

1.	Objectif du document .....	2
2.	Référentiels .....	2
3.	Définitions .....	2
4.	Principe du traitement thermique .....	2
4.1.	Trempe (Mise en Solution) .....	3
4.2.	Revenu et Maturation .....	3
4.3.	Recuit Total (ou recristallisation) .....	4
4.4.	Recuit Partiel (ou restauration) .....	4
4.5.	Présentation du moyen de traitements thermiques .....	4
5.	Précautions opératoires .....	5
5.1.	Qualification du procédé .....	5
5.2.	Vérifications avant enfournement .....	5
5.3.	Cas de l'aluminium plaqué .....	6
6.	Mode opératoire .....	6
6.1.	Préparation de la charge .....	6
6.2.	Traitement .....	7
6.3.	Conservation au froid .....	8
6.4.	Contrôle .....	8
7.	Traçabilité .....	8
8.	Qualification opérateur .....	9
9.	Vérification métrologique du four de traitements thermiques .....	9

Indice	Date	Modifications	Etabli par
A	03/05/2017	Création	M.CURTY
B	04/05/2017	Ajout du critère d'équilibre de la charge dans la structure métallique	M.CURTY
C	08/06/2022	Mise à jour logo, Remplacement de Efitam par Fregate Aero §4.5 Modification : classe 2 pour une tolérance de +/- 5°C (AMS 2750)	M.BARRAL

### 1. Objectif du document

Ce document est une introduction au traitement thermique des aluminiums. Dans ce document, seuls les traitements réalisés en interne seront décrits. En plus des traitements et du contrôle des pièces, il sera abordé la vérification métrologique du four Thermidor.

### 2. Référentiels

DGQT 0.8.3.0001 Traitements Thermiques  
DGQT 0.8.3.0016 Conservation au froid après trempe des alliages d'Aluminium  
DGQT 0.8.3.0030 Surveillance des mesurages de température  
DGQT 0.4.7.0001 Rivetage avec rivets en alliages d'Aluminium  
DGQT 0.4.2.0376 Qualification et Contrôle des installations de traitement thermique  
DGQT 1.0.0.0031 Traitements Thermiques de pièces corroyées en alliages d'Aluminium  
DGQT 1.0.0.0052 Mesure de la dureté avec les pinces Webster  
IGC 04.63.100 Qualification des installations de traitement thermique et de polymérisation  
IGC 04.63.105 Vérification périodique des installations de traitement thermique et de polymérisation  
IGC 04.63.111 Traitement thermique des alliages d'aluminium – Contrôle des opérations et des pièces  
EI 070.09.012 Règles à suivre pour la caractérisation et le contrôle d'homogénéité des matériaux métalliques  
IFMA 861 Traitements thermiques des alliages d'aluminium  
AMS 2750 Pyrometry

### 3. Définitions

**SAT (System Accuracy Test)** : Test de précision des chaînes pyrométriques (régulation et enregistrement).

**TUS (Temperature Uniformity Survey)** : Vérification de l'homogénéité du volume utile du four.

**Thermocouple** : Capteur de température. Il existe plusieurs types qui sont définis selon leur matériaux de fabrication.


### 4. Principe du traitement thermique

Il existe plusieurs raisons de pratiquer un traitement thermique sur les alliages d'aluminium. Voici les deux principales pour les fabrications Fregate Aero :

- **Rendre le métal apte au formage**
- **Obtenir un durcissement structural du métal**

Pour **rendre l'aluminium apte au formage**, il existe différents traitements :

- Recuit Partiel
- Recuit Total
- Trempe fraîche

 Tous les aluminiums ne sont pas capables d'atteindre l'état de trempe fraîche. Seuls les aluminiums dits « trempants » peuvent l'être.

- Les alliages des séries 3000 et 5000 sont non-trempants.
- Les alliages des séries 2000, 6000 et 7000 sont trempants.

Afin d'**obtenir un durcissement structural** de l'aluminium, les traitements à réaliser sont :

- Trempe + Revenu
- Trempe + Maturation

Le traitement de revenu ne peut être effectué que sur de la matière à l'état T (« trempé »). Il faudra donc, en fonction de l'état initial de la matière, réaliser une trempe avant le revenu.

