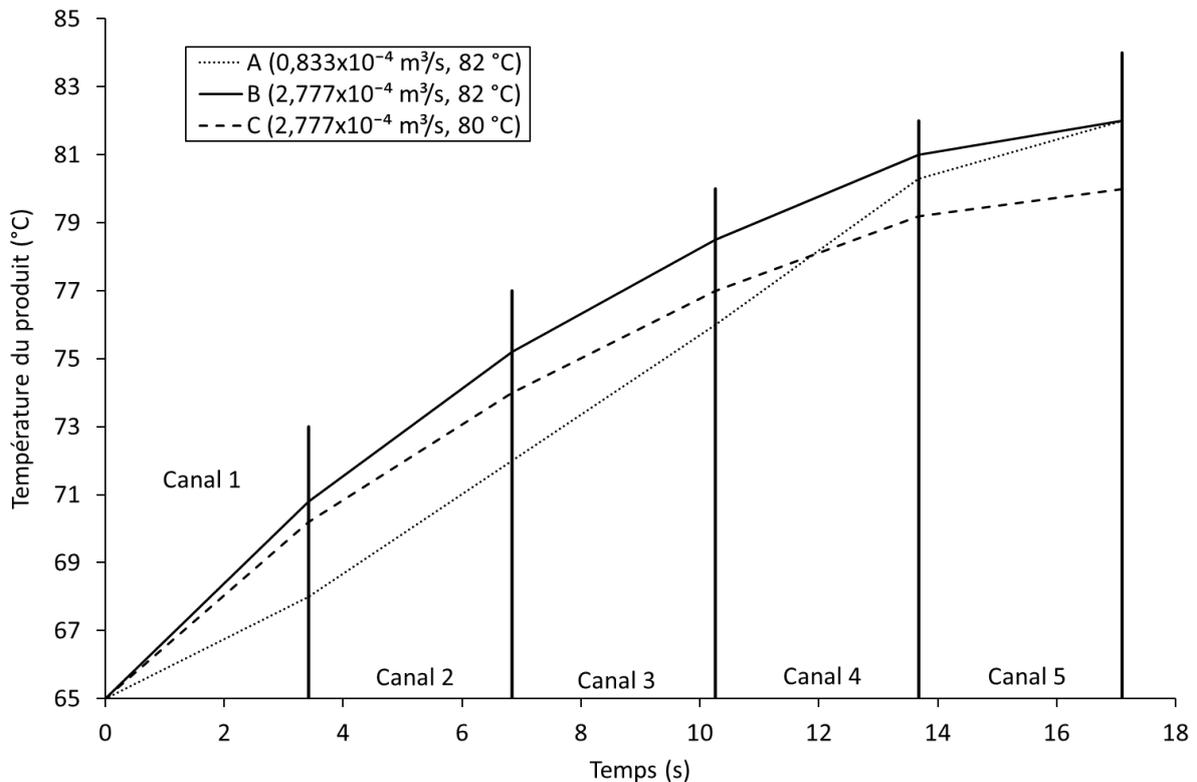


Figure 37. Profils de température dans l'échangeur de chaleur à plaques dans des conditions propres pour les différentes combinaisons de températures de sortie du produit et de débits d'eau chaude.

Les expérimentations démarrent avec de l'eau brute comme fluide primaire. Cette phase de mise en température de l'installation dure environ 30 min. Lorsque les températures sont stabilisées à la valeur de consigne, le circuit est alimenté en solution au moyen d'une vanne trois voies pour une durée de 3 heures. Cette procédure de démarrage permet d'éviter une formation de dépôt durant cette phase de régime transitoire. Pour tous les essais réalisés avec les profils de température A à C, le débit de la solution de protéines a été maintenu constant à $0,833 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le nombre de Reynolds varie de 3000 pour la solution à la température la plus faible dans le bac de lancement à 8500 pour la température de produit la plus élevée après chauffage et dans le tube de chambrage ce qui correspond à un régime d'écoulement turbulent dans toutes les zones de l'installation. Le régime d'écoulement est également turbulent dans tous les canaux des échangeurs de chaleur à plaques. Pour pallier aux conséquences de l'augmentation de la résistance thermique de l'échangeur due à l'encrassement au cours du temps, la température de sortie du produit est maintenue constante par un ajustement régulier de la température d'entrée de l'eau chaude. A la fin de l'essai, le circuit est rincé avec de l'eau brute puis l'échangeur de chaleur est démonté. Le dépôt sec de chacune des plaques est pesé avec une précision de $\pm 0,1 \text{ g}$. Le dépôt sec formé à l'intérieur de la section de tube équipée de la sonde est aussi pesé. Enfin, l'échangeur est remonté et le nettoyage en place de l'installation est réalisé. La procédure de nettoyage est réalisée en 3 étapes :

