

DEMONSTRATEUR ET SYSTEME DE COMMANDE

4.1	Démonstrateur instrumenté de formage superplastique	87
4.1.1	Structure de la presse	88
4.1.2	Matrices disponibles	90
4.2	Mise à jour de la machine	91
4.2.1	Régulation des températures	92
4.2.2	Pilotage des pressions	93
4.2.3	Ordre des opérations.....	94
4.2.4	Vérification du système de commande mis en place sur le démonstrateur.....	95
4.3	Conclusions	95

Le formage superplastique de pièces de forme plus ou moins complexe peut entraîner des sollicitations biaxiales. Dans le cas d'un essai de traction biaxiale (présenté précédemment dans la section 2.1.1.2), la biaxialité X peut être définie comme le rapport des contraintes appliquées dans les deux directions de chargement :

$$X = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad \text{Équation 4.1}$$

Avec : σ_1 et σ_2 les contraintes dans les deux directions de chargement. Pour un gonflement libre, une adaptation de l'expression de la biaxialité X est proposée par Boulos [20]. En supposant que le matériau est homogène et incompressible et qu'il présente une forme sphérique, un repère local $(\vec{m}, \vec{n}, \vec{e})$ peut être défini en tout point P sur le dôme (Figure 4.1). Les vecteurs \vec{m} , \vec{n} et \vec{e} représentent, respectivement, la direction du méridien, la direction normale au méridien et la direction selon l'épaisseur du dôme.

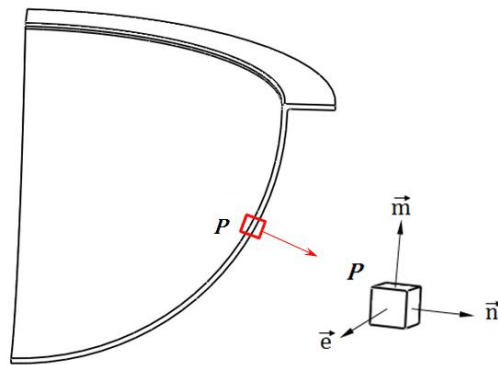


Figure 4.1. Représentation du repère local

Les tenseurs de contraintes $\underline{\underline{\sigma}}^P$ et de vitesses de déformation $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^P$ au point P s'écrivent alors de la manière suivante :

$$\underline{\underline{\sigma}}^P = \begin{vmatrix} \sigma_n & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_e \end{vmatrix} \quad \text{Équation 4.2}$$

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^P = \begin{vmatrix} \dot{\epsilon}_n & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\epsilon}_m & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_e \end{vmatrix} \quad \text{Équation 4.3}$$

la biaxialité X est alors définie comme le rapport entre la contrainte appliquée suivant la direction \vec{n} et la contrainte appliquée suivant la direction \vec{m} , soit :

$$X = \frac{\sigma_n}{\sigma_m} \quad \text{Équation 4.4}$$

Cet état de contrainte biaxial peut entraîner des divergences dans la réponse mécanique du matériau par rapport à celle étudiée dans des conditions uniaxiales. De nombreuses études ont, en effet, montré que l'état de contrainte influe sur l'évolution des cavités [114, 139, 171, 172].

Chan et al. [172] ont, par exemple, trouvé que le taux de cavités augmente significativement lorsque qu'une contrainte biaxiale est appliquée comparée au cas d'une contrainte uniaxiale (Figure 4.2).

