

La maîtrise de l'homogénéité dans les fours sous vide

Nicolas Deforge, BMI Fours Industriels

S'assurer d'une bonne homogénéité dans un four sous vide est indispensable pour garantir la qualité d'un traitement. Les fabricants de fours sont à même d'accompagner les utilisateurs dans leur démarche.

La maîtrise de l'homogénéité thermique dans un four sous vide est un critère majeur pour la qualité des traitements thermiques de composants métalliques de haute technicité. Ainsi, dans un contexte industriel où les qualifications de moyens, les certifications de procédés et les aspects normatifs en général sont de plus en plus exigeants, les industries des secteurs de pointe, tels que l'aéronautique ou le médical, sont assujetties à des spécifications particulières qui définissent les règles pyrométriques pour les traitements thermiques. Dans cette optique, les fabricants de fours sous vide se doivent d'accompagner les utilisateurs dans la démarche de l'application de ces normes.

L'importance de l'homogénéité en température

Les traitements thermiques, notamment dans les référentiels aéronautiques sont considérés comme procédés spéciaux, c'est-à-dire que le contrôle du résultat n'étant pas directement mesurable, il importe de maîtriser les différents paramètres du process et d'en fixer les écarts possibles par rapport à la consigne. En traitements thermiques, le paramètre température est essentiel car il détermine les mécanismes de transformation métallurgique. La température étant elle-même issue d'une mesure indirecte via les sondes de température (thermocouples), il est nécessaire de fixer les conditions d'étalonnage, de suivi des thermocouples et de la chaîne de mesure.

De plus, il est également important de garantir et de surveiller périodiquement l'homogénéité des températures dans la zone d'utilisation du four. En effet, certaines applications nécessitent une très bonne homogénéité thermique. Par exemple, les traitements de superalliages bases nickel à haute température ou encore les revenus de durcissement d'aciers inoxydables sont réalisés dans des fours sous vide BMI dont l'homogénéité doit être absolument garantie $< +/- 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un autre procédé critique est le brasage aluminium qui nécessite une homogénéité $< +/- 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et pour lequel BMI a développé la gamme de fours spécifiques type BA5 (figure 1).

Pour les applications aéronautiques, ces points sont précisément l'objet de la norme

SAE AMS2750 E dont la mise en œuvre est exigée pour les accréditations Nadcap.

L'application de la norme AMS2750E

Le secteur aéronautique représente pour BMI plus de 70 % du marché des fours sous vide car le choix de ce type de four à haute valeur ajoutée est justifié par la qualité et la propreté des traitements thermiques et thermochimiques. La norme AMS2750E fixe les règles en ce qui concerne :

- l'homogénéité de température dans le volume utile (TUS);
- le type d'instrumentation pyrométrique du four de traitement thermique;
- le contrôle du calibrage de la mesure entre le régulateur et le thermocouple;
- le contrôle de la précision des chaînes de mesure, de surveillance, de régulation et d'enregistrement de température (SAT);

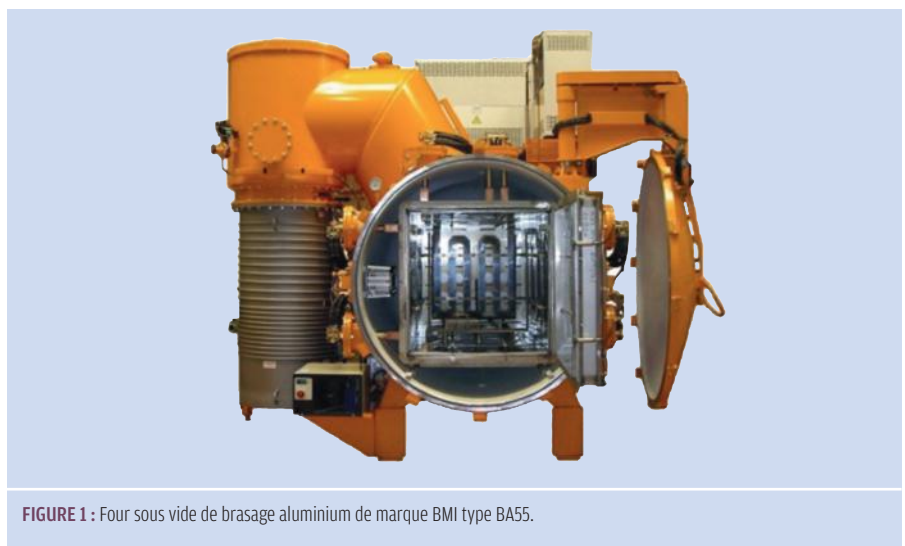


FIGURE 1 : Four sous vide de brasage aluminium de marque BMI type BA55.