- Rinçage à l'eau brute à 80 °C pendant 10 min à 600 L/h.
- Nettoyage avec de la soude à 2 % (p/p) à 80 °C pendant au moins 30 min à 600 L/h.
- Rinçage à l'eau brute à 80 °C pendant 10 min à 600 L/h.

L'étape de nettoyage sur soude est prolongée tant que la perte de pression n'est pas revenue à son niveau correspondant à une installation propre. La propreté des échangeurs est vérifiée visuellement avant toute nouvelle expérimentation. Les mesures obtenues avec le capteur d'encrassement sont comparées aux mesures de la perte de pression, du coefficient global d'échange de chaleur et des masses de dépôt sec.

3.3 RESULTATS ET DISCUSSION

La Figure 38 montre la distribution des masses de dépôt à l'intérieur de l'échangeur de chaleur à plaques pour les 3 conditions expérimentales utilisées. On observe une bonne répétabilité des essais exception faite des canaux 1 à 3 du cas A.

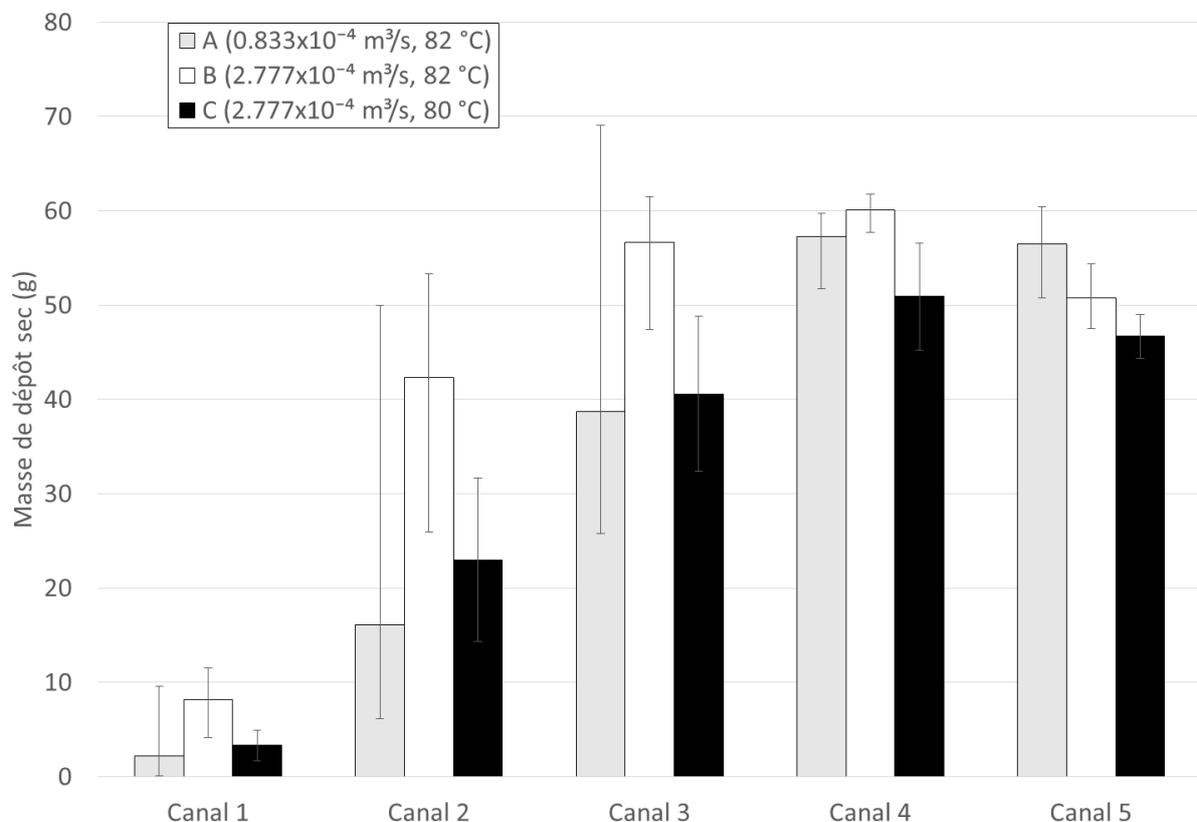


Figure 38. Masses de dépôt sec (valeurs minimum, moyenne et maximum) observées dans l'échangeur de chaleur. Le débit d'eau chaude et la température sont indiqués pour chacun des profils de température A à C.

