

---

# Surveillance en ligne d'une machine tournante par thermographie infrarouge

## On-line monitoring of a rotating machine by using infrared thermography

**Vincent Leemans, Marie-France Destain**

*Passage des Déportés, 2  
B-5030 Gembloux  
ULG, Gembloux Agro-Bio Tech  
Unité de Mécanique et Construction  
leemans.v@fsagx.ac.be  
destain.mf@fsagx.ac.be*

---

*RÉSUMÉ. Des mesures par thermographie d'une machine tournante critique (ventilateur) sont réalisées en ligne pour évaluer la température d'organes, comme le moteur et les paliers. En conditions de fonctionnement normal, les températures montrent des variations importantes, caractérisées par un écart-type de l'ordre de 5 °C. Elles sont liées aux variations de conditions climatiques et à l'apport de chaleur variable en fonction du processus de fabrication. Un modèle auto-récurrent avec grandeurs d'entrée (ARX) a permis d'éliminer ces variations. Le bruit sur la température corrigée est réduit à un degré Celsius, ce qui permet de mettre en évidence très tôt une dégradation au niveau des paliers principaux. Par contre, dans le cas présent, le moteur subit un encrassement et donc une augmentation de température en cours de fonctionnement qui masque l'existence d'une éventuelle détérioration.*

*MOTS-CLÉS : thermographie infrarouge, surveillance en ligne, modèle ARX.*

---

## 1. Introduction

Les caméras thermographiques utilisées en maintenance sont généralement mobiles et sont destinées à observer à intervalles réguliers des éléments critiques d'une installation pour la recherche de défauts qui se présentent par exemple au niveau de raccords électriques, d'isolants thermiques, ...

Peu d'informations sont disponibles quant au suivi de machines « en ligne ». Selon Mazioud *et al.* (2006), il existe une relation entre le niveau vibratoire d'un roulement et sa température externe mesurée par thermographie infrarouge lors de l'apparition d'un écaillage. Menant une expérience sur banc d'essai à vitesse de rotation constante, les auteurs observent une élévation de température de 15 °C pour une vitesse efficace de vibration de 0,5 mm/s (fonctionnement normal) et de 24 °C pour une vitesse de 1,8 mm/s (début de la dégradation). L'augmentation de température due à la dégradation est donc relativement importante, à savoir 9 degrés Celsius, mais reste inférieure aux variations observées lors du fonctionnement normal du roulement.

En milieu industriel, la température des machines est susceptible de fluctuer en conditions normales de charges et de vitesses de rotation. Les variations de températures dues aux influences environnementales peuvent s'avérer supérieures à l'écart entre le fonctionnement normal et le début de la dégradation. Ceci explique vraisemblablement le manque d'efficacité de la thermographie mobile pour la surveillance des machines tournantes.

La diminution du prix des caméras thermographiques permet d'envisager une surveillance en continu des machines critiques. Le but de la recherche est de mettre au point les méthodes de traitement des signaux permettant de suivre en ligne la température d'éléments critiques dans une chaîne de production à l'aide d'une caméra thermographique, afin d'estimer la dérive en température des organes en fonction de leur vieillissement, indépendamment des influences environnementales.

## 2. Matériel et méthode

L'élément choisi est un ventilateur, entraîné par un moteur asynchrone de 500 kW et supporté par deux paliers externes (Fig. 1). La production a lieu en continu, à l'exception d'un arrêt de 12 heures toutes les six semaines. Pendant cet entretien, les pales du ventilateur sont nettoyées. Le roulement du moteur côté entraînement et les deux paliers sont équipés d'accéléromètres triaxiaux et d'une sonde thermique pour fournir des données de référence. L'amplitude et la fréquence du courant d'alimentation du moteur sont également enregistrées car ces paramètres varient avec la densité et l'épaisseur du produit en cours de fabrication.

La caméra thermographique est placée en hauteur, à une distance de 10 m des machines (Fig. 1). La transparence de la vitre de protection est de 0,92 d'après les

données du constructeur et l'émissivité de la peinture des différents organes est estimée à 0,92.



