

Identification de modèles paramétriques tridimensionnels d'un four de brasage et de sa charge

Adrien BARTHÉLÉMY^{1,2*}, Benjamin RÉMY¹, Vincent SCHICK¹, Célien ZACHARIE²

¹ Laboratoire Énergies et Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), UMR 7563 – Université de Lorraine – CNRS, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy

² Fives Cryo, 25 bis rue du Fort, 88190 Golbey

* (auteur correspondant : adrien.barthelemy@univ-lorraine.fr)

Résumé - À l'aide de modèles paramétriques autorégressifs ARX d'ordre faible, des fonctions de transfert reliant des puissances et des températures à d'autres températures sont identifiées sur le système tridimensionnel complexe qu'est un four de brasage sous vide et sa charge. L'intérêt industriel est l'usage de capteurs virtuels pour parer le dysfonctionnement métrologique de thermocouples. L'ordre optimal des modèles est choisi via le critère d'Akaike, leurs entrées via des considérations physiques. Sur des données numériques puis réelles, les modèles ARX s'avèrent très performants.

Nomenclature

a	Paramètre autorégressif	n_a	Ordre autorégressif de modèle ARX
AIC	Critère d'Information d'Akaike	n_b	Ordre exogène de modèle ARX
ARX	AutoRegressive with eXogenous inputs	n_r	Retard de modèle ARX
b	Paramètre exogène	P	Puissance, W
c	Coefficient d'influence locale	$SAIC$	Somme des AIC (calibration, validation)
F	Facteur de forme gris	TC	Thermocouple
fit	Ajustement paramétrique, %	T_{coeur}	Mesure du thermocouple de cœur, K
k	Indice de discrétisation temporelle	T_{surf}	Mesure d'un thermocouple de surface, K
m	Nombre de mesures	u	Entrée de modèle ARX
MISO	Multiple Input Single Output	y	Sortie de modèle ARX
n	Ordre global de modèle ARX	y_{mes}	Grandeur mesurée
N	Nombre de panneaux influents	y_{mo}	Grandeur calculée par le modèle

1. Introduction

Le suivi des paramètres thermiques est un outil indispensable dans le milieu industriel afin de contrôler au mieux des processus de transformation et de fabrication à haute température. Cependant, un capteur de température est parfois sujet à des dysfonctionnements, ce qui compromet la conformité du produit final. Dans cette étude, le processus considéré est l'opération de brasage dans un four sous vide du corps d'un échangeur de chaleur en aluminium à plaques et ondes brasées, processus dont le bon déroulé repose justement sur des thermocouples.

Face à la problématique récurrente et inévitable du dysfonctionnement métrologique, l'emploi d'un capteur virtuel est envisageable. Un capteur virtuel est un modèle mathématique simulant en temps réel la mesure d'un capteur réel. Ce modèle mathématique représente la fonction de transfert reliant les grandeurs d'entrée à la température d'intérêt. En pratique, cela signifie qu'il est possible de remplacer la mesure réelle d'un capteur défaillant par une mesure artificielle « correcte » délivrée par le capteur virtuel.

Les capteurs virtuels de cette étude sont des modèles paramétriques autorégressifs de type ARX. En raison de leurs avantages pratiques, les modèles ARX sont privilégiés pour certaines applications, comme la certification de moteurs d'avion chez [1], la chauffe de pièces en céramique dans un four à induction chez [2] ou le flaconnage dans un moule verrier chez [3].

2. Description du problème

L'étude a pour contexte la fabrication industrielle d'échangeurs de chaleur en aluminium à plaques et ondes brasées, et plus précisément l'opération de brasage durant la fabrication.

2.1. Système d'étude

Le système est un four de brasage ayant pour charge une matrice instrumentée à braser.

Une **matrice** est l'empilement des passages d'un futur échangeur. Tel que décrit dans [4], chaque passage se compose d'ondes et de barres de fermeture (figure 1) et est séparé de ses voisins par des plaques (tôles recouvertes de brasure). Ondes, barres et plaques sont en aluminium.