La quantité de dépôt augmente depuis une valeur très faible dans les premiers canaux jusqu'à atteindre une valeur plateau dans les 2 derniers canaux. La masse de dépôt devient plus importante dès que la température de la solution dépasse 70 °C ce qui a été observé par les auteurs Khaldi, Blanpain-Avet, et al. (2015) et Khaldi et al. (2018). La solution de protéines contient principalement de la β -lactoglobuline (66,0 % p/p dans la poudre utilisée). La réaction de dénaturation chaude de la β -lactoglobuline en présence de calcium est responsable de la croissance du dépôt (Lalande, Tissier, et Corrieu, 1985). Les expérimentations réalisées confirment que le phénomène de dénaturation de la β -lactoglobuline commence dès que la température dépasse 70 °C ce qui est le cas à partir du 2^{ème} canal d'échangeur. On constate que le traitement thermique le plus sévère correspondant au profil de température B de la Figure 37 produit la masse totale de dépôt la plus importante. Ceci illustre la cohérence des résultats.

La perte de pression mesurée à la fin des essais d'encrassement est comparée à la masse totale de dépôt sec dans l'échangeur de chaleur dans la Figure 39. La perte de pression augmente globalement avec la quantité de dépôt mais on ne peut pas établir de relation permettant de lier ces deux paramètres. En effet, la perte de pression est une mesure globale entre l'entrée et la sortie de l'échangeur très sensible à l'encrassement local. Si, au cours de la formation de dépôt, un obstacle se forme en un point du circuit la perte de pression peut augmenter fortement alors que la masse de dépôt est faible. Cela peut expliquer que pour une valeur de masse de dépôt sec de 150 g on obtient des valeurs de perte de pression allant de 1500 Pa à plus de 5000 Pa. Le dépôt ne se forme pas de manière homogène comme le montre la Figure 38 ce qui explique les fortes variations de perte de pression possibles pour deux expérimentations réalisées dans les mêmes conditions.