### 4.1. Trempe (Mise en Solution)

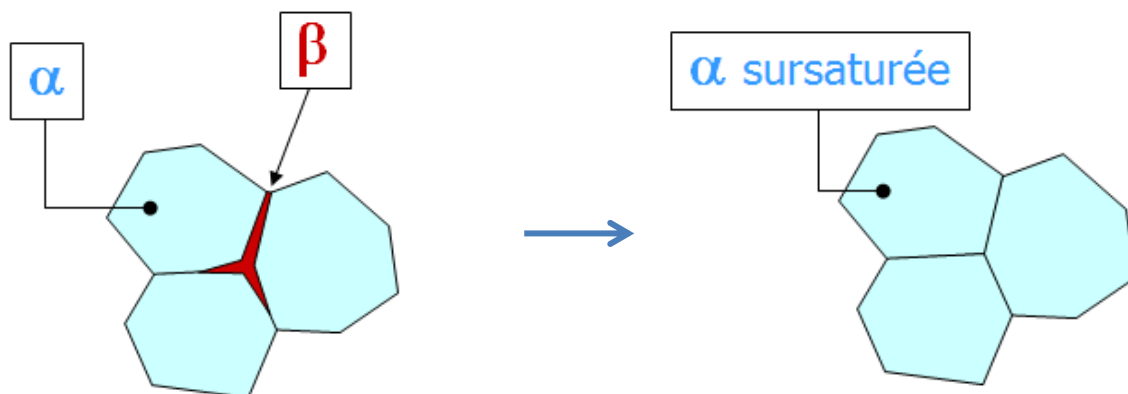
La mise en solution ne peut être réalisée que sur les alliages susceptibles de durcissement structural (Séries 2000, 6000 et 7000).

Ce traitement consiste à maintenir un alliage à une température élevée de façon à dissoudre les éléments d'addition solubles en quantité convenable dans l'aluminium.

La température de mise en solution varie suivant la nuance traitée. Les durées minima de mise en solution varient principalement suivant la section des produits traités et la nature de l'alliage. Une fois le traitement de mise en solution terminé, les pièces sont plongées dans le bac de trempe.

Immédiatement après trempe, l'alliage est dans un état temporairement adouci (état de trempe "fraîche") qui le rend facile à être travaillé (cependant moins malléable que l'alliage à l'état recuit).

L'état de trempe fraîche peut être conservé temporairement en mettant les pièces dans une enceinte frigorifique à une température maximum de -18°C.



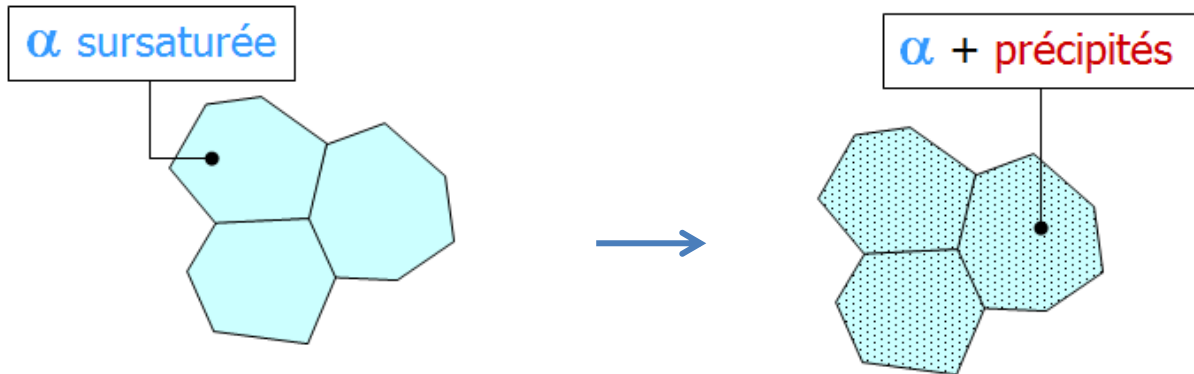
### 4.2. Revenu et Maturation

L'alliage fraîchement trempé évolue dans le temps vers un état plus stable par précipitation des phases en sursaturation, ce qui provoque un durcissement structural, amenant une amélioration des caractéristiques mécaniques et une diminution de la ductilité. Il existe deux façons d'obtenir un durcissement structural après trempe ; le revenu et la maturation.

La maturation agit spontanément lorsque la matière est à température ambiante. C'est un phénomène qui peut prendre jusqu'à plusieurs mois en fonction des alliages. Après maturation, l'alliage est à l'état T4.