- les conditions d'utilisation des thermocouples;
- la documentation des cycles de traitement et des opérations de contrôle;
- la gestion des offsets et corrections qui s'appliquent à la mesure des températures.

L'AMS2750E définit la classe d'homogénéité de température du four (**figure 2**) permettant ainsi d'établir une échelle de qualité adaptée au type de traitement à réaliser. Pour pouvoir être appliquée, les fabricants doivent en amont concevoir leur four pour pouvoir atteindre ces exigences.

Les fours sous vide pour une homogénéité maîtrisée

La propagation de température dans les fours sous vide étant obtenue principalement par rayonnement, le contrôle d'homogénéité est particulièrement important.

Pour proposer une bonne homogénéité, l'installation de traitement thermique doit répondre à des règles de conception bien spécifiques pour permettre d'effectuer des traitements thermiques sous atmosphère inerte (vide ou gaz inerte) en garantissant des résultats plus propres, sans contamination ou modification de la composition chimique superficielle, et plus reproductibles que les procédés conventionnels. Cela implique aussi un vieillissement moins rapide du four, donc une homogénéité qui se dégrade beaucoup moins dans le temps. L'ensemble de la gamme de fours BMI garantit une homogénéité de +/- 5 °C dans le volume utile sur toute la plage de température du four, ce qui correspond à une homogénéité meilleure que la classe 2 définie par la norme AMS2750E.

Certaines applications nécessitent même une homogénéité encore meilleure, et pour certaines, sur des plages de températures basses (< 650 °C) où il est difficile d'être

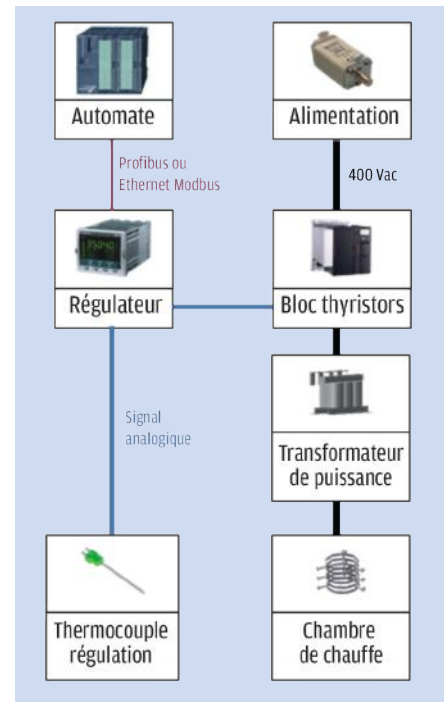


FIGURE 3 : Circuit de régulation de température indépendant.

homogène du fait du mode de chauffage sous vide par rayonnement peu efficace à basse température. C'est notamment le cas de certaines applications de frittage ou de brasage. Des familles de fours spécifiques doivent ainsi y être dédiées. Et le four sous vide BMI de brasage aluminium (gamme BA5) qui garantit une homogénéité de < +/- 3 °C à seulement 600 °C sous vide secondaire en est un bon exemple.

Ce four possède une chambre de chauffe avec au moins six zones de chauffe, voire beaucoup plus suivant la configuration du volume utile et des composants à braser. Chaque zone de régulation possède sa chaîne pyrométrique, sa boucle de régulation et sa ligne de contrôle de puissance (**figure 3**).

Cette multiplication des différentes zones de chauffe combinée à un design adapté de la zone de chauffe et à des paramètres de régulations optimisés permettent d'obtenir d'excellentes performances d'homogénéité en température et ce, sur toute la plage de température utile du four.