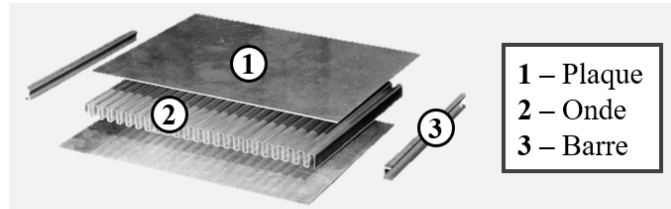


Figure 1 : Plaques, ondes et barres

La **charge** complète correspond à la matrice comprimée par un système de U-tirants et équipée de dizaines de thermocouples en surface, plus un au cœur (figure 2 à droite).

Le **four de brasage** sous vide est une enceinte cylindrique dont la paroi interne est recouverte de 88 panneaux radiants (résistances en molybdène apposées sur des écrans d'acier) formant un parallélépipède qui épouse la forme de la charge (figure 2 à gauche).

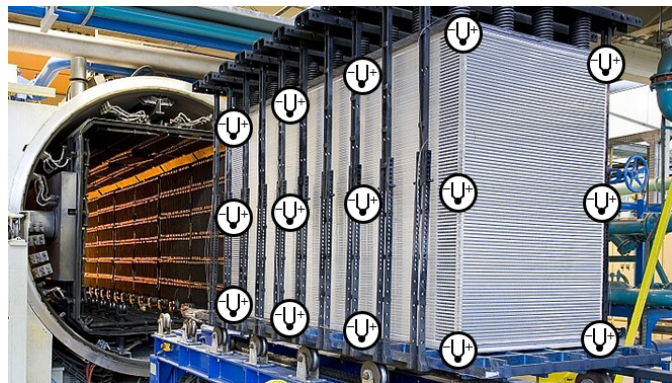


Figure 2 : Charge devant le four (Fives Cryo), avec les thermocouples de surface repérés par les U

2.2. Opération de brasage

L'opération de brasage permet de transformer la matrice en un bloc solidaire, où plaques, ondes et barres sont assemblées définitivement les unes aux autres. Trois étapes se succèdent :

- 1- Chauffe homogène de la charge jusqu'à la température critique de brasage
 - 2- Fusion de la brasure des plaques à la température critique de brasage
 - 3- Refroidissement de la charge et resolidification de la brasure (liant plaques, ondes et barres)
- Dans cette étude, seule la première étape de chauffe est considérée (avant fusion de la brasure, donc pas de changement d'état). Le four étant sous vide, la chauffe s'effectue par rayonnement des panneaux radiants vers la charge, puis par conduction à l'intérieur de la charge.

L'homogénéité thermique de la matrice est cruciale. En effet, l'apparition de gradients thermiques peut engendrer des contraintes thermomécaniques susceptibles de fragiliser ou de casser la matrice. En sortie du four, la matrice brasée est alors rebutée car échouant aux contrôles de qualité. Pour assurer l'homogénéité en temps réel, une centrale de régulation exploite la mesure des thermocouples pour élaborer la consigne de puissance de chaque panneau.

2.3. Problématique industrielle

L'homogénéité thermique durant l'opération de brasage dépend fortement des mesures de l'ensemble des thermocouples en surface de la matrice. Ainsi, si un thermocouple dysfonc-

tionne, la régulation est trompée par une mesure erronée et l'homogénéité est compromise. Comme cela a été évoqué en introduction, l'emploi d'un capteur virtuel constitue une parade à la défaillance d'un thermocouple. Toutefois, les contraintes industrielles amènent à choisir judicieusement le modèle sous-jacent du capteur virtuel :

- Propriétés thermophysiques mal connues (système d'étude complexe et anisotrope)
- Propriétés thermophysiques et géométriques changeantes d'une matrice à l'autre
- Usage en temps réel nécessitant un modèle d'ordre réduit

Les deux premières contraintes écartent le modèle enthalpique et la dernière contrainte le modèle convolutif simple issu du théorème de Duhamel. Le choix s'est donc porté sur le modèle ARX, un modèle de comportement moins gourmand en paramètres qu'un modèle convolutif simple.

