

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

Adrien BARTHÉLÉMY^{1,2*}, Benjamin RÉMY¹, Vincent SCHICK¹, Thierry MAZET², Gaëtan BERGIN², Célien ZACHARIE²

¹ Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), Université de Lorraine
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 - Une piste pour caractériser la thermique d'un système industriel composé d'un four de brasage sous vide et de sa charge consiste en l'identification de modèles paramétriques ARX. Ces derniers peuvent constituer un outil dans la gestion de problèmes métrologiques. Dans cet article, des modèles ARX sont estimés dans un cas théorique monodimensionnel après avoir été sélectionnés par une méthode de recherche aveugle exploitant le critère d'Akaike remanié. Certains modèles ARX prometteurs demeurent robustes avec l'ajout d'un bruit artificiel ainsi que sur des données réelles.

Nomenclature

AIC	Critère d'Information d'Akaike	n	Ordre d'ARX
ARX	Auto Regressive model with eXternal inputs	P	Puissance, W
a	Coefficient autorégressif	$SAIC$	Somme des AIC (calibration et validation)
b	Coefficient exogène	T	Température, K
c_p	Capacité thermique, J/kg/K	u	Entrée d'ARX
e	Épaisseur, mm	y	Grandeur à modéliser, sortie d'ARX
fit	Ajustement paramétrique	ε	Émissivité radiative
k	Indice de discrétisation temporelle	ρ	Masse volumique, kg/m ³
m	Nombre de mesures	σ	Écart-type
		λ	Conductivité thermique, W/m/K

1. Introduction

L'opération de brasage est une étape cruciale lors de la fabrication industrielle d'échangeurs en aluminium à plaques et ondes brasées. Se déroulant dans un four de brasage sous vide doté de dizaines de panneaux radiants, la chauffe homogène de la charge (futur échangeur), jusqu'à fusion de la brasure, est assurée par un système de régulation exploitant les mesures de dizaines de thermocouples en surface et au centre de la charge. Toutefois, un dysfonctionnement métrologique peut altérer cette homogénéité. Il en résulte des gradients thermiques lors de la chauffe, sources de contraintes mécaniques dommageables.

Pour résoudre ce problème, l'usage d'un modèle de comportement décrivant le système dans son ensemble (four et charge) est alors envisagé. En effet, le modèle pourrait fournir des données synthétiques de remplacement des mesures jugées fausses. Pour des raisons industrielles (rapidité des calculs, variabilité et méconnaissance des propriétés physiques du système), le choix du type de modèle s'est porté sur les modèles réduits paramétriques, et plus précisément sur les modèles ARX.

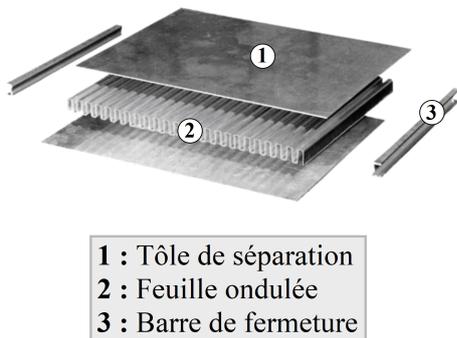
2. Description du problème

Un échangeur en aluminium à plaques et ondes brasées est fabriqué par l'empilement alterné de feuilles ondulées (ondes) et de tôles de séparation recouvertes de brasure (plaques) [1], comme illustré sur la figure 1. Cet empilement doit subir l'opération de brasage pour devenir un bloc uni (puis *in fine* l'échangeur après d'autres étapes industrielles) par la fusion puis la resolidification de la brasure qui lie plaques et ondes entre elles.

Le système d'étude est le four de brasage avec sa charge.

La charge est l'empilement de plaques et d'ondes à braser (pavé gris à droite sur la figure 2) ainsi qu'un outillage complexe (plaques de renfort et système de compression avec ressorts) entourant l'empilement et qui n'est pas considéré dans cet article.