C'est ainsi que les fours sous vide, sont conçus afin de répondre aux exigences des industriels les plus sévères. Ils sont donc conformes à toutes les normes concernant l'homogénéité du volume utile notamment la norme AMS2750E. Mais pour appliquer ces normes très exigeantes

Classe du four	Homogénéité en température	
	°C	°F
1	+/- 3	+/- 5
2	+/- 6	+/- 10
3	+/- 8	+/- 15
4	+/- 10	+/- 20
5	+/- 14	+/- 25
6	+/- 28	+/- 50

FIGURE 2 : Homogénéité en température correspondant à chaque classe AMS2750E.

en exploitation, le four doit disposer d'un outil d'accompagnement afin de rendre aisée leurs applications sur toute la durée de vie de l'installation. Le « PackAéro » proposé en standard ou en option sur l'interface de supervision BMI permet d'assister de manière formalisée l'utilisateur dans cette démarche. Notons que pour les utilisateurs non aéronautiques, cet outil entièrement paramétrable selon les besoins reste tout aussi utile et pratique pour la qualité et le suivi des performances du four.

Le contrôle de l'homogénéité en température

Les constructeurs et sous-traitant aéronautiques se doivent donc d'effectuer un contrôle régulier de l'homogénéité thermique de leur four suivant la norme AMS2750E. Ces contrôles sont appelés cartographie (TUS - Temperature Uniformity Survey - dans la norme AMS2750E). Le principe de réalisation de ces contrôles consiste à placer des thermocouples en quantité définie par la norme à des endroits représentatifs, délimitant le volume utile du four. Les figures 4 et 5 illustrent la disposition des thermocouples TUS pour un four BMI de la gamme B8_T. Après cette phase de préparation, l'homogénéité est mesurée en effectuant des paliers à diverses températures incluant toute la plage de fonctionnement habituelle du four et selon des règles définies. Ces paliers couvrent toute la plage de température d'utilisation du four.

Pour chacun des paliers, lors de l'arrivée à température, l'overshoot (dépassement de la température de consigne) doit impérativement rester dans la valeur de la classe du four telle que définie dans le tableau de la figure 2. De plus, après stabilisation aucun des thermocouples ne doit sortir de la limite de température fixée pour la classe visée. Le contrôle TUS surveille aussi les phases transitoires de montée et d'accostage en température.

Ainsi, pour l'exemple du four BMI (figures 4 et 5) neuf thermocouples mesurent et enregistrent en continu la température à chaque angle et au centre du volume utile afin de déterminer pour chaque palier de température, la différence entre le point le plus chaud et le point le plus froid du volume utile.

La norme impose également que tous les thermocouples « process » installés sur le four et utilisés en production (thermocouples régulation/enregistrement/sécurité/charge) restent aussi dans la limite de la classe du four.

En cas de défaut d'homogénéité (overshoot



FIGURE 4 : Exemple de mannequin utilisé pour faire une cartographie dans un four BMI de la gamme B8_T.

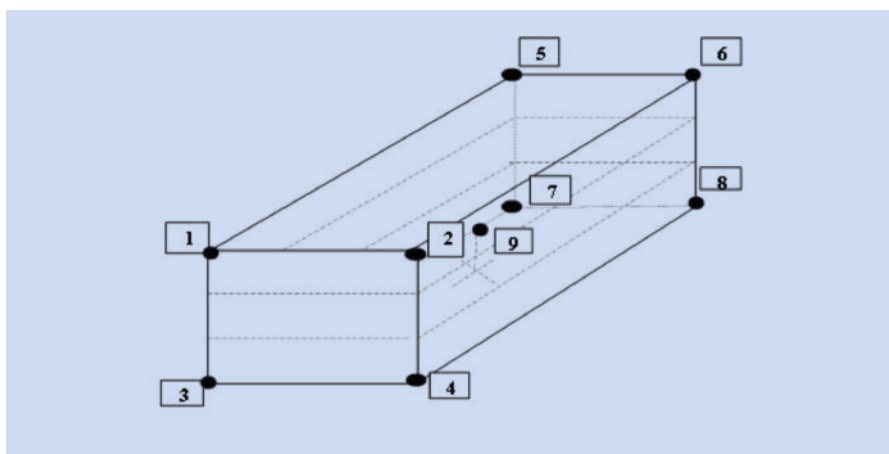


FIGURE 5 : Position des thermocouples lors d'une cartographie.