3. Théorie des modèles ARX

3.1. Description d'un modèle ARX

Un modèle ARX discret mono-sortie multi-entrée (MISO) permet le calcul à l'instant k d'une grandeur de sortie y à partir de grandeurs d'entrée u . En prenant l'exemple de deux entrées, sa structure est la suivante d'après [5] :

$$y[k] = - \sum_{\substack{i=1 \\ i < k}}^{n_a} a_i y[k-i] + \sum_{\substack{i=1 \\ i \leq k}}^{n_{b,1}} b_{1,i} u_1[k-i-n_{r,1}+1] + \sum_{\substack{i=1 \\ i \leq k}}^{n_{b,2}} b_{2,i} u_2[k-i-n_{r,2}+1] \quad (1)$$

Avec $n_a \in \mathbb{N}^*$ l'ordre autorégressif, $(n_{b,1}, n_{b,2}) \in \mathbb{N}^{*2}$ les ordres exogènes et $(n_{r,1}, n_{r,2}) \in \mathbb{N}^2$ les retards entrée-sortie. Il s'agit d'un modèle paramétrique polynomial.

Le modèle ARX est donc décrit par n_a paramètres autorégressifs a et, pour chaque entrée u_j , $n_{b,j}$ paramètres exogènes b_j . Les paramètres b_j permettent à l'ARX d'exploiter la valeur de u_j aux instants précédents, comme pour un modèle convolutif : ils modélisent ainsi la fonction de transfert reliant l'entrée à la sortie, comme illustré dans [2]. Les paramètres a permettent à l'ARX d'exploiter en plus la valeur de y elle-même aux instants précédents : cette astuce réduit grandement les ordres exogènes (donc l'ordre du modèle) en récupérant l'information nécessaire chez y directement.

3.2. Identification d'un modèle ARX

Identifier un modèle ARX revient à estimer ses paramètres autorégressifs et exogènes.

La première étape s'appelle la *calibration*. Elle consiste en l'estimation des paramètres a et b , connaissant déjà toutes les valeurs temporelles de la sortie et des entrées issues d'un jeu de données de référence. Le modèle ARX étant linéaire à chaque instant k vis-à-vis de ses paramètres, une inversion en une itération par les moindres carrés ordinaires (cf. [6]) est possible.

La seconde étape s'appelle la *validation*. Elle consiste en la vérification de la capacité prédictive d'un modèle ARX en utilisant un autre jeu de données. Si la sortie y_{mo} du modèle s'écarte trop de la mesure y_{mes} de ce jeu de données, l'identification est considérée comme un échec.

3.3. Qualité d'un modèle ARX

Pour un jeu de données, l'*ajustement paramétrique* (ou *fit*) permet d'évaluer la précision du modèle ARX, à savoir l'adéquation entre sa sortie y_{mo} et la mesure y_{mes} (précision maximale – et parfaite – pour un ajustement de 100 %) :

$$fit = 100 \times \left(1 - \frac{\|y_{mes} - y_{mo}\|}{\|y_{mes} - \bar{y}_{mes}\|} \right) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \|\cdot\| & \text{la norme euclidienne} \\ \cdot & \text{la moyenne} \end{cases} \quad (2)$$

Par ailleurs, l'ordre global permet d'évaluer la parcimonie du modèle ARX, à savoir le nombre de paramètres qu'il requiert (parcimonie maximale pour un ordre global minimal) :

$$n = n_a + \sum_j n_{b,j} \quad (3)$$

Un modèle ARX idéal en théorie a une précision parfaite en calibration et en validation ainsi qu'une parcimonie maximale. Toutefois, pour améliorer la précision, il faut en général accroître l'ordre. Le critère d'information d'Akaike (AIC, cf. [7]) est un compromis entre précision (de calibration) et parcimonie, et doit être le plus petit possible (m étant le nombre de mesures) :

$$AIC = 2m \log(100 - fit) + 2n + m [\log(20\pi \|y_{mes} - \overline{y_{mes}}\|^2) - \log(m) - 4] \quad (4)$$

4. Application des modèles ARX

4.1. Choix de la sortie

Dans cette étude, un modèle ARX doit servir de capteur virtuel pour un thermocouple en surface de matrice. Ainsi, $y = T_{surf}$ avec T_{surf} la mesure d'un thermocouple de surface.

Des travaux précédents ont déjà abouti à des modèles ARX 0D « globaux » ($y = T_{surf,moy}$ la mesure moyenne de tous les thermocouples de surface, dans [8]), ainsi qu'à des modèles ARX 1D « locaux » ($y = T_{surf}$ la mesure d'un seul thermocouple de surface mais loin des arêtes de la matrice, dans [9]). L'ambition de cette étude est par conséquent l'obtention de modèles ARX 3D « locaux » ($y = T_{surf}$ la mesure d'un seul thermocouple de surface y compris aux arêtes de la matrice).