Le four de brasage est une enceinte cylindrique (à gauche sur la figure 2) sous vide et refroidie par un thermostat. A l'intérieur, l'association parallélépipédique de 88 panneaux radiants entoure entièrement la charge. Chaque panneau radiant est composé d'une résistance en molybdène accolée à un double écran d'acier. L'injection d'une puissance électrique dans chaque panneau permet au four de chauffer la charge par transfert radiatif, puis par transfert conductif au sein de la charge, jusqu'à atteindre la température de fusion de la brasure. Pour éviter d'engendrer de trop fortes contraintes thermo-mécaniques dans la charge durant la chauffe, des dizaines de thermocouples y sont insérés en surface dans des perçages (étoiles de la figure 2), plus un au cœur, et fournissent en continu des mesures de température à un système de régulation. Celui-ci adapte la puissance des panneaux pour limiter l'apparition de gradients thermiques importants en surface ou entre la surface et le cœur et avoir ainsi la chauffe la plus homogène possible.



1 : Tôle de séparation
2 : Feuille ondulée
3 : Barre de fermeture

Figure 1 : Éléments constitutifs d'un échangeur

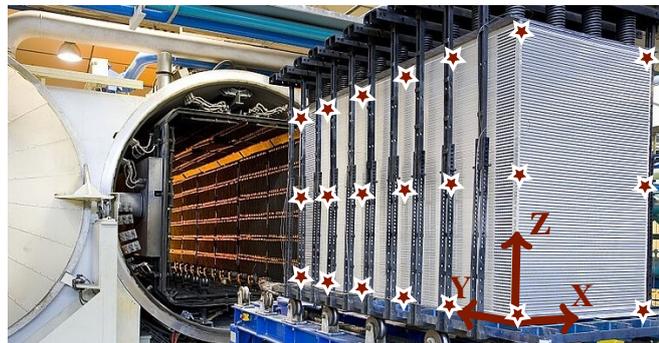


Figure 2 : Charge avant son enfournement dans le four de brasage (Fives Cryo, site de Golbey)

Toutefois, un dysfonctionnement métrologique (thermocouple en panne, biaisé, ...) peut altérer la régulation et donc nuire à une chauffe correcte de la charge. Dès lors, des défauts structurels apparaissent et entraînent la mise au rebut du futur échangeur incapable de passer les contrôles de qualité, ce qui représente un préjudice notable pour le fabricant d'échangeurs.

Une solution envisagée à ce problème métrologique serait l'utilisation en temps réel de modèles recréant l'évolution de la mesure de chaque thermocouple. Outre un rôle de détection d'un éventuel biais de mesure, ces modèles pourraient remplacer les thermocouples défectueux aux yeux de la régulation. Des critères importants conditionnent le choix du type de modèle :

- Propriétés thermophysiques du système mal connues
- Charge différente d'un brasage à l'autre
- Temps de calcul des températures synthétiques court pour un emploi lors de la chauffe

Une première étude [2] réalisée chez Fives Cryo a sélectionné les ARX comme type de modèle et a partiellement validé leur pertinence pour le système considéré {four + charge}.

3. Modèle ARX

Un modèle ARX discret, permettant de calculer à l'instant k une grandeur de sortie y à partir de grandeurs d'entrée u , est décrit par l'équation suivante (exemple avec deux entrées) ^{[2] [3]} :

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

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. Dans la suite, $n_r = 0$ pour toutes les entrées.

Ainsi, un ARX exploite les valeurs de y aux instants précédents via n_a coefficients a en plus des valeurs des entrées via $n_{b,j}$ coefficients b_j pour chaque entrée u_j . Ces coefficients sont des paramètres qui ont une signification physique uniquement dans des cas simples, ce qui situe les ARX parmi les modèles de comportement (plus exactement les modèles paramétriques polynomiaux).

Les coefficients d'un ARX (modèle localement linéaire) sont estimés par la méthode des moindres carrés ordinaires : il s'agit donc d'une identification de modèle ^[4]. Cette estimation se fait en deux temps : la *calibration* où les coefficients sont estimés à l'aide d'un jeu de données, puis la *validation* où la qualité de l'estimation est vérifiée avec un autre jeu de données.