**Figure 1.** *Vue de la machine observée par thermographie infrarouge. A l'avant plan à droite, le moteur; à gauche du moteur, les deux paliers (l'un bleu, l'autre noir); à l'extrême gauche, le carter du ventilateur; en haut à droite, le boîtier de protection contenant la caméra.*

Les thermogrammes sont acquis à une fréquence de 5 Hz. Ils sont filtrés par un filtre récursif linéaire du premier ordre :

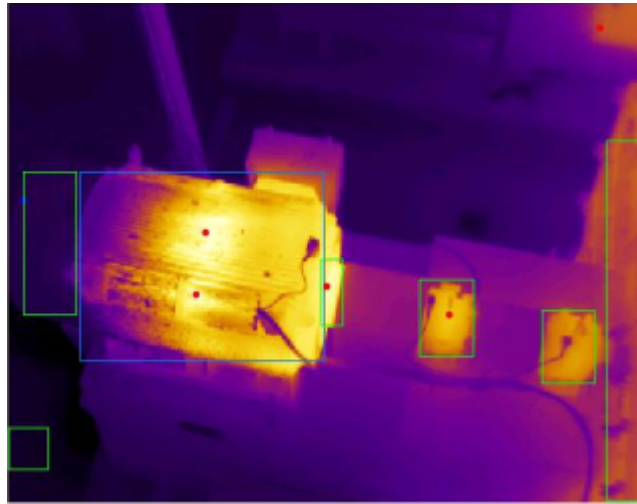
$$F_{(i,j,k)} = F_{(i,j,k-1)} * \alpha + T_{(i,j,k)} * (1 - \alpha) \quad [1]$$

avec  $F$  le thermogramme filtré,  $T$  le thermogramme mesuré,  $i$  et  $j$  les coordonnées des pixels et  $k$  le pas de temps.  $\alpha$  est un paramètre fixé arbitrairement à 0,975. Les bruits de mesures sont ainsi considérablement atténués.

Sept régions d'intérêt (ROI) ont été définies sur les thermogrammes (Fig. 2). Elles correspondent au capot du ventilateur du moteur, au corps du moteur, à la région du moteur entourant le roulement coté entraînement, à chacun des deux paliers supportant le ventilateur, au carter du ventilateur principal et à une région du

Vincent Leemans, Marie-France Destain

sol. Pour chaque région, les températures moyennes et maximales sont enregistrées. Les thermogrammes et les résultats sont enregistrés tous les quarts d'heure.



**Figure 2.** Thermogramme montrant les régions d'intérêts autour des différents éléments ; de gauche à droite, le capot du ventilateur du moteur, le corps du moteur, le roulement moteur côté entraînement, les deux paliers principaux, le carter du ventilateur; en dessous à gauche, une partie du sol.

La température d'un élément de machine peut changer en raison des variations de la température ambiante (journalière et saisonnière), en raison des apports de chaleur variables liés aux conditions de production. Le cas échéant, elle peut dériver en raison de la dégradation d'une partie de l'élément. Pour pouvoir détecter cette dérive au plus tôt, un modèle a été mis au point afin d'obtenir une température corrigée, épurée des sources de variation connues.

L'évaluation se déroule en deux temps. Tout d'abord, le modèle est ajusté pour simuler la température réelle des organes. Une fois le modèle validé, des grandeurs d'entrée fixes sont introduites pour estimer la température corrigée  $T_c$ . L'ajustement et l'estimation ont lieu à chaque mesure.

Le principe du modèle est le suivant. En supposant que la température des organes situés dans les ROI est homogène, qu'ils reçoivent un apport de chaleur  $Q_i$  et perdent une quantité de chaleur  $Q_o$ , la dérivée temporelle de la température est proportionnelle à la différence entre l'apport et la perte de chaleur :

$$\frac{dT_{org}}{dt} = c_1(Q_i - Q_o) \quad [2]$$

avec  $T_{org}$ , la température de l'organe,  $t$  le temps,  $c_1$  une constante,  $Q_i$  l'apport de chaleur et  $Q_o$  les pertes de chaleur. L'apport de chaleur est fonction de la vitesse de rotation  $\omega$  et du couple absorbé par le ventilateur. Ces éléments ne sont pas mesurés directement. Le couple est proportionnel à l'intensité  $I$  du courant. Pour les roulements et paliers, la puissance dissipée est considérée comme proportionnelle à la puissance transmise et donc  $Q_i$  est proportionnel à  $\omega * I$ . Au niveau du moteur, les pertes par effet Joule et celles liées aux courants de Foucault sont proportionnelles à  $I^2$ .

La quantité de chaleur perdue par l'organe est donnée par :

$$Q_o = c_2(T_{org} - T_{amb}) \quad [3]$$

avec  $c_2$  une constante et  $T_{amb}$  la température ambiante.