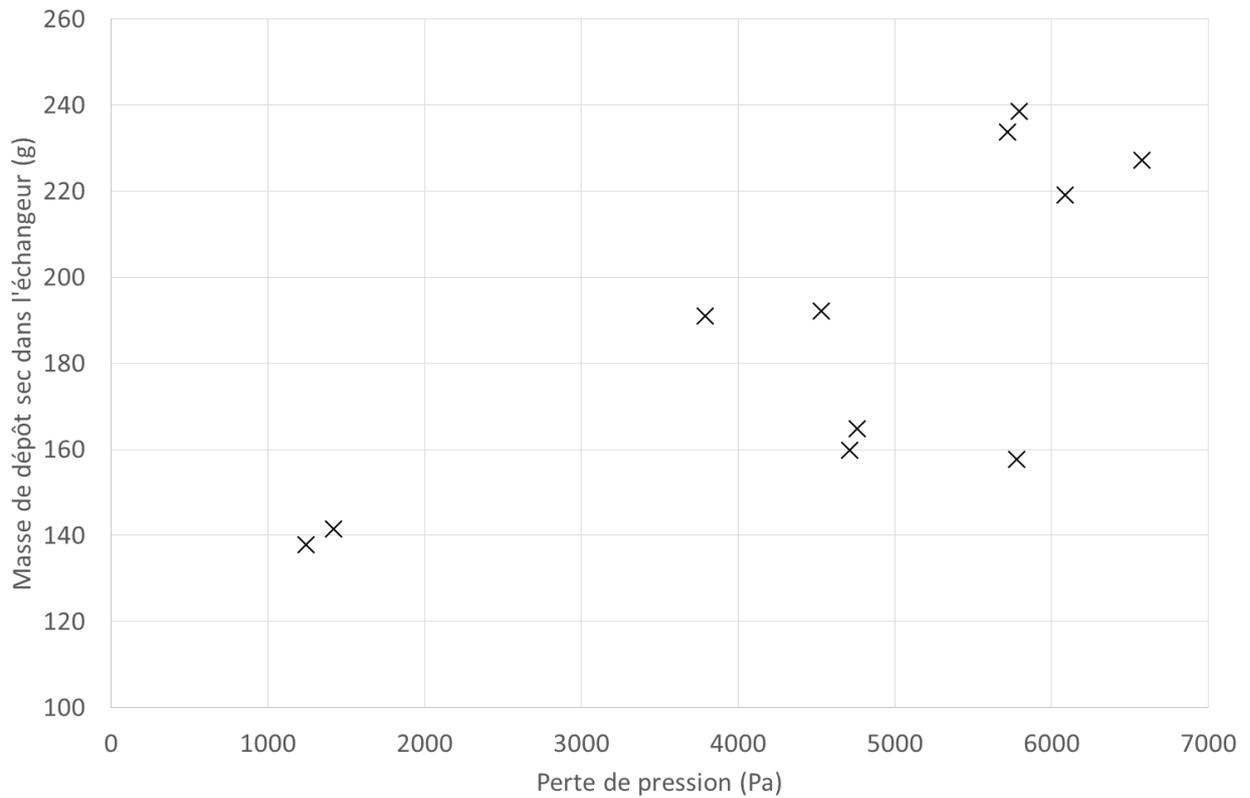


Figure 39. Masse totale de dépôt sec en fonction de la perte de pression.

La mesure du capteur d'encrassement utilise la mesure de la température du produit et la température à la paroi externe du tube T_k . La Figure 40 montre un exemple d'évolution de la température au cours du temps pour un essai d'encrassement réalisé avec le profil C.

Si on retranche la température produit à la température à la paroi externe du tube T_k au début de l'expérimentation $\Delta T_c = (T_k - T_p)_{t=0}$, l'augmentation de la température à la paroi externe du tube au cours du temps (symbole noir) devient perceptible. Cette augmentation est directement liée à l'augmentation de la résistance thermique d'encrassement décrite dans la relation Équation 41.