et/ou dispersion hors classe d'homogénéité visée en phase stabilisée), il faut notamment et en premier lieu, agir sur la régulation de la température en optimisant la position du thermocouple de régulation et/ou en ajustant les paramètres du correcteur PID. Malgré ces ajustements, le thermocouple de régulation de la température du four étant placé au plus près mais hors du volume utile qu'il contrôle, il arrive que la dispersion de température ne soit pas exactement centrée sur la consigne. Un réglage optimisé est alors réalisé par BMI avant livraison du four. En effet, le constructeur peut appliquer sur un four neuf un facteur de correction dit « d'asymétrie » visant à recentrer parfaitement la dispersion de température par rapport à la consigne, après recherche et réglage optimisé de la position du/des thermocouple(s) de régulation. Il doit être visible mais non modifiable par le client (sauf conditions particulières).

Toutefois, en fonctionnement, les équipements pyrométriques évoluent (changement des thermocouples, variation normale des écarts de justesse des appareils de mesure, léger déplacement des positionnements des thermocouples, vieillissement de la structure isolante...). Il est donc indispensable pour l'utilisateur d'être en mesure de réaliser ce réglage d'optimisation. La difficulté majeure dans cette éventualité provient de la prise en compte des offsets et corrections. Le « PackAéro » intégré à la supervision BMI permet d'accompagner les industriels dans cette gestion avec un outil très simple d'utilisation.

La gestion des facteurs de corrections

La norme AMS2750E exige une vérification et fixe des limites pour tous les éléments des chaînes pyrométriques installées sur le four. Ainsi, il faut, avant de lancer un four en production, connaître par étalonnage ou

	TC régulation									
	TUS		SAT		ETALONNAGE					
	Offset	Temp	Offset	Temp	Offset	Temp	Offset	Temp	Offset	Temp
1	0.0	0	0.0	0	-0.1	0	0.0	0	0.0	0
2	0.0	0	0.0	0	0.1	82	0.0	82	0.0	82
3	0.0	0	0.0	0	0.0	164	0.0	164	0.0	164
4	2.0	100	0.1	100	0.0	245	0.0	245	0.0	245
5	2.5	200	0.0	200	0.1	327	0.0	327	0.0	327
6	2.0	300	0.2	300	0.2	409	0.0	409	0.0	409
7	1.6	400	0.0	400	-0.1	491	0.0	491	0.0	491
8	1.3	500	-0.3	500	0.0	573	0.0	573	0.0	573
9	0.8	600	0.1	600	0.0	655	0.0	655	0.0	655
10	0.5	700	0.5	700	0.1	736	0.0	736	0.0	736
11	0.5	800	0.4	800	0.0	818	0.0	818	0.0	818
12	0.5	900	0.5	900	0.0	900	0.0	900	0.0	900
13										

FIGURE 6 : Visualisation de l'interface de gestion des offset dans la supervision BMI.

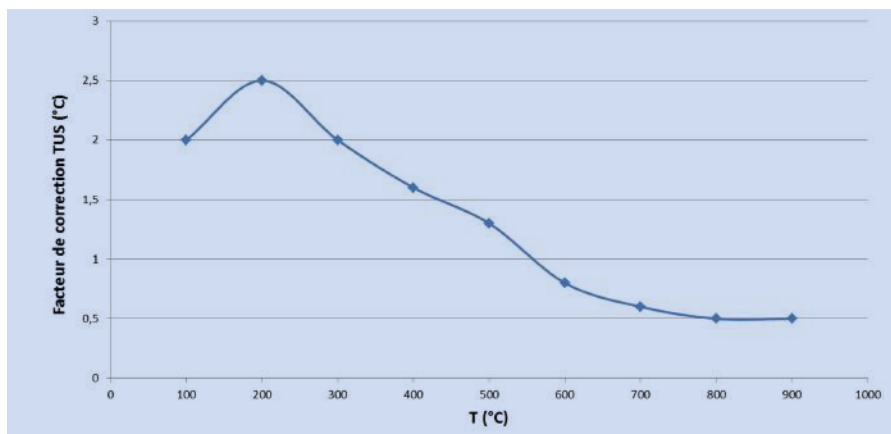


FIGURE 7 : Exemple d'une courbe linéarisée du facteur de correction TUS sur toute la plage de température.