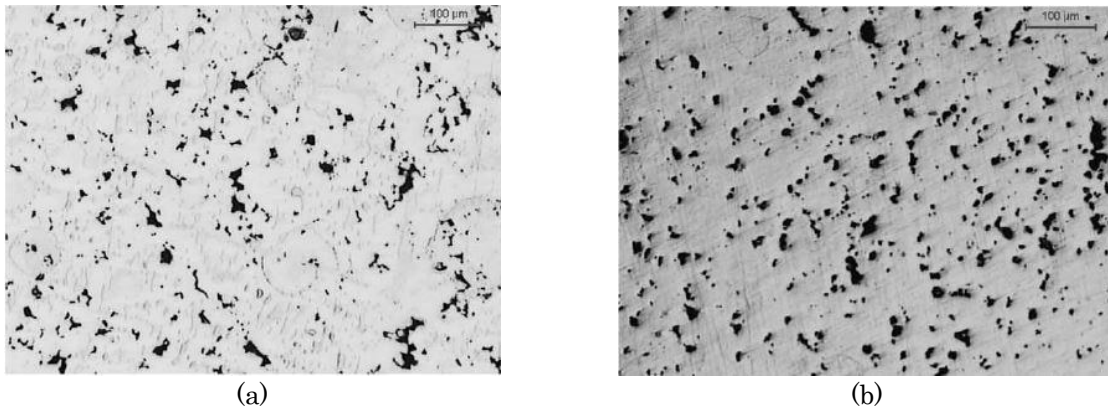


Figure 4.2. Cavitation de l'alliage d'aluminium 5083 à une déformation de 1.0 et sous :
(a) traction uniaxiale et (b) traction biaxiale [172]

Il est donc intéressant de vérifier l'effet de l'état de contrainte sur l'alliage d'aluminium 7475 en réalisant des essais de gonflage libre à l'aide d'un démonstrateur. Le laboratoire LAMPA possède une telle machine : un démonstrateur de formage superplastique a en effet été construit dans le cadre d'une précédente thèse [21] et a été amélioré progressivement [20]. Une description du démonstrateur et du système de commande développé dans le cadre de ces travaux de thèse est présentée dans ce chapitre.

4.1 Démonstrateur instrumenté de formage superplastique

Une description du démonstrateur et du système de commande développé dans le cadre de ces travaux de thèse est présentée dans ce chapitre.

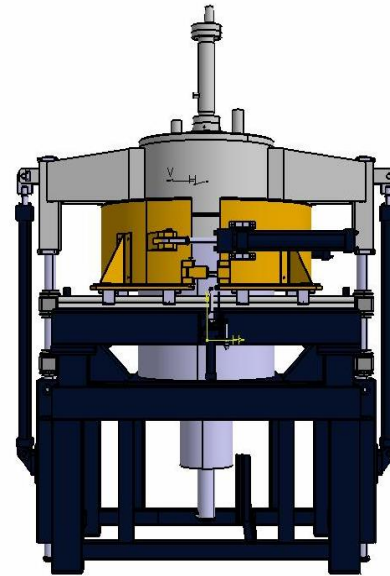
Le démonstrateur instrumenté de formage superplastique disponible au sein du LAMPA est montré en Figure 4.3. Cette presse permet :

- de pincer la périphérie de la tôle entre un serre-flan et une matrice,
- de maintenir l'ensemble de l'outillage et de la pièce à une température quasi-uniforme et stable,

- et d'introduire une différence de pression (pression de formage) entre les deux faces de la tôle.



(a) Photo du démonstrateur



(b) Représentation numérique

Figure 4.3. Démonstrateur présent au LAMPA

4.1.1 Structure de la presse

La presse est équipée d'instrumentations permettant un pilotage de la pression de gonflage à l'aide d'un gaz inerte, l'argon. La pression est réglée soit en fonction de la hauteur du pôle de la pièce soit en fonction de temps de mise en forme. La hauteur du pôle de pièce est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement situé à l'extérieur de la zone chaude (voir la Figure 4.4), L'écart de précision du capteur de déplacement est de $dh/h = 0.3\%$.