4.2. Choix des entrées

La température T_{surf} d'un thermocouple dépend de la puissance de chauffe reçue des panneaux radiants. Selon l'emplacement du thermocouple, seuls quelques panneaux sont véritablement influents sur l'évolution de la température de la zone. Deux difficultés existent :

- Les puissances sont fortement synchrones entre elles, ce qui altère l'identification d'un modèle ARX si chaque puissance constitue une entrée u distincte.
- Un critère d'évaluation de l'influence locale d'un panneau (ou coefficient d'influence locale) doit synthétiser des phénomènes radiatifs et conductifs complexes.

La solution proposée pour la première difficulté est la fusion des N puissances influentes P_i en une moyenne P : l'ARX n'a qu'une seule entrée « puissance ». Au panneau $n^{\circ}i$ est associé le coefficient d'influence locale c_i , ce qui permet de sélectionner les puissances influentes pour le thermocouple considéré ainsi que de les pondérer dans la moyenne P (éq. 5). La nature des c_i (puissances moyennes \overline{P}_i , facteurs de forme gris {panneau $n^{\circ}i \rightarrow$ thermocouple} $F_{i \rightarrow TC}$, valeurs unitaires, ...) est le principal verrou de cette étude.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N c_i P_i}{\sum_{i=1}^N c_i} \quad (5)$$

La condition limite « puissance de chauffe » ne suffit pas pour obtenir la température d'un thermocouple : la température T_{coeur} du thermocouple au cœur de la matrice s'avère essentielle d'après [8]. Cette grandeur s'ajoute donc à P comme entrée d'ARX.

Finalement, pour chaque thermocouple de surface, la structure du modèle ARX servant de capteur virtuel est celle de l'équation 1 avec $y = T_{surf}$, $u_1 = T_{coeur}$ et $u_2 = P$. Cette structure est notée $[T_{coeur} + P] \rightarrow T_{surf}$. Elle a déjà été utilisée dans [8] et [9].

4.3. Choix des ordres

Une fois la sortie et les entrées choisies, donnant la structure $[T_{\text{coeur}} + P] \rightarrow T_{\text{surf}}$, il reste à fixer les ordres $(n_a, n_{b,1}, n_{b,2})$. Dans un souci de parcimonie, ces ordres doivent être petits. Cependant, des ordres suffisamment élevés sont souvent nécessaires pour obtenir une précision correcte. En calibration, un compromis déjà évoqué est le critère d'Akaike (éq. 4).

Toutefois, industriellement, la validation d'un ARX (c'est-à-dire son utilisation) apparaît aussi importante que sa calibration. Pour prendre en compte la précision en validation, le choix des ordres s'effectue donc par la minimisation du critère suivant :

$$SAIC = AIC_{\text{calibration}} + AIC_{\text{validation}} \quad (6)$$

Ce critère, utilisé également dans [9], est exploité en pratique de la sorte :

- Arbitrairement, $n_a \leq 10$, $n_{b,1} \leq 10$, $n_{b,2} \leq 10$ et $n_{r,1} = n_{r,2} = 0$.
- Les 1000 modèles ARX – car 1000 combinaisons $(n_a, n_{b,1}, n_{b,2})$ possibles – sont identifiés.
- La combinaison $(n_a, n_{b,1}, n_{b,2})$ retenue est celle de l'ARX avec la SAIC minimale.

5. Résultats

Dans cette partie, des modèles ARX sont identifiés sur des données numériques puis sur des données réelles. Pour simplifier, la puissance P de l'équation 5 ne contient qu'une puissance P_i ($N = 1$) sélectionnée empiriquement (\bar{P}_i et $F_{i \rightarrow TC}$ conjointement assez élevés).

5.1. Données numériques

L'industriel possède Simfurnace, un modèle numérique détaillé du système d'étude simulant des opérations de brasage (cf. [10]). La modélisation passe par une méthode nodale : le système est découpé en volumes isothermes reliés aux autres par des conductances thermiques.