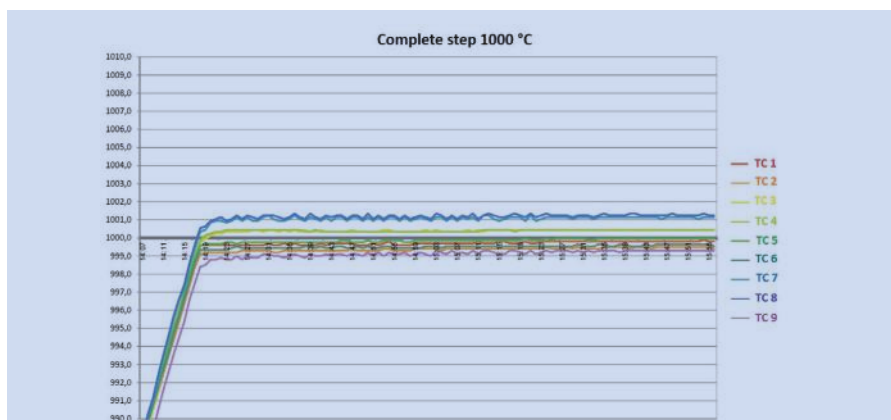


FIGURE 8 : Résultats d'une cartographie à vide pour un palier à 1000 °C.

Selection Thermocouples		TC Pieces	Changement		Valider						
Non	Type Thermocouple	Numéro Thermocouple	Numéro étalonnage	Date étalonnage	Date changement	Temps d'utilisation	Nombre d'utilisation	Température d'utilisation	SAT	Date SAT	Numéro SAT
TC Pieces	K	0			28/01/2016	0 Jour	270.0	0.0 °C	NON		
TC Regulation	N	11323	2436	28/01/2016	28/01/2016	90 Jour	270.0	0.0 °C	OK		
TC Securite	N	2134	2435	28/01/2014	28/01/2016	90 Jour	230.0	0.0 °C	NON		
TC Pieces	N	tc 2341	u45333	20/12/2016	20/08/2015	90 Jour	230.0	0.0 °C	NON		

FIGURE 9 : Visualisation de l'interface de suivi des thermocouples.

vérification, en conformité avec les normes nationales en vigueur :

- l'erreur de justesse des thermocouples ;
- l'erreur de justesse des appareils de mesure (régulateur, afficheur, enregistreur...)
- l'écart constaté sur la chaîne de mesure (cet écart appelé SAT pour dans l'AMS2750E est évalué en comparant une chaîne étalon à la chaîne de mesure) ;
- le décalage de centrage du TUS ou éventuellement le décalage nécessaire pour rendre le TUS correct (dans la mesure où l'écart est compatible avec les exigences de la norme).

Ces différents éléments varient évidemment avec la température. Ainsi par exemple, les thermocouples doivent être étalonnés, selon l'AMS2750E tous les 140 °C dans la plage de température utilisée pour les traitements. De plus, la périodicité de ces contrôles évolue au cours du temps suivant les résultats mesurés et selon les règles de la norme.

Par conséquent, à ce stade, deux remarques s'imposent :

- la gestion de ces différents écarts et corrections nécessite pour être efficace une aide intégrée à l'outil informatique de pilotage du four (Interface Homme Machine) ;
- l'optimisation précise du centrage du TUS ne peut se faire qu'en tenant compte des différents facteurs de correction à appliquer et ceci en fonction de la température.

La supervision BMI Graphtil avec « PackAéro » intègre une gestion efficace des offset via une interface graphique dédiée qui permet à l'utilisateur de gérer les corrections de toutes les chaînes de mesure et régulation de température de façon ergonomique. Pour chaque thermocouple, sur chaque plage de température, l'utilisateur entre ses facteurs de correction (figure 9). Ensuite, une linéarisation automatique permet d'obtenir la courbe déterminant le facteur de correction sur toute la plage de température (figures 6 et 7). La courbe de l'offset final en fonction de la température est obtenue sur chaque palier de température par addition des courbes linéarisées des facteurs de correction.

Après application de l'offset sur le thermocouple de régulation, la dispersion de température doit être conforme à la classe exigée. Pour un four BMI de la gamme B5_T (garanti à +/- 5 °C), le palier à 1000 °C d'une cartographie à vide est représenté figure 10 (seuls figurent les thermocouples instrumentant le

volume utile). On peut voir que pour ce palier de température, l'homogénéité est meilleure que +/- 2 °C.