Pour évaluer l'adéquation entre la courbe expérimentale y_{mes} de y et la courbe synthétique y_{mo} issue de l'ARX (en calibration comme en validation), l'*ajustement paramétrique*, qui sera par la suite nommé *fit*, peut être utilisé (adéquation parfaite à 100 % de fit) :

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

En outre, lorsque plusieurs ARX d'ordres différents sont estimés pour la même sortie y et les mêmes entrées u , le *critère d'information d'Akaike* (AIC) évalue la qualité d'un ARX selon son fit paramétrique (en calibration) ainsi que son ordre global (nombre total de coefficients a et b). Il permet alors de sélectionner un ARX robuste et peu gourmand en paramètres ^{[3] [5]} :

$$AIC = m \log \left(\frac{\|y_{mes} - y_{mo}\|^2}{m} \right) + 2 \left(n_a + \sum_j n_{b,j} \right) + m (\log(2\pi) + 1) \quad (3)$$

L'étape de validation est négligée par l'AIC. Or, un ARX précis en calibration est industriellement inintéressant s'il s'avère mauvais en validation (c'est-à-dire en exploitation). Une variante de l'AIC est donc utilisée pour faire un compromis entre fit de calibration, fit de validation et ordre global de l'ARX :

$$SAIC = AIC_{cal} + AIC_{val} \quad (4)$$

Les modèles ARX sont compatibles avec les contraintes industrielles (connaissance non nécessaire des propriétés physiques, adaptabilité vis-à-vis de la charge, calcul rapide de y car peu de paramètres). Dans une thèse réalisée chez Fives Cryo, des ARX *globaux* ont déjà été estimés avec en guise de y la température *moyenne* mesurée par tous les thermocouples en surface de la charge. Cependant, les ARX *locaux* avec pour y la température mesurée par un seul thermocouple, donc *en un point* de la charge, restent à déterminer.

4. Modélisation monodimensionnelle et méthode aveugle de recherche

Une méthode simple pour la recherche d'ARX peut se baser sur une modélisation 1D du système {four + charge}. Cette démarche a été effectuée dans la thèse chez Fives Cryo^[2] mais en supposant la symétrie du système de part et d'autre du centre de la charge. Dans cet article, la modélisation 1D proposée se passe d'une telle hypothèse (figure 3). Entre charge, résistances, écrans et paroi, des transferts radiatifs ont lieu (four sous vide donc pas de convection).

Les grandeurs d'intérêt pour y sont les températures de peau T_{peau} (en surface de charge, faces gauche et droite sur la figure 3) ou celle de cœur $T_{cœur}$ (au centre de la charge). Elles peuvent également intervenir en tant qu'entrées u , comme la température T_{molyb} des deux résistances et les deux puissances électriques P injectées. Toutes ces grandeurs (figure 3) sont mesurables par l'industriel. Cette approche monodimensionnelle peut permettre de déterminer des modèles ARX locaux valables loin des arêtes de la charge. Le tableau 1 fournit des propriétés typiques du système. La valeur du coefficient d'échange convectif h est inconnue de l'industriel : une valeur amenant aux mêmes températures qu'en réalité est donc choisie.