Par Simfurnace, une matrice de gabarit moyen, notée \mathcal{M} , est modélisée dans le four. Deux simulations SIM1 et SIM2 sont réalisées, qui diffèrent par les consignes de brasage : deux jeux de données sur le même système sont donc disponibles, pour la calibration et la validation.

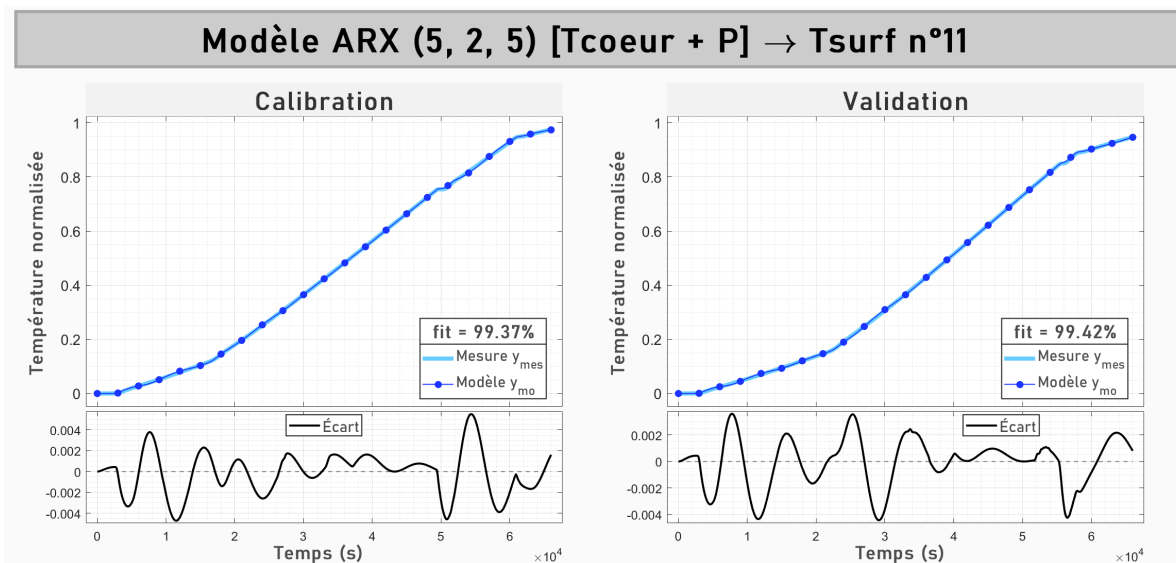


Figure 3 : Identification du modèle ARX $[T_{\text{coeur}} + P] \rightarrow T_{\text{surf},11}$ d'ordres $(5, 2, 5)$ (calibration sur les données numériques SIM1, validation sur les données numériques SIM2)

La figure 3 illustre l'identification du meilleur modèle ARX $[T_{\text{coeur}} + P] \rightarrow T_{\text{surf},11}$ pouvant servir de capteur virtuel au thermocouple n°11 de la matrice \mathcal{M} , « meilleur » dans le sens où ses ordres $(n_a, n_{b,1}, n_{b,2}) = (5, 2, 5)$ correspondent à la SAIC minimale. A gauche, la calibration réalisée avec le jeu de données SIM1 donne un ajustement de 99.37 % (graphe du haut où la courbe en • de y_{mo} coïncide avec la courbe continue de y_{mes}) et un écart $y_{mes} - y_{mo}$ inférieur à 0.005 (graphe du bas, la température étant normalisée). A droite, la validation réalisée avec le jeu de données SIM2 donne un ajustement de 99.42 % et un écart inférieur à 0.005. Avec des ajustements au-delà de 99 %, ce modèle ARX a réussi son identification.

Le thermocouple n°11 est présenté dans cette étude car il s'agit d'un thermocouple situé loin des arêtes de la matrice, donc impacté très majoritairement par un seul panneau : c'est le cas le plus simple à traiter. Au contraire, le thermocouple n°2 est situé à un coin supérieur de la matrice, sous l'influence de plusieurs panneaux. L'identification réussie du modèle ARX $[T_{\text{coeur}} + P] \rightarrow T_{\text{surf},2}$ d'ordres $(1, 3, 5)$ est illustrée sur la figure 4.