Cette évolution de la matière peut être accélérée par un traitement de revenu (vieillessement artificiel). Il s'agit d'un maintien à une température appropriée en vue d'obtenir un durcissement structural optimal. Après revenu, l'alliage est à l'état T6. Attention, c'est le traitement le plus précis en termes de température, du fait de sa tolérance de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Dans les deux cas, les éléments en sursaturation sont rejetés sous forme de précipités.



### 4.3. Recuit Total (ou recristallisation)

C'est un recuit de recristallisation (les grains se combinent les uns aux autres) effectué à une température suffisamment élevée et pendant un temps suffisamment long, avec refroidissement lent (pour les alliages trempants) pour obtenir une recristallisation de l'alliage permettant d'obtenir l'adoucissement maximum des alliages durcis par écrouissage.

### 4.4. Recuit Partiel (ou restauration)

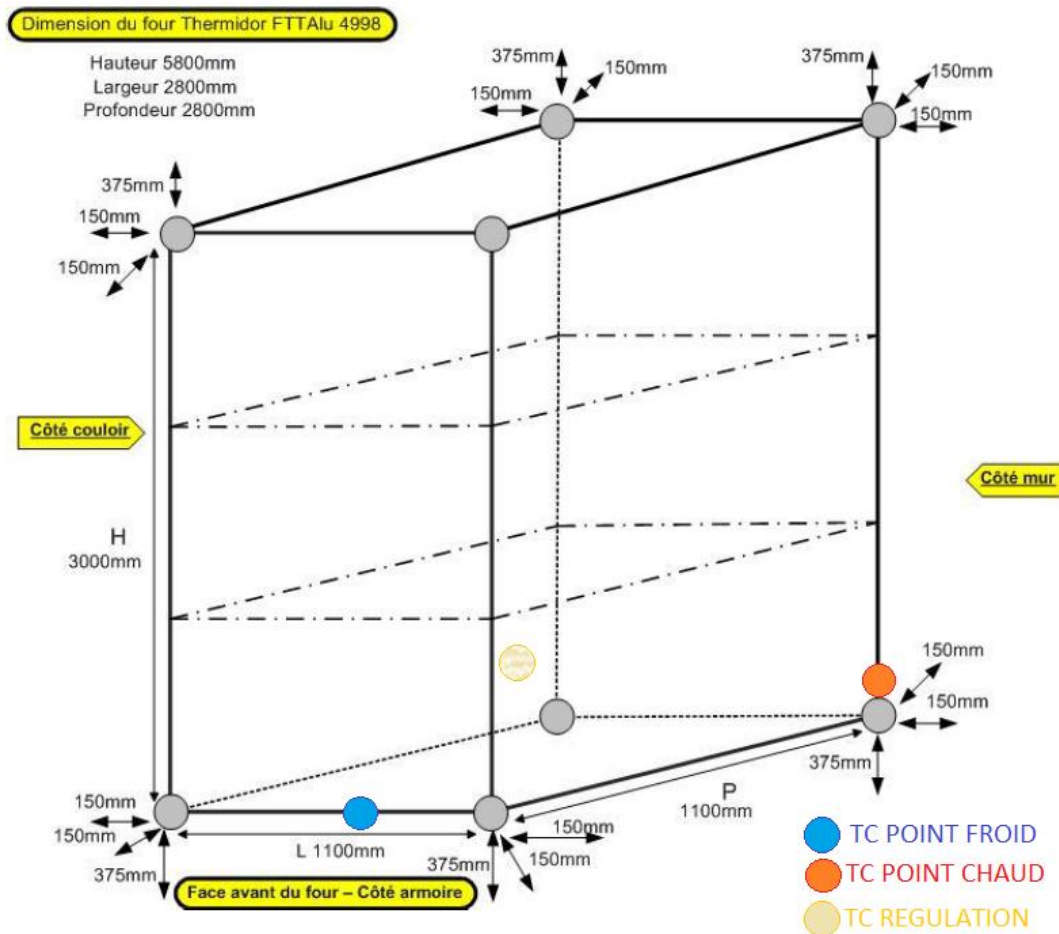
C'est un recuit de restauration effectué à des températures inférieures à celles du recuit total. Il ne provoque pas la recristallisation, mais atténue seulement les tensions dues à l'écrouissage, ce qui permet de retrouver partiellement une certaine aptitude au formage, en évitant un éventuel grossissement du grain. Le recuit partiel ne peut pas être réalisé sur l'alliage 5086.