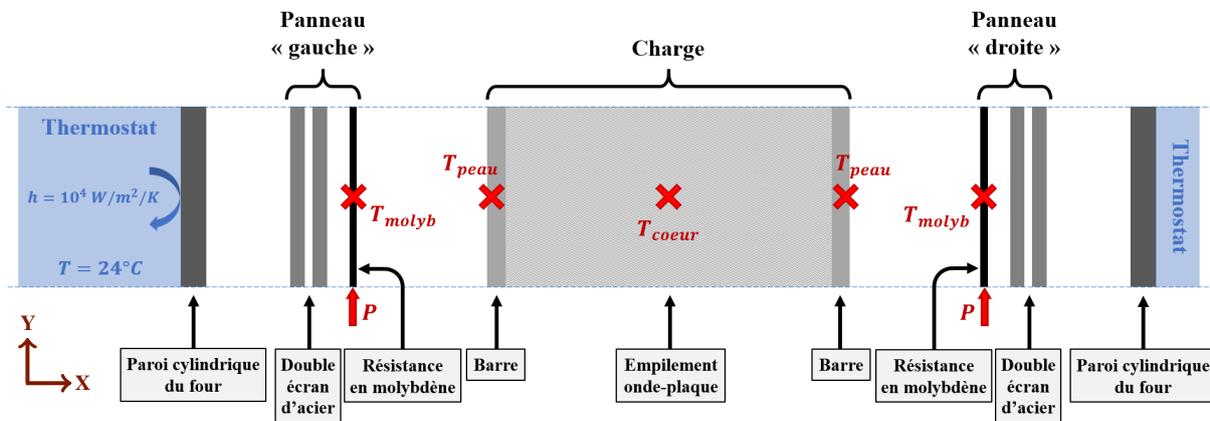


Figure 3 : Modèle 1D du système {four + charge}

Afin de sélectionner les meilleurs ARX monodimensionnels ayant un T_{peau} ou le $T_{cœur}$ en sortie (sachant que les degrés de liberté sont les entrées u et les ordres autorégressif et exogène(s)), une *méthode aveugle* de recherche est appliquée. Sans considération physique préalable, toutes les combinaisons d'entrées sont étudiées successivement pour un y donné.

Pour chaque combinaison d'entrées, toutes les combinaisons d'ordres sont considérées : le n_a et les $n_{b,j}$ varient de 1 à 10 (limite arbitraire). La sortie y , la combinaison d'entrées et la combinaison d'ordres étant fixées, les coefficients de l'ARX correspondant sont estimés (calibration et validation) et le critère SAIC est calculé. Ensuite, lorsque tous les ARX sont estimés pour la sortie y et la combinaison d'entrées considérées, la combinaison d'ordres dont l'ARX admet la SAIC la plus faible (donc la meilleure) est sélectionnée. Finalement, pour la sortie y , il ne reste qu'à comparer ces ARX sélectionnés par SAIC (un modèle ARX par combinaison d'entrées) pour extraire les combinaisons d'entrées les plus intéressantes.

Cette démarche permet non seulement d'obtenir les modèles ARX les plus robustes et les moins gourmands en paramètres, mais aussi de déterminer des modèles ARX physiquement peu intuitifs. La méthode aveugle est appliquée dans des cas théoriques puis dans des cas réels.

	λ W/m/K	ρ kg/m ³	c_p J/kg/K	ϵ	e mm
Paroi	20	7864	450	0.80	10
Écran	20	7864	450	1.00	0.7
Résistance	138	10220	450	1.00	2
Barre	160	2700	960	0.18	25
Onde-plaque	16	837	960	—	1300

Tableau 1 : Propriétés géométriques et thermo-physiques du modèle

5. Estimation avec des données théoriques

Dans un premier temps, le modèle 1D des figure 3 et tableau 1 est construit dans FlexPDE®. Dans un tel modèle, il est possible de linéariser ou non les transferts radiatifs en T^4 pour étudier l'influence des non-linéarités sur la robustesse des ARX (qui sont linéaires). Il est également envisageable de bruitez artificiellement la sortie y (avec un bruit blanc léger d'écart-type $\sigma = 0.1 K$). Les puissances P (normalisées) utilisées sont présentées figure 4.