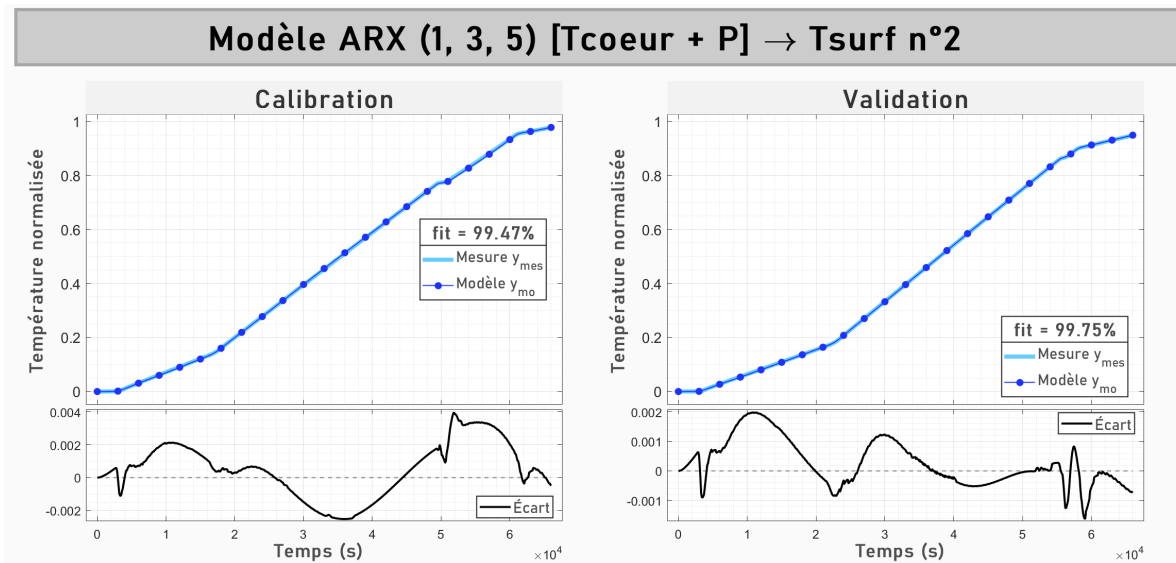


Figure 4 : Identification du modèle ARX $[T_{\text{coeur}} + P] \rightarrow T_{\text{surf},2}$ d'ordres $(1, 3, 5)$ (calibration sur les données numériques SIM1, validation sur les données numériques SIM2)

En guise de complément à la figure 4, le tableau 1 liste les 9 paramètres du modèle. L'interprétation physique de ces paramètres se heurte à la complexité du système d'étude. Cependant, ces quelques paramètres suffisent pour décrire l'essentiel de la fonction de transfert reliant T_{coeur} et P à T_{surf} (fonction hybride entre une transmittance et une impédance).

	Paramètres autorégressifs a_i	Paramètres exogènes $b_{1,i}$	Paramètres exogènes $b_{2,i}$
$i = 1$	-9.96×10^{-1}	3.15×10^1	7.54×10^{-5}
$i = 2$		-6.25×10^1	1.86×10^{-4}
$i = 3$		3.10×10^1	-2.33×10^{-5}
$i = 4$			1.50×10^{-4}
$i = 5$			-3.04×10^{-4}

Tableau 1 : Paramètres du modèle ARX $[T_{\text{coeur}} + P] \rightarrow T_{\text{surf},2}$ d'ordres $(1, 3, 5)$ (calibration sur les données numériques SIM1, validation sur les données numériques SIM2)

5.2. Données réelles

En plus de données numériques, l'industriel a les données réelles des opérations de brasage de deux exemplaires de la matrice \mathcal{M} , donnant deux jeux de données réelles REA1 et REA2.