### 4.5. Présentation du moyen de traitements thermiques

Fregate Aero a investi courant 2016 dans un nouveau four de traitement thermique de marque THERMIDOR. C'est un four vertical à ouverture par le bas, muni d'un bac de trempe à eau. Le volume utile de traitement est d'environ  $3\text{m}^2$  et la chauffe est assurée par des résistances situées sur les 4 parois.

Le four THERMIDOR est muni d'un régulateur de température, d'un régulateur de sécurité process et d'un enregistreur. Il possède également trois thermocouples résidents de type N qui sont enregistrés en permanence. Ces sondes sont les suivantes ; une de régulation, une au point le plus froid et une au point le plus chaud. Cette dernière réalise également la fonction de sonde de sécurité. La température du bac de trempe est également enregistrée via une sonde de température. Selon l'AMS 2750, l'ensemble de ces équipements remplissent les exigences pour prétendre à un four de type C.

Notre four est qualifié pour une plage de  $80^{\circ}\text{C}$  à  $535^{\circ}\text{C}$  selon l'AMS 2750. Il est de classe 1, soit homogène à  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  sur une plage de  $80^{\circ}\text{C}$  à  $200^{\circ}\text{C}$  et de classe 2, soit homogène à  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  sur une plage de  $200^{\circ}\text{C}$  à  $535^{\circ}\text{C}$ .



Le schéma ci-dessus représente le volume utile du four, c'est-à-dire la zone dans laquelle il est autorisé de travailler. Ce volume correspond aux dimensions de la structure métallique. Il est donc strictement interdit de faire dépasser des pièces de la structure.

La mise en route et l'utilisation du four THERMIDOR est décrite dans l'IMP 449.

## 5. Précautions opératoires

### 5.1. Qualification du procédé

Le procédé de traitement thermique est considéré comme étant un procédé spécial. Il doit donc faire l'objet d'une qualification client avant d'être mis en œuvre.

Airbus Helicopters et Dassault ont qualifiés notre nouveau four de traitement thermique THERMIDOR. Nous pouvons réaliser des traitements thermiques pour ces deux clients ainsi que leurs sous-traitants de rang 1 (CTRM, LATECOERE...).

### 5.2. Vérifications avant enfournement

La structure de chargement doit être sèche avant enfournement afin d'éviter l'oxydation des pièces qui se traduit par des cloques sur la surface.

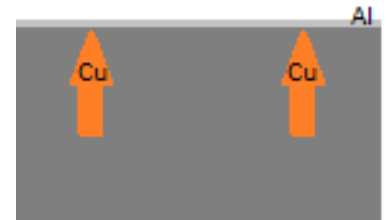
Avant trempe, il faut vérifier la température de l'eau du bain. Celle-ci doit être comprise entre 10 et 30°C pour Dassault et 10 et 40°C pour Airbus Helicopters.

Si les pièces sont accompagnées d'éprouvettes, il est impératif de **joindre au moins une éprouvette par fournée**. Si le nombre d'éprouvettes est insuffisant pour couvrir toutes les fournées, il ne faut pas traiter les pièces et avertir le service Industrialisation ou Qualité. Les éprouvettes devront être placées au milieu des pièces, tout en respectant les consignes du §6.1 Préparation de la charge.

### 5.3. Cas de l'aluminium plaqué

Dans le domaine aéronautique, il existe de nombreuses nuances d'aluminium plaqué, cependant seul le 2024 PL est utilisé chez Fregate Aero. La spécificité de l'aluminium plaqué est qu'il dispose d'une fine couche d'aluminium pur à sa surface (environ 2 à 4% de l'épaisseur de la tôle). Cette couche d'aluminium est destinée à protéger l'alliage de la corrosion durant toute la vie de la pièce.

L'aluminium plaqué nécessite une attention particulière car il devient très sensible lorsqu'on le chauffe au-dessus de 400°C. En effet, il se produit un phénomène de diffusion du cuivre dans le placage qui diminue considérablement la protection anticorrosion.