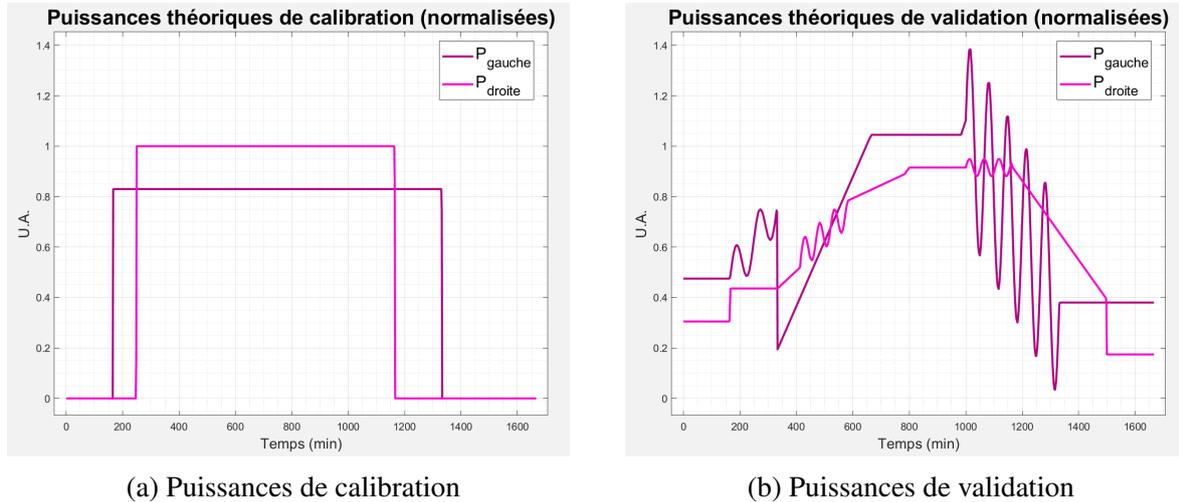


Figure 4 : Puissances de chauffe théoriques normalisées

Les données numériques issues de FlexPDE® (évolutions temporelles des puissances et des températures) sont utilisées pour l'estimation des modèles ARX lors de la phase de chauffe uniquement, c'est-à-dire avant fusion de la brasure. Les résultats de la méthode aveugle (ordres et fits) sont regroupés dans les tableaux 2 et 3. Les combinaisons d'ordres sélectionnées en l'absence de bruit sont directement utilisées dans les cas avec bruit pour tester la robustesse des ARX (les fits sont calculés par rapport aux données numériques non bruitées).

$y = T_{\text{coeur}}$	Transferts radiatifs linéarisés		Transferts radiatifs non linéarisés	
	Sans bruit	Bruit standard ($\sigma = 0.1 K$)	Sans bruit	Bruit standard ($\sigma = 0.1 K$)
$[T_{\text{peau, gauche}} + T_{\text{peau, droite}}] \rightarrow T_{\text{coeur}}$ (entrées $u \rightarrow$ sortie y)				
Combinaison d'ordres ($n_a, [n_{b,j}]$)	(4, [9 10])	\rightarrow (4, [9 10])	(2, [7 10])	\rightarrow (2, [7 10])
Fit de calibration (%)	99.99	99.89	99.97	99.88
Fit de validation (%)	99.95	98.25	99.95	98.42
$[P_{\text{gauche}} + P_{\text{droite}} + T_{\text{molyb, gauche}} + T_{\text{molyb, droite}}] \rightarrow T_{\text{coeur}}$				
Combinaison d'ordres ($n_a, [n_{b,j}]$)	(5, [10 8 7 8])	\rightarrow (5, [10 8 7 8])	(6, [1 2 4 6])	\rightarrow (6, [1 2 4 6])
Fit de calibration (%)	100.00	99.95	99.39	98.87
Fit de validation (%)	98.45	98.31	98.62	/

Tableau 2 : Quelques ARX sélectionnés par la méthode aveugle pour $y = T_{\text{coeur}}$

Les ARX sélectionnés sont performants lorsque les transferts radiatifs sont linéarisés, même avec un léger bruit. Cependant, sans linéarisation, la précision des ARX calculant $T_{\text{peau, droite}}$

(même constat pour $T_{\text{peau, gauche}}$) est altérée. Le passage de la figure 5 à la figure 6 permet de visualiser sur un exemple la dégradation des fits qui en découle : dès la calibration, un biais notable apparaît figure 6, traduisant une mauvaise construction du modèle du fait des non-linéarités (mauvais choix d'entrées, modélisation par un ARX non pertinente, ...).

$y = T_{\text{peau, droite}}$	Transferts radiatifs linéarisés		Transferts radiatifs non linéarisés	
	Sans bruit	Bruit standard ($\sigma = 0.1 K$)	Sans bruit	Bruit standard ($\sigma = 0.1 K$)
[$P_{\text{droite}} + T_{\text{coeur}}$] \rightarrow $T_{\text{peau, droite}}$ (entrées $u \rightarrow$ sortie y)				
Combinaison d'ordres ($n_a, [n_{b,j}]$)	(10, [10 2]) \rightarrow (10, [10 2])	(10, [10 2]) \rightarrow (10, [10 2])	(2, [7 3]) \rightarrow (2, [7 3])	(2, [7 3]) \rightarrow (2, [7 3])
Fit de calibration (%)	99.96	99.49	99.37	98.19
Fit de validation (%)	99.75	98.27	95.72	95.76
[$P_{\text{gauche}} + P_{\text{droite}} + T_{\text{peau, gauche}}$] \rightarrow $T_{\text{peau, droite}}$				
Combinaison d'ordres ($n_a, [n_{b,j}]$)	(8, [5 8 2]) \rightarrow (8, [5 8 2])	(8, [5 8 2]) \rightarrow (8, [5 8 2])	(10, [10 9 10]) \rightarrow (10, [10 9 10])	(10, [10 9 10]) \rightarrow (10, [10 9 10])
Fit de calibration (%)	99.98	99.12	99.96	99.65
Fit de validation (%)	99.34	96.65	93.26	94.69
[$P_{\text{droite}} + T_{\text{coeur}} + T_{\text{peau, gauche}}$] \rightarrow $T_{\text{peau, droite}}$				
Combinaison d'ordres ($n_a, [n_{b,j}]$)	(10, [10 2 1]) \rightarrow (10, [10 2 1])	(10, [10 2 1]) \rightarrow (10, [10 2 1])	(2, [6 7 6]) \rightarrow (2, [6 7 6])	(2, [6 7 6]) \rightarrow (2, [6 7 6])
Fit de calibration (%)	99.96	99.54	99.53	98.46
Fit de validation (%)	99.90	98.25	98.84	96.74