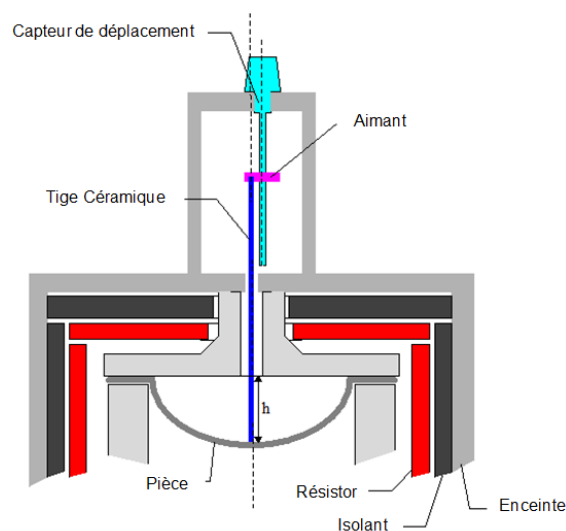


Figure 4.4. Capteur de déplacement [20]

Le démonstrateur est constitué d'un outillage en deux parties placés entre les trois résistors graphites, d'un four à résistances graphite, d'une enceinte isolante refroidie par eau, d'une groupe hydraulique qui se compose essentiellement d'un moteur électrique alimentant deux pompes, d'un système pneumatique qui se compose deux lignes d'alimentations et de trois circuits de pression, et finalement d'un système de pilotage par automate programmable industriel API qui été mis à jour durant mon travail de thèse.

Le four est constitué d'une enceinte isobare à double enveloppe refroidie par eau. Elle comprend (Figure 4.5) :

- L'enceinte inférieure fixe (①) supportant l'outillage inférieur (⑤).
- L'enceinte supérieure mobile (ou cloche) (③) qui est soulevée par deux vérins hydrauliques pour l'ouverture (⑨). Elle supporte l'outillage supérieur (④).
- La fermeture de l'enceinte est assurée par une bride à joint plat et deux mâchoires (②) qui assurent l'étanchéité sous pression.
- Deux index (①) de sécurité garantissent le blocage des mâchoires quand le four est fermé.

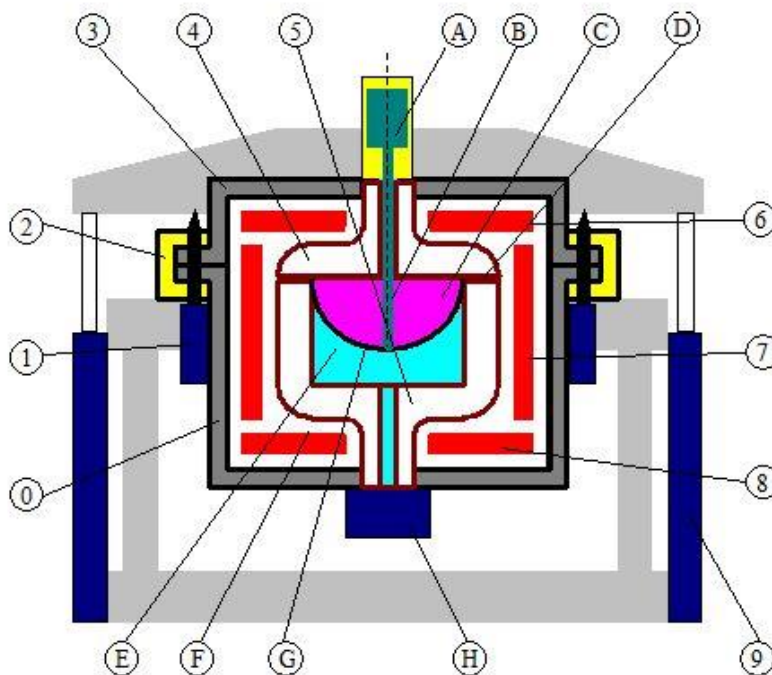


Figure 4.5. Description du four SPF [20]

Les manœuvres des différents éléments mobiles du four, cloche (③), mâchoires (②) et index (①) sont assurées par des vérins hydrauliques. Leurs positions sont transmises au système de contrôle par des capteurs logiques.