Le modèle numérique choisi pour évaluer la température est à pas de temps discret, linéaire et ajusté par la méthode des moindres carrés de façon récurrente, c'est-à-dire que les nouveaux éléments sont pris en compte au moment de la mesure, ce qui permet d'ajuster le modèle en temps réel. Le modèle est de type auto-récurrent avec grandeurs d'entrée (*Auto Recursive with exogeneous input*, ARX) :

$$y_m(k) = -A y_m(k-1) + B x(k-1) + \varepsilon(k) \quad [4]$$

avec  $y_m$  la valeur modélisée c'est-à-dire  $T_{org}$  (ou  $T_c$ ),  $A$  et  $B$  les paramètres à ajuster,  $x$  les grandeurs d'entrée et  $\varepsilon$  le bruit. Le vecteur des variables indépendantes  $x$  vaut :

$$x = [1; T_{amb}; \omega * I] \quad [5]$$

pour les paliers et

$$x = [1; T_{amb}; \omega * I; I^2] \quad [6]$$

pour le moteur, ce qui permet de tenir compte d'une éventuelle ordonnée à l'origine, de la température ambiante et des sources de chaleur. Une des valeurs moyennes calculées sur les régions d'intérêt de référence, à savoir le capot moteur et le sol, est utilisée comme température ambiante.

Vincent Leemans, Marie-France Destain

La méthode d'ajustement prend en compte un facteur d'oubli  $\rho$  qui permet aux paramètres A et B d'évoluer dans le temps et c'est cette évolution qui est le signe d'un changement de température. Mais d'une part, il y a plusieurs paramètres à suivre (1 pour A, 3 ou 4 pour B) et d'autre part l'augmentation de l'un peut être compensée par la diminution d'un autre. Pour mettre en évidence une dérive, après ajustement sur les données mesurées, une nouvelle simulation est effectuée en introduisant des données standard, fixes pour être indépendant des sources de variation connues :  $T_{amb} = 295$  K;  $I = 500$  A;  $w = 1000$  tpm. La valeur du facteur d'oubli  $\rho$  est un paramètre supplémentaire à ajuster empiriquement, valant classiquement entre 0,95 et 0,995 (dans le premier cas, on oublie vite et on suit de près les variations, dans le deuxième cas, on oublie peu). La valeur a été ajustée à 0,99 en minimisant l'erreur du modèle.

### 3. Résultats et interprétation

Les calculs ont été réalisés en kelvins, mais les degrés Celsius plus usuels sont utilisés pour la présentation des résultats. Le Tableau 1 quantifie les températures maximales et les résultats des modèles, pour quatre régions d'intérêt (ROI) : le corps du moteur, le roulement du moteur, le palier principal coté accouplement et le palier principal coté ventilateur. La première et la dernière de ces ROIs, montrant des comportements extrêmes, seront analysées en détail et référencées ci-après respectivement comme « moteur » et « palier » (sauf mention contraire). La température ambiante est mesurée au niveau de la ROI capot-moteur (température moyenne de la ROI). Différentes régions du thermogramme ont été analysées et celle qui a été retenue montre à la fois très peu d'inertie thermique et une grande indépendance vis-à-vis de la température du moteur. La figure 3 montre l'évolution des différentes températures pour le moteur, le palier ainsi que pour la température ambiante.

L'écart-type des températures mesurées varie de 6,6°C à 3,3°C respectivement pour le moteur et pour le palier; les plages de variation correspondantes sont de 40°C et de 20°C (soit six fois l'écart-type).

Il est remarquable de constater que l'écart-type des températures mesurées et plus encore l'écart-type de la température corrigée sont maximaux pour le moteur et qu'ils diminuent lorsque l'on considère un organe plus éloigné du moteur. Il s'agit vraisemblablement d'un transfert de chaleur du moteur vers les autres organes.