Dans l'application de la norme AMS2750E ou d'autres directives dont l'objet est de contrôler les performances thermiques, on voit que la gestion d'un four peut devenir complexe et l'assistance de la supervision via l'outil que représente le « packAéro » sur les fours BMI devient primordiale. En effet, ce pack propose non seulement une gestion facilitée de l'offset mais aussi une aide à l'application des normes avec des rappels d'échéances pour les différents contrôles (TUS, SAT), ainsi qu'un suivi d'utilisation des thermocouples. Tous ces outils sont paramétrables et adaptables aux normes d'autres secteurs d'activité (médicale, automobile...).

Assistance au suivi d'utilisation des thermocouples

La supervision BMI permet de faire le suivi de tous les thermocouples du four et d'appliquer les directives des différentes normes régissant la pyrométrie, notamment l'AMS2750E.

Instrumentation	TYPE				
	A	B	C	D	E
Un thermocouple de régulation par zone de régulation qui contrôle et affiche la température.	X	X	X	X	X
Pour chaque zone de chauffe, la température du thermocouple de régulation doit être enregistrée dans un enregistreur.	X	X	X	X	
Pour chaque zone de chauffe, au moins deux thermocouples enregistreurs pour enregistrer la température du point froid et du point chaud de chaque zone.	X		X		
Au moins un thermocouple charge enregistré dans chaque zone de régulation.	X	X			
Un thermocouple sécurité par zone de régulation qui protège le four en cas de surchauffe. Le thermocouple d'enregistrement le plus chaud peut aussi être utilisé comme thermocouple de sécurité.	X	X	X	X	

FIGURE 10 : Types d'instrumentation proposés par la norme AMS2750E.

Chaque thermocouple est décrit dans la supervision avec ses différentes caractéristiques (figures 9 et 10) :

- type ;
- numéro d'étalonnage ;
- date étalonnage ;
- durée de vie ;
- temps d'utilisation ;
- nombre d'utilisations ;
- température d'utilisation.

Des alertes sont configurables pour avertir l'utilisateur de la nécessité d'un prochain contrôle ou remplacement d'instrumentation. Ce mode de gestion des alertes est une assistance à l'utilisateur efficace afin de répondre plus facilement aux exigences aux règles de l'AMS2750E qui, pour certains thermocouples, imposent des limitations sur leurs utilisations qui sont variables et limitées dans le temps en fonction de la température atteinte. Toutes ces

FOURS SOUS VIDE DE TRAITEMENT THERMIQUE

Leader dans l'aéronautique et les secteurs de pointe depuis 70 ans.



- TREMPE GAZ
- TREMPE HUILE
- BRASAGE / FRITAGE
- REVENU / RECUIT
- NITRURATION PLASMA
- ALLNIT® NITRURATION BASSE PRESSION
- ALLCARB® CEMENTATION BASSE PRESSION
- CARBONITRURATION / NITROCARBURATION

B.M.I. Fours Industriels
65, rue du Ruisseau
38297 Saint-Quentin-Fallavier

Tél : 04 74 94 34 44
Fax : 04 74 94 10 06
E-mail : infos@tenova.com

www.bmi-fours.com



B.M.I. SERVICES

Un accompagnement et un programme d'intervention complet.

- Démarrage des fours
- Formations
- Maintenance préventive
- Procédures de contrôle
- Rétrofit
- Mise aux normes
- Mise à niveau
- Déménagement de fours
- Réalisation, réparation de chambres de chauffe
- Pièces de rechange



« L'aide au suivi d'utilisation des thermocouples est une vraie opportunité pour la simplification de la gestion des contraintes d'utilisation. »

données font l'objet de rapports de suivi de chaque thermocouple qui sont sauvegardés sur le disque dur de l'ordinateur du four. Ces rapports accompagnent les rapports édités en fin de cycle contenant notamment les ordres de fabrication des pièces traitées dans le four.