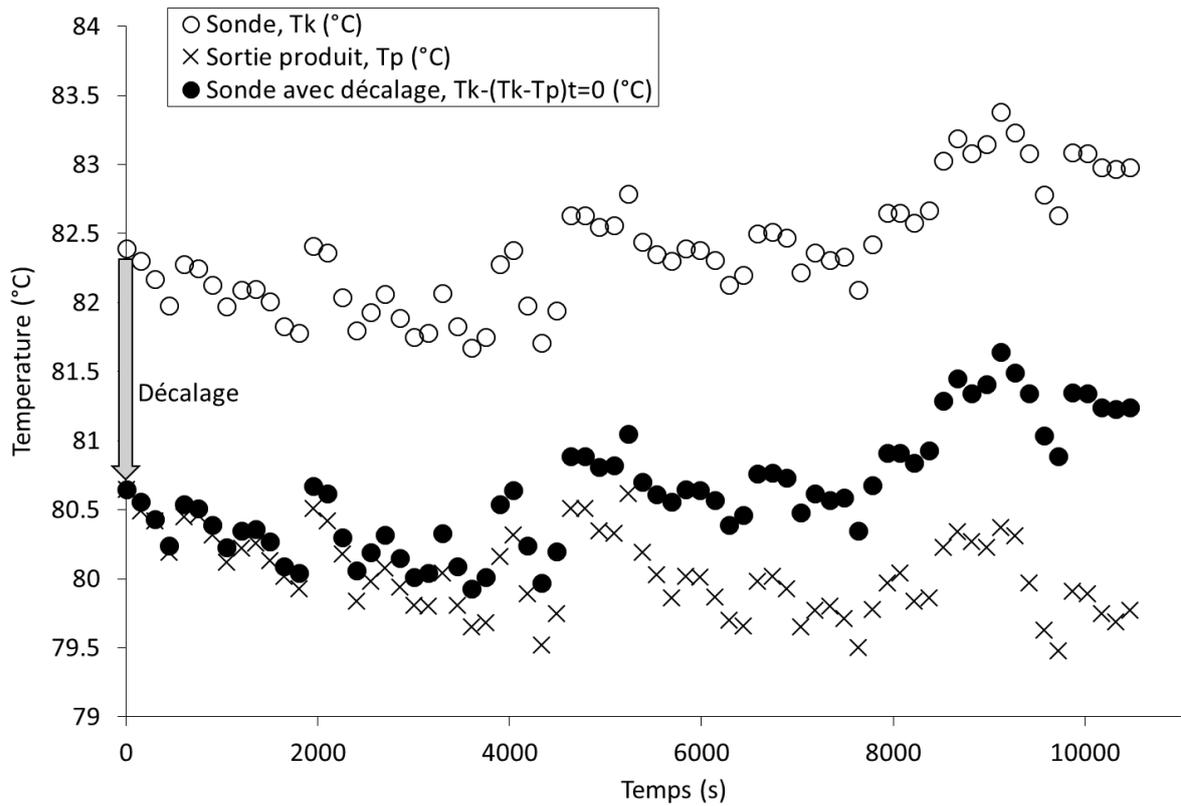


Figure 40. Températures enregistrées lors de l'encrassement avec le profil C.

L'évolution des performances thermiques de l'échangeur de chaleur à plaques au cours de l'encrassement peut être représentée par la résistance thermique surfacique de l'échangeur. L'enregistrement de la résistance thermique surfacique (R_s) fournie par le capteur d'encrassement est comparé aux valeurs obtenues dans l'échangeur de chaleur (R_f) sur le graphique ci-après (Figure 41).

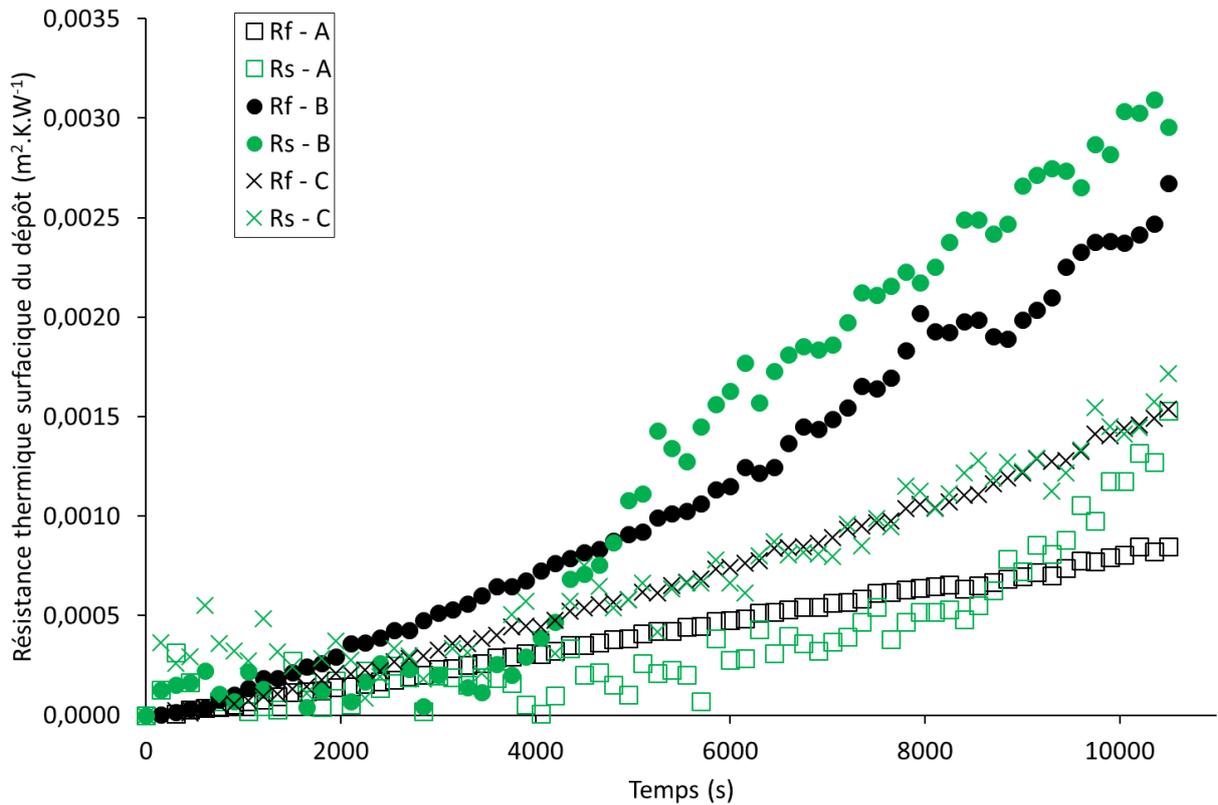


Figure 41. Comparaison des résistances d'encrassement calculées à partir des températures d'entrée/sortie de l'échangeur (R_f , en noir) et du capteur d'encrassement (R_s , en vert).