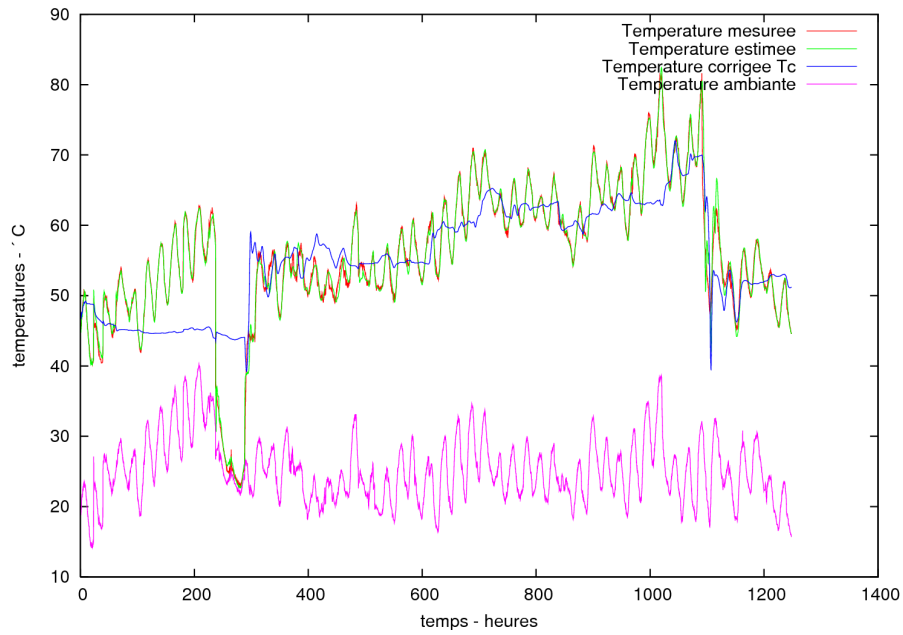
L'écart-type (et la plage de variation) de la température ambiante est intermédiaire entre celle du moteur et celle du palier. Si l'inertie thermique peut expliquer un écart-type plus faible pour le palier, la variation plus importante pour le moteur est *a priori* surprenante. Elle sera expliquée ci-après.

L'erreur résiduelle du modèle, exprimée sous forme d'écart-type de l'erreur, est de l'ordre d'un degré Celsius, ce qui montre que la température modélisée est fiable.

*Tableau 1 : Statistique descriptive de la températures mesurée des organes, de l'erreur résiduelle du modèle (dont les valeurs les moyennes sont très proches de zéro) et de la température corrigée.*

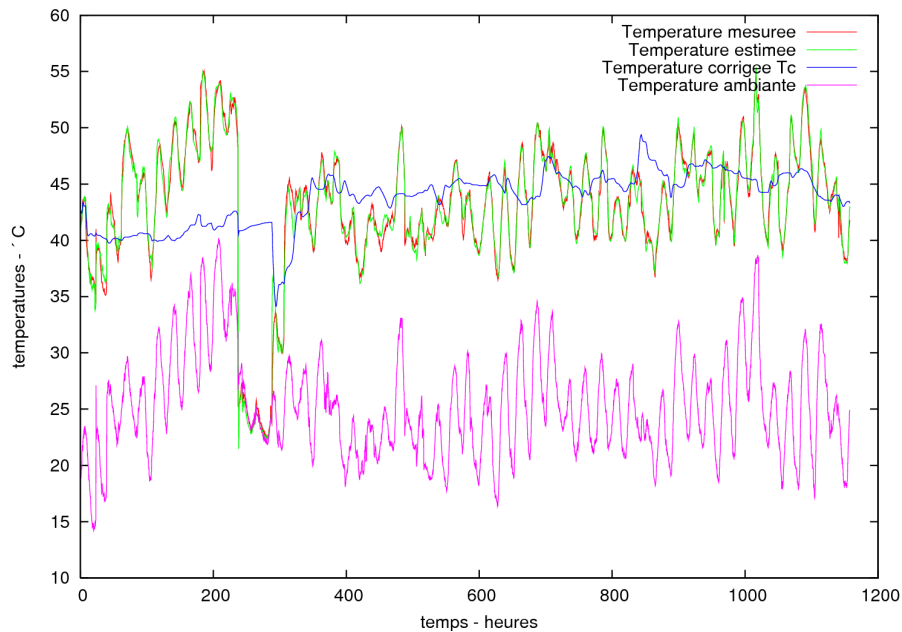
Organe	Températures mesurées				Erreur résid. Écart-type	Température corrigée	
	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.		Ecart-type	Max.
Température ambiante	25,6	4,6	13,2	40,2			
Moteur	57,5	6,6	45,2	84,6	1,3	4,7	72,0
Roulement moteur	53,6	5,2	42,6	77,5	0,8	3,1	60,5
Palier accouplém.	48,7	4,0	37,5	62,8	0,7	1,6	54,4
Palier ventilateur	45,2	3,3	36,5	57,0	0,9	0,6	49,4

Les Figures 3 et 4 concernent respectivement le moteur et le palier. Les courbes rouges sont les mesures de température au niveau des organes. Les courbes vertes sont les résultats du modèle obtenus en tenant compte des données réelles alors que les courbes bleues concernent les températures corrigées (modèle avec entrées fixes). Les courbes magenta montrent l'évolution de la température ambiante. La diminution de température vers l'heure 220 est liée à l'arrêt de la production pour assurer l'entretien des machines.