Tableau 3 : Quelques ARX sélectionnés par la méthode aveugle pour $y = T_{\text{peau, droite}}$

Sans linéarisation et avec un bruit, l'ARX [$P_{\text{gauche}} + P_{\text{droite}} + T_{\text{molyb, gauche}} + T_{\text{molyb, droite}}$] \rightarrow T_{coeur} échoue sa validation (tableau 2). Cela illustre l'intérêt d'estimer un modèle ARX sur des données bruitées : des modèles puissants au premier abord deviennent instables avec un bruit.

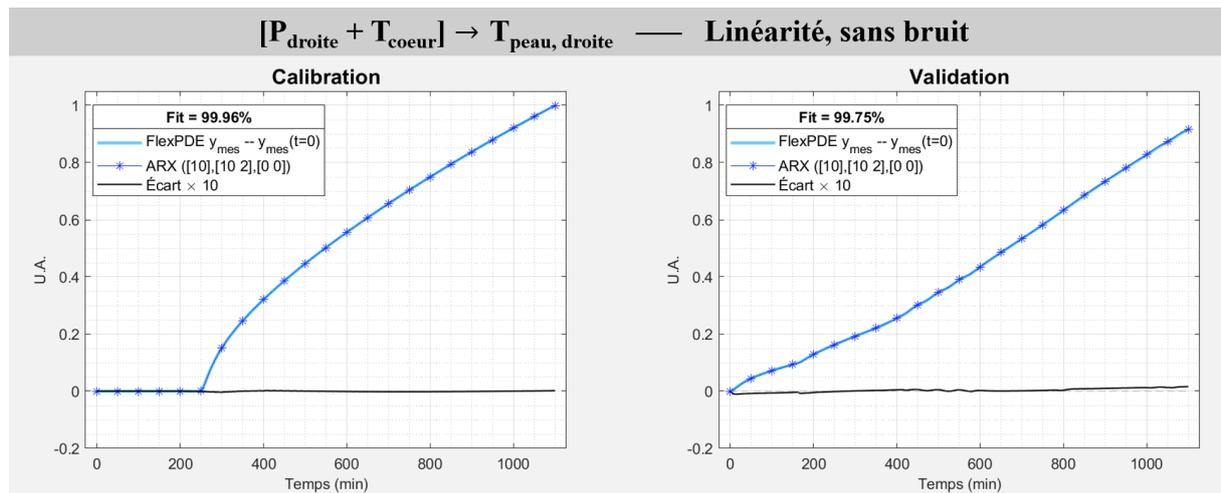


Figure 5 : Estimation de l'ARX [$P_{\text{droite}} + T_{\text{coeur}}$] \rightarrow $T_{\text{peau, droite}}$ (transferts radiatifs linéarisés, sans bruit, courbes normalisées)

L'application de la méthode aveugle dans des cas théoriques monodimensionnels a permis d'extraire un certain nombre de modèles ARX performants. Pour confirmer ou infirmer leur potentiel dans une application industrielle, ces ARX vont être estimés à partir de mesures réelles.