La résistance thermique surfacique mesurée avec le capteur d'encrassement est proche de celle mesurée dans l'échangeur pour le profil de température C correspondant à la plus faible température de traitement. Pour les profils de température A et B, la résistance d'encrassement est surestimée en fin d'expérience.

Les épaisseurs de dépôt estimées avec le capteur d'encrassement ont été comparées aux masses de dépôt sec obtenues dans le deuxième canal de l'échangeur (Figure 42 a et b).

On obtient le même type de résultat avec le troisième canal non représenté ici. La masse de dépôt sec dans le premier canal est si faible que la précision des mesures est insuffisante pour tenter une interprétation des données. En ce qui concerne les deux derniers canaux, les masses de dépôt sont très élevées et ne varient plus, on atteint probablement un seuil maximal de saturation.

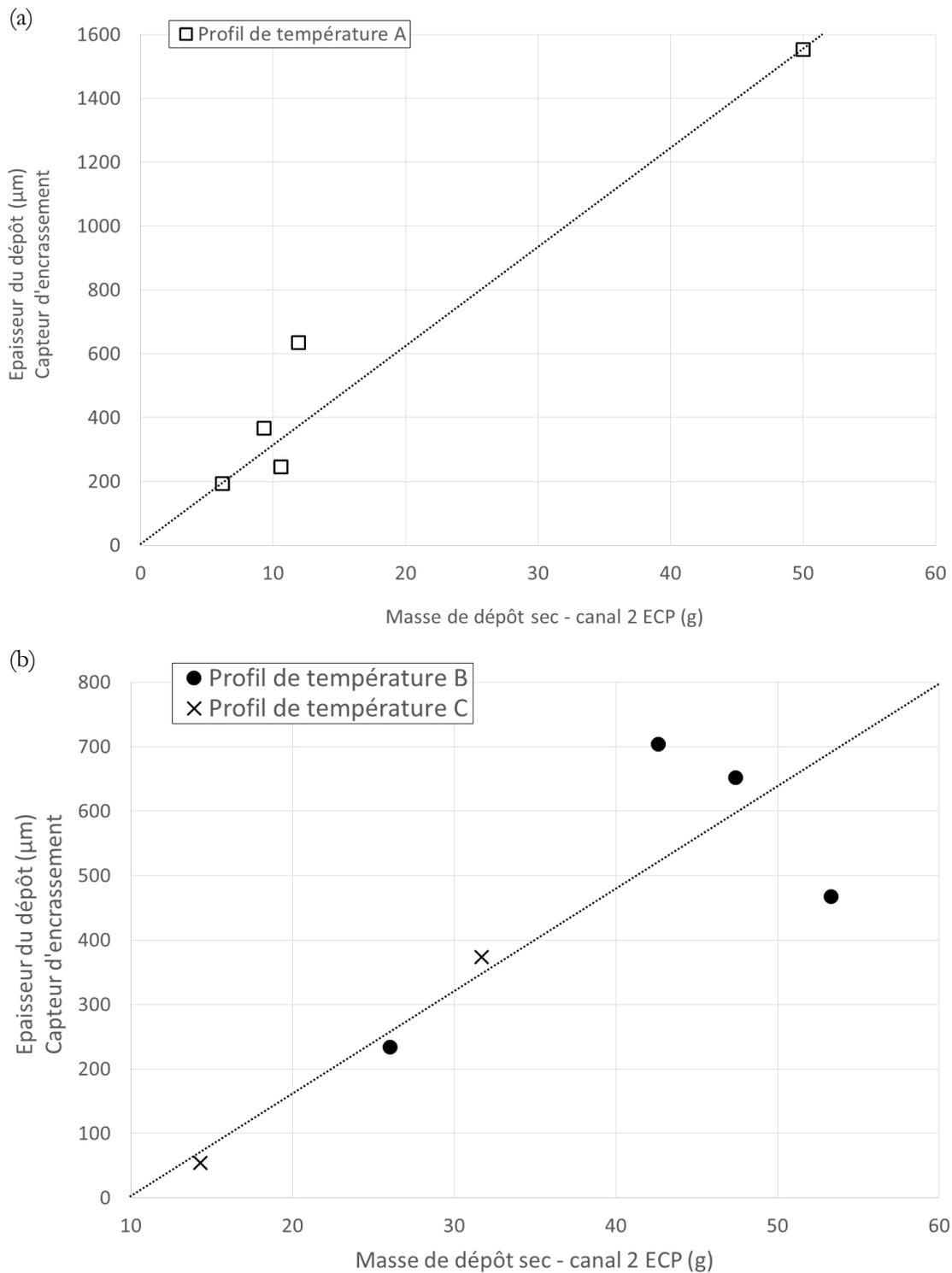


Figure 42. Epaisseur de dépôt mesurée par le capteur d'encrassement en fonction des masses de dépôt sec obtenues dans le canal 2 de l'échangeur pour les profils de température A, B et C.

Les Figure 42 a et b montrent une relation linéaire entre la masse de dépôt sec dans le deuxième canal et l'épaisseur de dépôt calculée à partir des mesures obtenues avec le capteur d'encrassement pour les profils de température A à C. Il existe un déterminisme certain entre les

mesures d'épaisseur fournies par le capteur d'encrassement et la masse de dépôt dans l'échangeur de chaleur à plaques du 2^{ème} canal et cela reste vrai pour différents traitements thermiques.

3.4 CONCLUSION

Ce dispositif de mesure est un capteur prototype prometteur pour mesurer le taux d'encrassement dans un échangeur à plaques car il est économique et facile à implémenter. De plus son implantation non intrusive permet d'éviter les inconvénients liés à la nettoyabilité des équipements.

La détection est un aspect important dans le domaine de l'encrassement des échangeurs de chaleur. Le caractère intrusif d'un capteur est un inconvénient majeur pour son utilisation dans les industries alimentaires. Les principaux avantages du capteur présenté sont les suivants :