**Figure 3.** *Température du moteur ; évolution de la température mesurée (en rouge), de la température modélisée (en vert) et du résultat du modèle pour une température d'entrée constante de 295 K (en bleu).*





**Figure 4.** Température du palier principal, côté ventilateur ; évolution de la température mesurée (en rouge), de la température modélisée (en vert) et du résultat du modèle pour une température d'entrée constante de (295 K (en bleu)).

Sans surprise, la température du moteur est supérieure à celle du palier, mais les variations de température des deux organes sont fort différentes.

Au niveau de la température corrigée, les alternances jour-nuit ne sont plus visibles. Pour la période précédant l'arrêt dû à la maintenance (entre les heures 0 et 220), la température corrigée est stable. L'augmentation de température des organes dans cet intervalle de temps est entièrement expliquée par l'augmentation de la température ambiante. Ensuite, la diminution de température liée à l'arrêt de production n'a qu'un effet limité sur la température corrigée (c'est surtout au moment du redémarrage qu'un effet est observable). Dans les deux cas, une augmentation de température a été observée juste après le redémarrage. Par après, la température du moteur augmente jusqu'à l'heure 1100 alors que la température ambiante est relativement stable. La température corrigée montre une dérive qui est liée à une diminution de la ventilation du moteur, à cause de l'encrassement de la grille du ventilateur du moteur et des ailettes de refroidissement. La brusque chute des températures mesurée et corrigée correspond à un nettoyage du moteur. Les variations liées à l'encrassement provoquent une augmentation des écarts-types des

Vincent Leemans, Marie-France Destain

températures mesurée et corrigée et expliquent pourquoi l'écart-type du moteur est plus élevé que celui du palier et que celui de la température ambiante.

Si on se réfère à l'étude de Mazioud *et al.* (2006), une augmentation de 9°C est le symptôme du début de la dégradation. Dans ces conditions, étant donné la variabilité des données brutes, la détection de la dégradation est impossible à un stade précoce sans apporter de correction aux mesures.

Par contre, si la température corrigée est utilisée, on peut estimer que, lors du vieillissement des paliers principaux, il devrait donc être possible de mettre en évidence des variations de température de l'ordre de 2 à 5 degrés ( $\sigma = 1,6$  et  $0,6$ ). La dérive de  $T_c$  peut être observée avant le début de la dégradation. Pour le roulement moteur, cette dérive de  $T_c$  peut être mise en évidence au début de la dégradation ( $\sigma = 3,1$ ). Par contre, pour le corps du moteur, du fait des variations de température liées à l'encrassement, une telle dérive est de l'ordre de deux fois l'écart-type et est plus difficile à mettre en évidence. Il faudrait dès lors soit rechercher un indicateur complémentaire lié à l'encrassement, soit tenir compte des mesures après chaque nettoyage du moteur.

#### **4. Conclusion**

Lors de la mesure de la température des différents organes d'une machine tournante par thermographie infrarouge, la température mesurée est influencée par la température ambiante et par les conditions de production. Telle quelle, elle comporte trop de variation pour permettre une détection précoce d'une dégradation.

Un modèle de type ARX a été utilisé pour simuler en temps réel le comportement des organes. L'introduction dans ce modèle de grandeurs d'entrée fixes permet d'éliminer les sources de variations précitées. La précision du modèle est d'un degré.

Pour les paliers principaux de la machine, la température corrigée présente un écart-type également proche d'un degré, ce qui montre que les différentes sources de variations ont été prises en compte par le modèle. Cette précision est telle qu'une hausse de température témoignant d'une dégradation des roulements devrait pouvoir être diagnostiquée rapidement. Pour le moteur, les conditions spécifiques d'utilisation masquent une dérive liée à une dégradation potentielle.

#### **Remerciements**

Ce projet est financé par la Région Wallonne, pôle MECATECH, projet 5952, « FIAMA ».

## **12. Bibliographie**

- A. Mazioud, J.-F. Durastanti, L. Ibos, E. Surugue, 2006. Detection of rolling bearing degradation using infrared thermography. In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2006)*, Padoue (Italie).