L'intérieur de l'enceinte est garni d'un revêtement isolant et réfractaire à base de feutre de carbone. À l'intérieur de ce revêtement, trois résistors en graphite assurent le chauffage du four en trois zones indépendantes :

- Le résistor supérieur ⑥ est situé au-dessus de la matrice supérieure.
- Le résistor latéral ⑦ est situé autour de la matrice inférieure
- Le résistor inférieur ⑧ est situé sous la matrice inférieure.

Les caractéristiques de la machine sont les suivantes : température entre 300°C et 1100°C, pression maximum dans chaque chambre 120 bars, hauteur de mesure du capteur 200mm, dimensions maximum de pièces diamètre 200mm hauteur 200mm, diamètre du flan 290mm.

4.1.2 Matrices disponibles

Des matrices de formes différentes peuvent être insérées dans l'outillage inférieur qui est cylindre à fond plat. Les différentes formes de matrices présentées ci-dessous sont disponibles : sphérique, cylindre à fond plat de faible hauteur, conique évolutive, complexe et en croix (Figure 4.6). La forme évolutive, la forme complexe et celle en croix sont dites à géométrie complexe et sont utilisées pour réaliser des essais plus spécifiques.

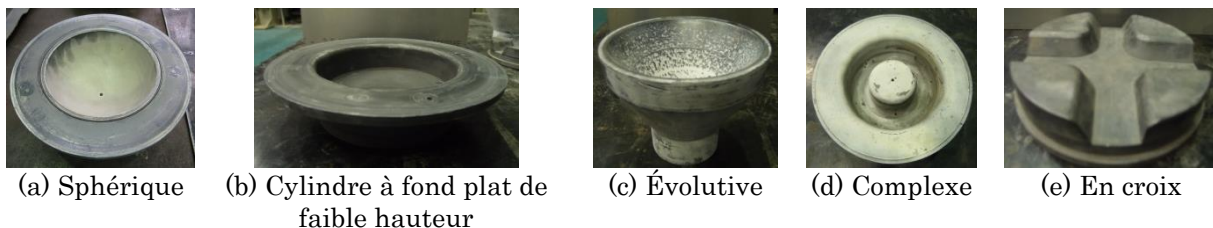


Figure 4.6. Formes disponibles de matrice

Les pièces en forme de dôme sphérique sont réalisées par gonflage libre dans l'outillage inférieur de forme cylindrique à fond plat. C'est le modèle élémentaire du formage par gonflage, sa forme est limitée à une demi-sphère en permettant de sortir la pièce facilement de la matrice et en réduisant le contact de la pièce à la matrice. Il est utilisé pour l'identification des paramètres superplastiques par les essais de gonflage à pression constante ou à une hauteur fixée au pôle. Dans ce cas, l'arrêt du gonflage est piloté par le capteur de hauteur de la pièce.

La matrice sphérique (Figure 4.6.a) est utilisée pour garantir la forme en demi-sphère.

Le cylindre à fond plat de faible hauteur (Figure 4.6.b) est une matrice axisymétrique qui permet l'extraction d'éprouvettes plates dont la déformation

est à peu près uniforme, ces éprouvettes sont utilisées pour la caractérisation des alliages après formage [21].

La matrice évolutive (Figure 4.6.c) est une matrice dont l'angle de paroi par rapport à l'axe de symétrie évolue en fonction de la hauteur. Cette matrice peut obtenir une contrainte équivalente au pôle plus constante par une pression de formage constante que le tronc de cône. Elle est bien adaptée à la caractérisation des alliages superplastiques qui ont un coefficient d'écoulement n faible [20].

La matrice complexe (Figure 4.6.d) et la matrice en croix (Figure 4.6.e) permettent d'étudier les interactions de contact entre le flan et la matrice. La complexité de la matrice en croix est située aux rayons faibles d'arêtes qui provoquent la localisation de la déformation et de l'endommagement [2].