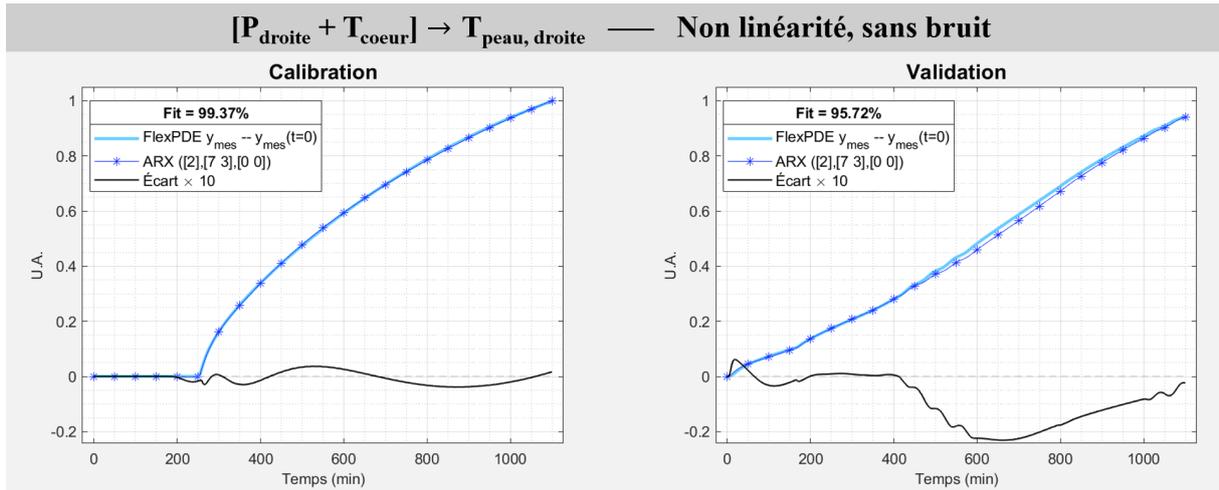


Figure 6 : Estimation de l'ARX $[P_{\text{droite}} + T_{\text{coeur}}] \rightarrow T_{\text{peau, droite}}$ (transferts radiatifs non linéarisés, sans bruit, courbes normalisées)

6. Estimation avec des données réelles

Dans un second temps, le modèle 1D de la figure 3 est adapté au système {four + charge} réel. En effet, des thermographies de l'intérieur de la charge tendent à confirmer le caractère monodimensionnel du système loin des arêtes de la charge. Ainsi, bien que le système soit tridimensionnel, l'utilisation des ARX précédents est envisageable. Il s'agit alors d'ARX locaux car destinés à calculer des températures en un point de la charge (à l'emplacement des thermocouples). L'allure typique des puissances P (normalisées) sont celles de la figure 7.