- Le dispositif est économique. Il se compose de composants courants comme une résistance de cuivre plate, un capteur de température et une alimentation stabilisée. De plus une seule source de courant peut être utilisée pour alimenter plusieurs dispositifs.
- Le montage est aisé. Le capteur de température est collé à l'extérieur de la zone de mesure et la résistance collée par-dessus. On superpose ensuite un isolant thermique. Il n'est pas obligatoire de coller les éléments constituant le capteur sur la zone de mesure mais il faut s'assurer que l'ensemble est maintenu en contact.
- Le capteur n'est pas intrusif. Aucun élément du capteur d'encrassement n'est en contact avec le produit.

Le calcul de la résistance thermique d'encrassement utilise la température au cœur du produit en circulation dans l'installation. Cette mesure est déjà présente sur les installations puisqu'elle est indispensable pour réguler la température du produit. Cette mesure s'obtient habituellement de manière intrusive à l'aide d'un doigt de gant plongé au cœur du liquide. Cette méthode demande un étalonnage précis des capteurs de température. La mesure est d'autant plus précise que la précision et la résolution des sondes de température est grande.

Plusieurs améliorations du capteur sont possibles. La précision de la température mesurée par le thermocouple peut être meilleure si on utilise plusieurs thermocouples. En installant plusieurs capteurs d'encrassement sur la ligne de production, il serait possible, par exemple, de suivre l'évolution de la couche de dépôt le long d'un tube en zone de chambrage. Une autre amélioration possible serait d'utiliser le capteur au plus près de la sortie de l'échangeur.

Une preuve de concept a été donnée ici que le capteur d'encrassement décrit est capable de mesurer en temps réel le facteur d'encrassement d'un échangeur de chaleur par une solution de protéines laitières du lactosérum. D'autres validations doivent être menées pour montrer que le capteur est capable de rendre compte que le facteur d'encrassement diminue suite aux cycles de nettoyage mais qui dépasse le cadre du travail de thèse. Ce capteur pourrait par la suite être utilisé pour le suivi du nettoyage des installations et permettre d'identifier plus précisément la fin de l'étape de nettoyage (instant où la résistance d'encrassement est revenue égale à sa valeur à l'état propre).