## 6. Mode opératoire

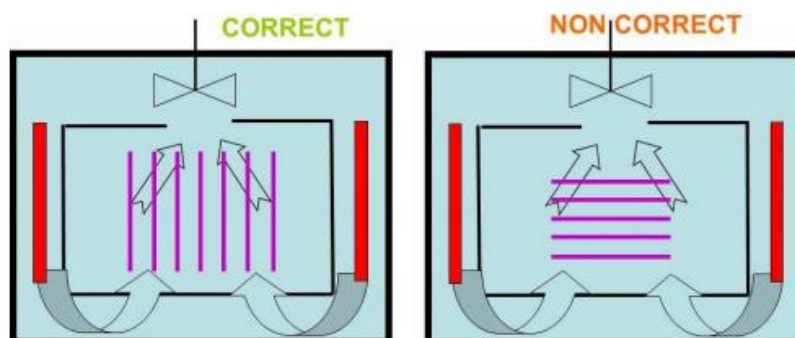
### 6.1. Préparation de la charge

Les pièces à traiter ne devront pas présenter de corps étrangers, de corps gras ou de traces d'humidité, si ce n'est pas le cas, elles devront être dégraissées manuellement ou séchées.

Les pièces d'OF différents doivent avoir sensiblement les mêmes épaisseurs pour être traitées dans la même fournée. Les regroupements d'épaisseur possibles sont décrits dans l'IMP 440 qui regroupe l'ensemble des programmes de traitement disponibles.

La disposition des pièces à l'intérieur du four est également importante. Plusieurs règles doivent être respectées afin de garantir un traitement optimal :

- Il ne faut pas mettre les pièces les unes sur les autres.
- Il ne doit pas y avoir de contact des pièces avec parois et soles du four.
- La répartition des pièces doit être de telle sorte que l'air circule de manière optimisée.
- Les pièces doivent être réparties dans la structure métallique de façon à ne pas créer de déséquilibre et ainsi faire pencher celle-ci d'un côté ou de l'autre.



De plus, dans le cas d'une trempe, les pièces doivent être disposées de façon à optimiser la vitesse de refroidissement et à minimiser les déformations.

### 6.2. Traitement

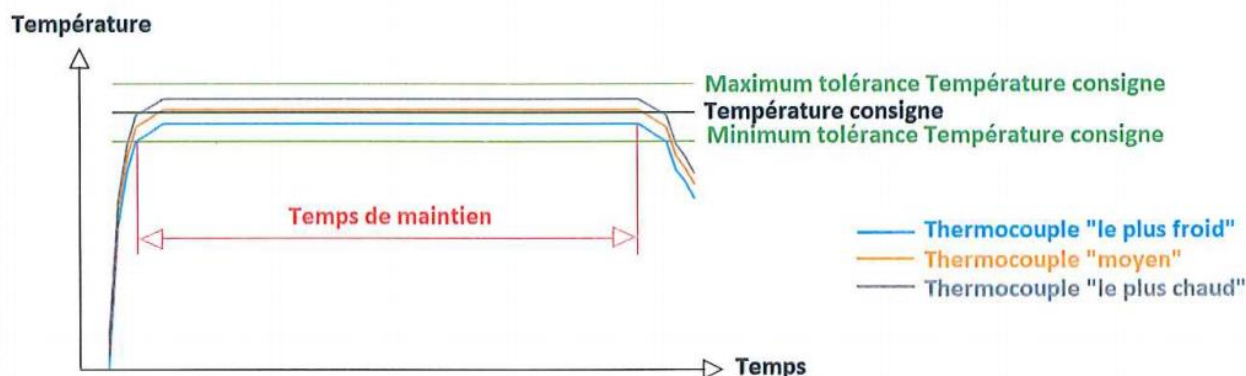
Les pièces doivent être enfournées lorsque le four est à la température du traitement à réaliser. Il est strictement interdit d'enfourner les pièces dans un four à une température supérieure (risque de dépassement en température lors de la fermeture des portes).

Une fois les pièces enfournées, la plage de température de traitement doit être atteinte dans les **30 minutes**. La plage de température de traitement correspond à la température cible à laquelle on ajoute la tolérance. Par exemple, pour un traitement à 495°C +/- 5°C :

- La température de consigne doit être obligatoirement à 495°C (Hors décalage manuel suite au contrôle d'homogénéité)
- Toutefois, la température à l'intérieur du four peut osciller entre 490°C et 500°C.

**⚠** Le décompte du temps de maintien du four Thermidor débute à partir du moment où la **sonde de régulation** atteint la plage de température de traitement. Cette méthode ne répond pas tout à fait à l'exigence de nos clients qui est de débiter le temps de maintien à partir du moment où la **sonde « la plus froide »** atteint la plage de traitement.

Malgré l'homogénéité du four, il est important de vérifier que le temps de maintien soit conforme avant de sortir les pièces du four.