4.2 Mise à jour de la machine

Le démonstrateur instrumenté de formage superplastique est une machine destinée au formage des tôles par gonflage à haute température et à faible vitesse. Un premier démonstrateur avait été développé par M. Reszka et S. Boude [21] pour le formage de pièces de diamètre de 140mm et de hauteur de 200mm avec les tôles d'épaisseur 1 à 4 mm, à une plage de température entre 300 et 700°C et à une pression maximale de 40 bars. Le démonstrateur utilisé actuellement a été développé par Boude et Boulos [20] pour augmenter la capacité de travail en température jusqu'à 1100°C et en pression de de formage maximale de 120 bars.

Boulos a également proposé une stratégie de pilotage à pression constante. Basé sur les essais réalisés sur cette presse, Aoura [2] a proposé une procédure de caractérisation rhéologique du matériau pour cette machine et une nouvelle procédure de l'optimisation de la pression. Robert [15] a étudié les différentes stratégies de l'optimisation de la pression et les a validées par des essais sur ce démonstrateur.

Le processus de formage superplastique par gonflage est un processus séquentiel complexe. La difficulté du contrôle du processus tient aux régulations des pressions et des températures. En conséquence, un grand nombre de paramètres de la stratégie de régulation sont concernés pour détecter les états de la machine et d'électrovannes qui régulent l'évolution de pression et le chauffage. L'automate programmable EURO THERM et le logiciel WIZCON qui équipaient le démonstrateur à l'origine, ont été remplacés par un automate Vision 1210 (Automate Couleur Tactile 12,1") de la marque PL Systems fourni par UNITRONICS afin de réaliser le procédé de gonflage manuellement et automatiquement.

Cet automate est supervisé par le logiciel Visilogic qui peut à la fois réguler les opérations et contrôler les paramètres sur les menus conçus spécifiquement en un écran tactile. Les informations de guidage d'opération et d'alerte de système sont aussi présentées sur cet écran tactile. Le nouveau système est convivial au niveau de la programmation, de l'installation, de la mise en œuvre et de l'entretien. Nous vous présentons, ensuite, les trois aspects du pilotage de l'opération de formage, i.e. la régulation des températures, le pilotage des pressions et l'ordre des opérations.

4.2.1 Régulation des températures

La température de formage doit être homogène et constante au cours du formage, cet objectif demande une température uniforme dans l'enceinte du four. Trois zones de chauffe, situées respectivement latéralement, en haut et en bas de l'outillage, sont régulées indépendamment. Les deux zones en haut et en bas de l'outillage sont pour compenser la perte importante de chaleur par conduction causée par le refroidissement des pieds de l'outillage par un circuit d'eau. La troisième a une puissance suffisante pour amener la température de l'outillage à 1100°C et compenser la perte de chaleur.

Les chauffages de ces trois zones de chauffe sont contrôlés respectivement par trois régulateurs à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (proportional-integral-derivative, PID). La consigne est la même pour les trois zones.

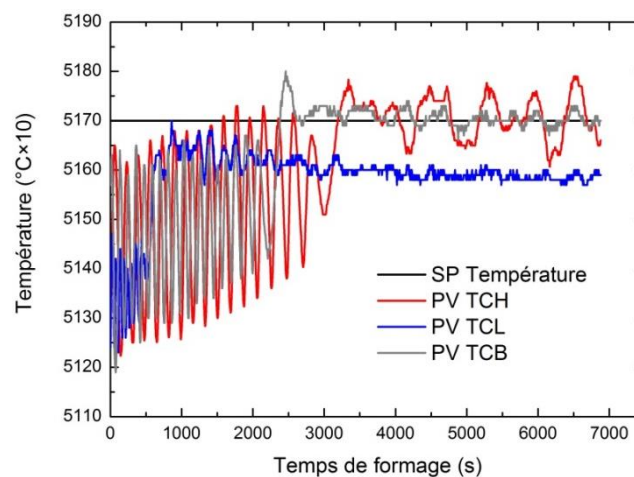


Figure 4.7. Évolution des températures au cours d'un formage

Une évolution des températures au cours d'un formage est présentée sur la Figure 4.7. La SP température est la température de consigne, 517°C dans ce cas. Les PV TCL, PV TCH et PV TCB sont respectivement les températures de la zone latérale, de la zone haute et de la zone basse de l'outillage. Une variation maximale de 5°C a été trouvée au début de formage. Pour équilibrer la condition de formage, un temps d'attente de 40 minutes avant le formage est recommandé

pour obtenir une variation de 1°C qui n'influence pas trop le comportement de matériau.