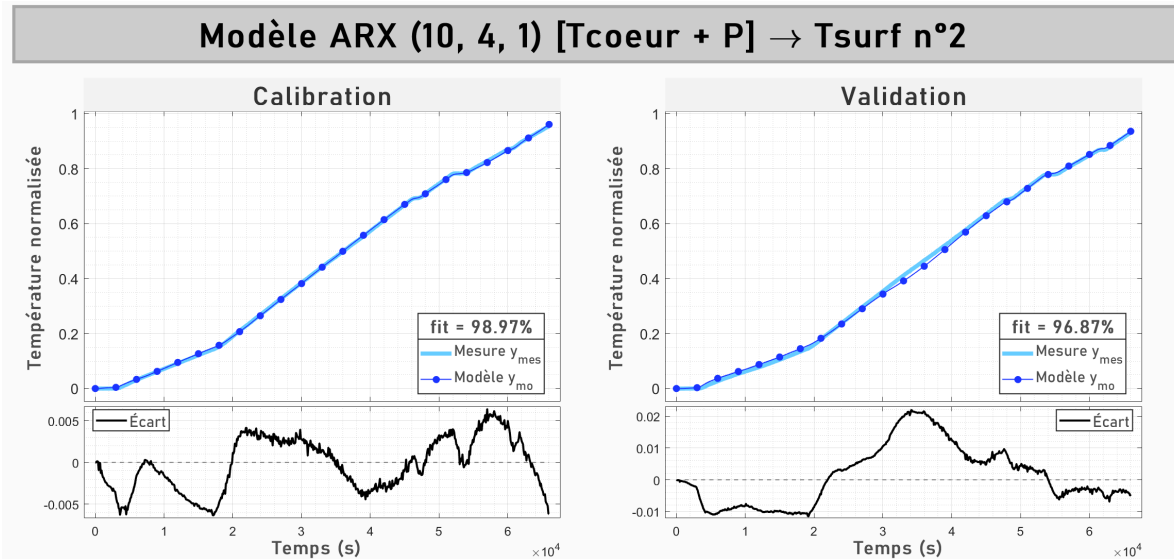


Figure 5 : Identification du modèle ARX [T_{coeur} + P] → T_{surf,2} d'ordres (10, 4, 1) (calibration sur les données réelles REA1, validation sur les données réelles REA2)

Dans un premier temps, le cas d'une calibration sur les données réelles REA1 suivie d'une validation sur les données réelles REA2 est testé. La figure 5 montre l'identification du modèle ARX pour le thermocouple n°2, dont la réussite est moins évidente que précédemment (ajustements inférieurs à 99 %). En effet, outre le bruit de mesure, le système d'étude n'est pas rigoureusement le même entre la calibration et la validation (positionnement différent de la matrice dans le four, décalage léger de certains thermocouples, thermocouples différents, etc.).

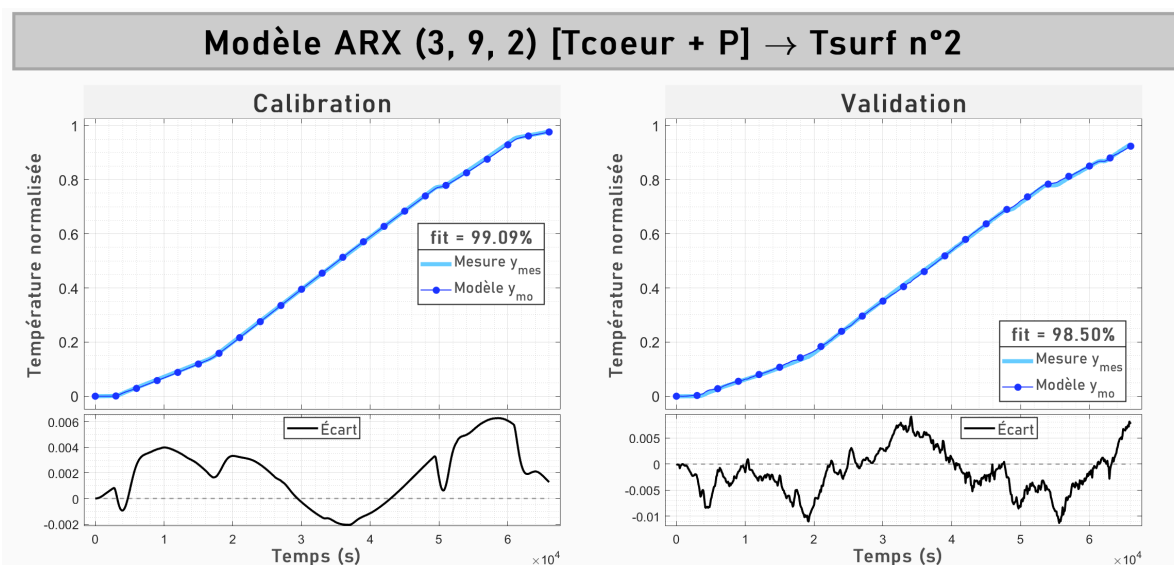


Figure 6 : Identification du modèle ARX [T_{coeur} + P] → T_{surf,2} d'ordres (3, 9, 2) (calibration sur les données numériques SIM1, validation sur les données réelles REA2)