Pour les traitements de trempe, un temps de transfert des pièces entre le four et le bac de trempe doit être respecté. Ce temps débute à l'ouverture des portes du four et s'arrête lorsque les pièces sont totalement immergées dans l'eau du bac de trempe. Ce temps varie selon l'épaisseur des pièces trempées. Le tableau ci-dessous est rappelé sur les FI de traitement thermique des alliages trempants.

Épaisseur e (mm)	Temps de transfert maxi (en s)
$e \leq 0,4$	5
$0,4 < e \leq 0,8$	7
$0,8 < e \leq 2,5$	10
$e > 2,5 *$	15

Si l'on veut conserver la ductilité induite par le traitement de trempe, les pièces doivent être séchées et mises dans une enceinte frigorifique **moins de 15 minutes** après trempe.

Ce délai est inscrit sur l'IMP 271.



### 6.3. Conservation au froid

Afin de retarder la maturation des pièces à l'état de trempe fraîche, il est possible de les stocker dans une enceinte frigorifique.

Les contraintes de qualification et de surveillance de ce type d'équipement étant du plus en plus lourdes et complexes, une nouvelle organisation est mise en place.

Les pièces, une fois trempées, sont stockées dans le congélateur « Pôle Froid » situé à côté du four. Lorsqu'un formeur/plieur/cintreur débute un nouvel OF de pièces à l'état de trempe fraîche, il sort l'OF dans son intégralité. Les pièces qui ne seront pas travaillées **dans l'heure** seront placées dans les petits **congélateurs de travail** situés dans les différents secteurs.

Dans la mesure du possible, les pièces ne devront pas être stockées plus de 24 heures dans les congélateurs de travail.

Le temps maximal de stockage des pièces au froid dépend de la température de stockage. Fregate Aero a fait le choix de pouvoir conserver les pièces jusqu'à 30 jours. La température de stockage ne doit donc jamais être au-dessus de -23°C.

Température de stockage	Alliages	Temps maximal de stockage
de -15° à -18°C inclus	tous	4 jours
de -18° à -21°C inclus	tous	7 jours
de -21° à -23°C inclus	tous	10 jours
de -23° à -30°C inclus	tous	30 jours

### 6.4. Contrôle

Chaque opérateur qualifié est responsable de la conformité des traitements qu'il réalise. Aussi, pour chaque traitement, il faut contrôler la dureté Webster avant et après traitement thermique afin de vérifier que cette caractéristique mécanique désirée a été atteinte.

## 7. Traçabilité

Le traitement thermique étant un procédé spécial, il est obligatoire d'enregistrer l'ensemble des paramètres qui entrent en œuvre lors de sa réalisation.

Certains paramètres sont enregistrés automatiquement (température four, température bac de trempe, temps de maintien, N° du programme sélectionné) toutefois d'autres paramètres doivent être enregistrés manuellement.

Sur l'Ordre de Fabrication, seul le numéro de fournée et la date doivent être notés. Le cahier de fournées (IMP 02) doit être complété ainsi que le suivi de la conservation au froid (IMP 193).

Le suivi de la conservation au froid demande une attention particulière. En effet, ce document doit être rempli de façon rigoureuse lors de la mise au congélateur des pièces et lorsque la dernière pièce de l'OF cesse d'être conservée au froid.



### 8. Qualification opérateur

Les opérateurs doivent être qualifiés via qualification interne du service Qualité avant de pouvoir mettre en œuvre de façon autonome les traitements thermiques.

Cette qualification comprend les phases suivantes :

- Préparation de la charge
- Traitement
- Conservation au froid

### 9. Vérification métrologique du four de traitements thermiques

Le four THERMIDOR fait l'objet d'un suivi métrologique complet, qui sera à terme internalisé pour plus d'autonomie et de flexibilité.

Pour commencer, les appareils tels que l'enregistreur et les régulateurs (température et sécurité process) sont vérifiés tous les mois.

La précision des chaînes pyrométriques est également surveillée. Pour cela, il faut insérer une sonde test à proximité de chaque sonde résidente du four (Régulation, Point chaud et Point Froid) et comparer l'écart de température entre celles-ci.

Pour finir, un contrôle d'homogénéité de température dans le volume du four doit être réalisé tous les 3 mois. Ce contrôle consiste à installer 9 sondes tests dans le four et vérifier qu'elles captent toutes la même température.