Le cycle de gonflage commence après que les trois températures mesurées aient atteint à une plage entourant (99% pour notre cas) la valeur de consigne et un temps d'attente recommandé, si le système de refroidissement fonctionne normalement.

4.2.2 Pilotage des pressions

Le cycle de la pression est réalisé, soit en fonction du temps de formage, soit en fonction de la hauteur du pôle de la pièce déformée. L'une de ces deux configurations est choisie par l'utilisateur ou en fonction de la forme de pièce. En effet, le pilotage en fonction de la hauteur n'est utilisable que pour les pièces dont le pôle est en formage libre durant tout l'essai. En revanche, le pilotage en fonction du temps de formage peut être utilisé pour tous les cas, où le cycle de pression en fonction du temps est bien défini.

Pour la presse présentée, la pression de mise en forme est la différence entre la pression de formage (PF) et la contrepression (PH). La PF est appliquée sur la surface supérieure de la tôle et la PH sur la surface inférieure de la tôle. La PH est souvent nécessaire pour éviter le développement du phénomène de cavitation, notamment pour les alliages d'aluminium. Une pression d'enceinte (PE), appliquée sur les faces extérieures de l'outillage, renforce la force de fermeture et évite sa déformation par fluage à chaud. Ces trois pressions sont régulées indépendamment mais pilotées suivant le même mode, i.e. soit en fonction du temps, soit en fonction de la hauteur.

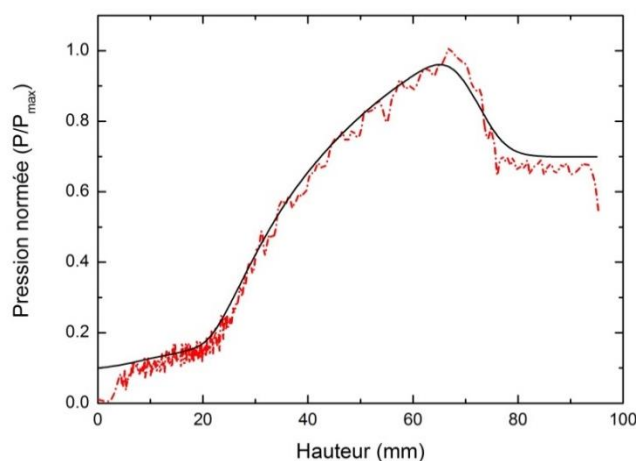


Figure 4.8. Évolution de la pression de formage en fonction de la hauteur au pôle de pièce. La ligne noire est la pression consignée

Les deux pilotages sont réalisés avec l'algorithme linéaire et incrémentale. L'un de ces tests est montré sur la Figure 4.8. La pression est normée sur la pression maximale. La Figure 4.8 montre que, la pression obtenue suit bien la valeur consignée, avec des oscillations légères. Ces oscillations légères sont entraînées par deux régulations indépendantes pour ces deux pressions (PF et PH).

4.2.3 Ordre des opérations

Le procédé de mise en forme par gonflage est un cycle qui nécessite plusieurs opérations. Elles sont exécutées dans l'ordre suivant : ouverture du four, chargement de la pièce, fermeture du four, mise à vide, chauffe du four, remplissage des différentes chambres en pression, exécution du cycle de formage, équilibrage et dégonflage de l'outillage et de l'enceinte, refroidissement du four, purge à la pression atmosphérique, ouverture du four et déchargement de la pièce.