Ainsi, tous ces rapports constituent une documentation et un archivage conformes aux exigences des différentes normes et permettent une excellente traçabilité de l'utilisation du four. Ce suivi des thermocouples est d'autant plus important que les normes proposent plusieurs types d'instrumentation pyrométrique qui peuvent multiplier les thermocouples dans l'installation de traitement thermique. Par exemple, pour la norme AMS2750E, les types d'instrumentation sont décrits dans la **figure 10**.

Les types d'instrumentation B (**figure 11**) et C sont les plus fréquents chez les industriels et le nombre de thermocouple peut être important, surtout si le four possède comme souvent plusieurs zones de chauffe. C'est pour cela que l'aide au suivi d'utilisation des thermocouples est une vraie opportunité pour la simplification de la gestion des contraintes d'utilisation liées à l'application de certaines normes.

Conclusion

Les nouveaux enjeux présents aujourd'hui dans le monde industriel amène à concevoir des pièces toujours plus optimisées

Bibliographie

SAE International, 2012. Aerospace Material Specification. AMS2750-E, 43 pages.

mécaniquement. Plus encore, avec l'essor de la fabrication additive, les pièces fabriquées seront soumises à de plus en plus de contraintes mécaniques pour un design toujours défini au plus juste. Dans ce contexte, les fours sous vide BMI, de par leur conception et avec les outils d'accompagnement qu'ils proposent, garantissent des traitements thermiques avec une excellente homogénéité en température qui répondent aux besoins des fabricants de pièces à haute valeur ajoutée les plus exigeants. Le « PackAéro » disponible sur la supervision BMI est une vraie solution d'aide à l'application des normes qui réglementent l'homogénéité en température, la régulation en température et l'instrumentation pyrométrique du four. À l'heure où les normes se multiplient et où les grands groupes y ajoutent leurs propres normes internes qui définissent des règles sur d'autres critères de performances du traitement thermique (PRO011 de Safran ou encore BAC5621 de Boeing), il est primordial que les fournisseurs d'équipement accompagnent les utilisateurs sur leur application en mettant en place des solutions très spécifiques.

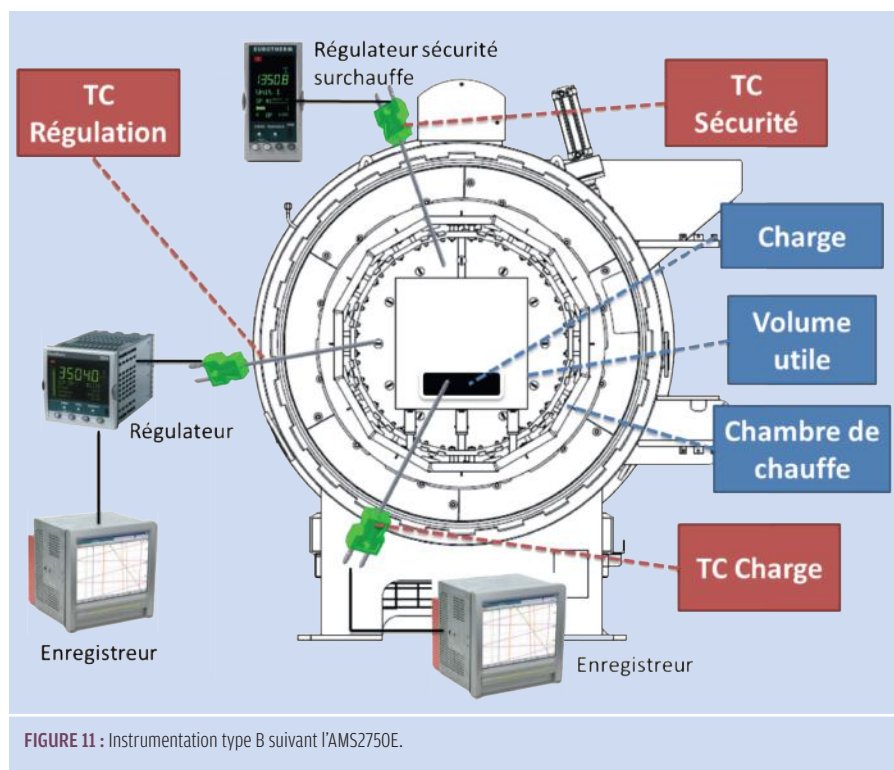


FIGURE 11 : Instrumentation type B suivant l'AMS2750E.