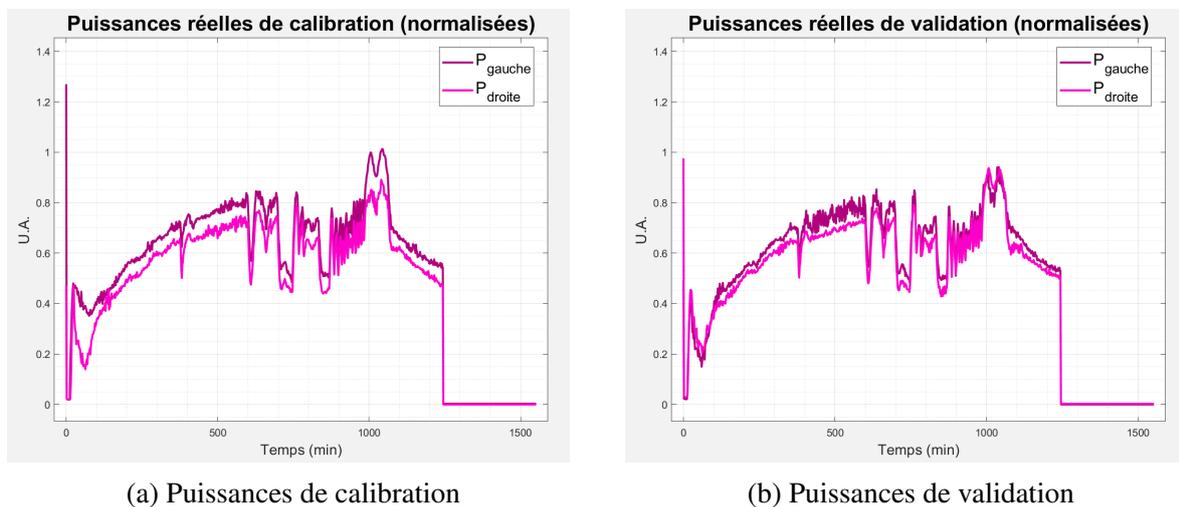


Figure 7 : Puissances de chauffe réelles normalisées

Des données réelles sont fournies par l'industriel et sont utilisées pour ré-estimer les modèles ARX précédents lors de la phase de chauffe. Les résultats de la méthode aveugle (ordres et fits) sont regroupés dans le tableau 4 pour trois systèmes différents (dimensions et cycle de chauffe variables). Les résultats sont globalement meilleurs que pour les cas théoriques sans linéarisation des transferts radiatifs et avec bruit. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce constat : bruit plus faible qu'en théorie, puissances P moins « asymétriques », etc.

	Système n°1	Système n°2	Système n°3
[T_{peau, gauche} + T_{peau, droite}] → T_{coeur} (entrées u → sortie y)			
Combinaison d'ordres (n _a , [n _{b,j}])	(9, [7 2])	(1, [1 8])	(1, [10 10])
Fit de calibration (%)	99.08	99.61	99.68
Fit de validation (%)	99.33	97.84	96.08
[P_{gauche} + P_{droite} + T_{molyb, gauche} + T_{molyb, droite}] → T_{coeur}			
Combinaison d'ordres (n _a , [n _{b,j}])	(8, [3 9 10 1])	(2, [1 3 10 1])	(10, [3 8 1 1])
Fit de calibration (%)	96.12	98.93	98.89
Fit de validation (%)	97.09	97.41	96.67
[P_{droite} + T_{coeur}] → T_{peau, droite}			
Combinaison d'ordres (n _a , [n _{b,j}])	(10, [1 9])	(6, [2 1])	(3, [1 3])
Fit de calibration (%)	98.48	97.92	98.89
Fit de validation (%)	97.10	96.14	91.20
[P_{gauche} + P_{droite} + T_{peau, gauche}] → T_{peau, droite}			
Combinaison d'ordres (n _a , [n _{b,j}])	(1, [3 6 7])	(7, [10 7 10])	(6, [3 9 3])
Fit de calibration (%)	99.70	99.32	99.41
Fit de validation (%)	91.27	98.89	98.96
[P_{droite} + T_{coeur} + T_{peau, gauche}] → T_{peau, droite}			
Combinaison d'ordres (n _a , [n _{b,j}])	(5, [6 9 7])	(3, [10 9 10])	(5, [6 8 1])
Fit de calibration (%)	99.47	99.22	99.36
Fit de validation (%)	94.57	98.82	97.89

Tableau 4 : Quelques ARX sélectionnés par la méthode aveugle (données réelles)

7. Conclusion

Pour répondre à des problématiques industrielles, une modélisation monodimensionnelle du système {four + charge} a permis l'obtention de modèles ARX locaux calculant des évolutions temporelles de températures. A travers une méthode de recherche aveugle utilisant la SAIC, plusieurs ARX ont pu être sélectionnés. Suite à des estimations sur des données numériques puis réelles, la performance de ces ARX a pu être confirmée. L'influence de phénomènes radiatifs non linéaires et d'un bruitage des données a été sommairement analysée. Des améliorations possibles concernent les ARX (ARX locaux étendus aux arêtes) ou la méthode de recherche aveugle (repérage avant sélection d'une instabilité au bruit). La finalité est l'identification d'ARX locaux en tout point d'intérêt de la charge et leur implémentation dans le processus industriel.

Références

- [1] ALPEMA, *The standards of the braze aluminium plate-fin heat exchanger manufacturers' association*, 3^{ème} édition (2010)
- [2] Célien Zacharie, Vincent Schick, Benjamin Rémy, Gaëtan Bergin, Renaud Égal, Thierry Mazet, *Identification de fonctions de transfert pour un four de brasage sous vide et sa charge*, article SFT (2018)
- [3] Lennart Ljung, *System Identification : Theory for the User*, Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall (1987)
- [4] Daniel Petit, Denis Maillet, *Techniques inverses et estimation de paramètres - Partie 1*, Techniques de l'Ingénieur (2008)
- [5] Hirotogu Akaike, *Information theory and an extension of the maximum likelihood principle*, Springer (1998)