Le Grafcet est un mode de représentation et d'analyse d'un automatisme, particulièrement bien adapté aux systèmes à évolution séquentielle, c'est-à-dire décomposable en étapes. Le Grafcet principal et le sous-Grafcet d'ouverture du four sont présentés sur la Figure 4.9. Les abréviations (VGH, VGE, VMO, etc.) sont les actions des électrovannes et des capteurs de contact (détaillés dans la thèse de Boulos [20]).

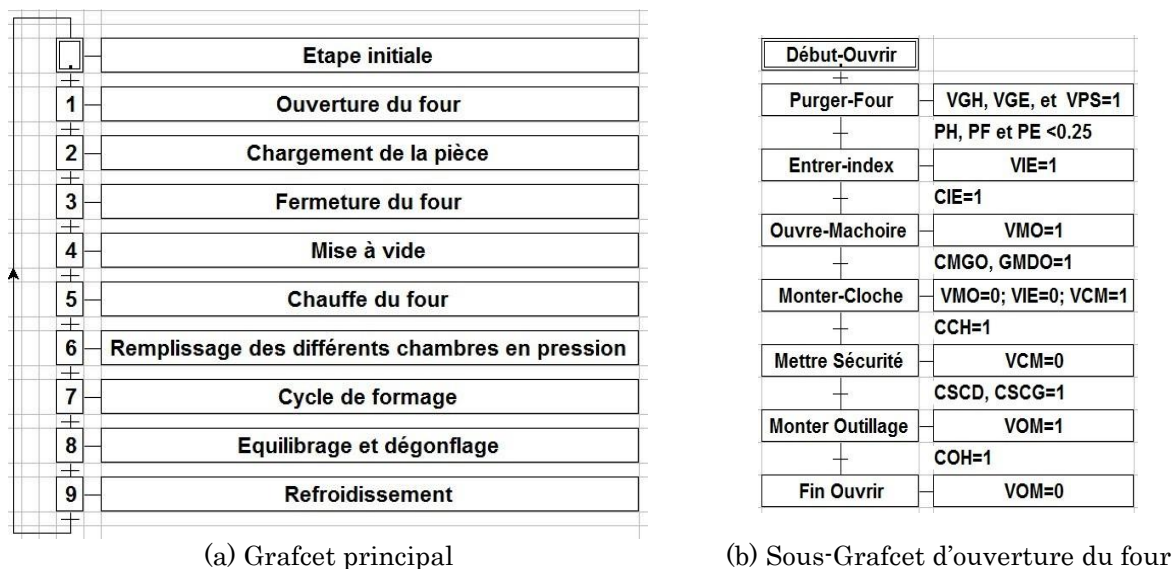


Figure 4.9. Grafcets de pilotage de la presse

4.2.4 Vérification du système de commande mis en place sur le démonstrateur

Afin de vérifier que le système de commande mis en place fonctionne correctement, un essai de gonflage libre sur un alliage test (Al7475) d'une épaisseur de 2mm a été réalisé. La température du four a été fixée à 517°C et un pilotage en hauteur a été utilisé. La Figure 4.10 montre la pièce obtenue. Une épaisseur de 1.1mm à la hauteur du pôle de 85mm était attendue (d'après des simulations numériques préalables sous Forge 2009), ce qui a été retrouvée expérimentalement.



Figure 4.10. Pièce test obtenue en utilisant le démonstrateur superplastique du LAMPA

4.3 Conclusions

Le système de commande d'un démonstrateur de formage superplastique a été mis au point afin de permettre l'automatisation du procédé. Il est ainsi possible de réaliser des pièces de forme plus ou moins complexe en introduisant au préalable la loi de pression adéquate. Depuis sa remise à jour, le démonstrateur a été utilisé à plusieurs reprises pour le formage de pièces dans le cadre d'études industrielles. La détermination de la loi de pression nécessite la mise au point de simulations numériques, point abordé dans le chapitre suivant. Il n'a malheureusement pas pu être réalisé des essais afin de caractériser l'influence d'une sollicitation multiaxiale sur la réponse mécanique (comportement comme endommagement) de l'alliage d'aluminium 7475. Cela sera l'objet d'études futures.