Dans un second temps, le cas d'une calibration sur des données numériques suivie d'une validation sur des données réelles peut s'envisager. Industriellement, c'est le scénario le plus intéressant : le modèle numérique détaillé permet la création du capteur virtuel qui est ensuite utilisé sur le système réel. La figure 6 montre l'identification plutôt réussie du modèle ARX pour le thermocouple n°2. A nouveau, entre la calibration et la validation, le système d'étude n'est pas rigoureusement le même, cette fois-ci à cause de la modélisation évidemment inexacte de la matrice \mathcal{M} dans Simfurnace.

6. Conclusion

L'étude s'est attelée à l'identification de modèles ARX en vue de les utiliser comme capteurs virtuels lors de l'opération de brasage d'échangeurs de chaleur, processus industriel très dépendant de thermocouples parfois défaillants. Le choix des entrées de tels modèles s'est basé sur des considérations physiques, le choix des ordres sur la minimisation de la SAIC. En utilisant des données numériques de la modélisation détaillée Simfurnace ou des données mesurées lors de réelles opérations de brasage, la grande précision des modèles ARX a été constatée vis-à-vis des mesures de deux thermocouples d'une matrice donnée. L'étude conforte donc ces modèles d'ordre réduit comme solution pertinente à la problématique métrologique de l'industriel, même si d'autres résultats non présentés ici montrent de fortes imprécisions pour d'autres thermocouples ou d'autres matrices à cause d'une moyenne P encore mal construite.

Les perspectives de l'étude sont d'une part l'emploi de moyennes de puissances P plus complexes pour accroître la précision des modèles, et d'autre part l'automatisation de la construction des modèles (coefficients c , ordres autorégressif et exogènes, ajout de retards, etc.) à partir des principales caractéristiques de la matrice.

Références

- [1] Bamdad Salemi, Benjamin Rémy, Alain Degiovanni, Fermín Úriz Jáuregui, Olivier Verseux, *Mise en place de modèles paramétriques autorégressifs de type « ARX » pour l'extrapolation de températures d'équipements dans la nacelle d'un système propulsif*, Société Française de Thermique (2011)
- [2] Thomas Loussouarn, Denis Maillet, Benjamin Rémy, Vincent Schick, Diane Dan, *Mesure indirecte de température dans un four par identification de modèle ARX*, Société Française de Thermique (2017)
- [3] Badre Sahnoun, Benjamin Rémy, Vincent Schick, Antoine Lopez, Romuald Guilbaut, *Modélisation et simulation du transfert thermique verre-moule dans un procédé de soufflage verrier*, Société Française de Thermique (2019)
- [4] ALPEMA, *The standards of the brazed aluminium plate-fin heat exchanger manufacturers' association*, 3^{ème} édition (2010)
- [5] Lennart Ljung, *System Identification : Theory for the User*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA (1987)
- [6] Daniel Petit, Denis Maillet, *Techniques inverses et estimation de paramètres. Partie 1*, Techniques de l'Ingénieur (2008)
- [7] Hirotugu Akaike, *Information theory and an extension of the maximum likelihood principle*, Springer Series in Statistics, New York, USA (1998)
- [8] Célien Zacharie, *Modélisation des transferts thermiques instationnaires par modèles paramétriques : application à un four industriel de brasage d'échangeur sous vide*, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Fives Cryo (2020)
- [9] Adrien Barthélémy, Benjamin Rémy, Vincent Schick, Thierry Mazet, Gaëtan Bergin, Célien Zacharie, *Identification de modèles paramétriques monodimensionnels d'un four de brasage et de sa charge*, Société Française de Thermique (2022)
- [10] Maroun Nemer, *Modélisation de fours de brasage sous vide et validation expérimentale. Méthodes de réduction du temps de brasage*, Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, Nordon Cryogénie (2005)