

## CHAPITRE 3

### ACTIONNEURS EN ALLIAGE TINI À MÉMOIRE DE FORME

Le principe de notre système intelligent consiste à identifier un défaut ou un problème à l'aide d'un capteur en AMF comme il a été décrit dans le chapitre précédent. Suite à cette détection, un système composé de fils AMF est actionné pour limiter ou arrêter les dommages. Une vérification ultérieure des problèmes ou des défauts assure l'intégrité de la structure composite tandis que l'activation mécanique des AMF permet d'en assurer sa sécurité. Ce chapitre met donc l'emphase sur l'activation mécanique des alliages à mémoire de forme destinés à être intégrés dans les composites.

#### 3.1 Génération de contrainte par les fils AMF

##### Choix des fils AMF

Les AMF peuvent générer d'importantes contraintes au chauffage grâce à leur transformation de phase inverse. Beaucoup de facteurs influencent la génération de contrainte au chauffage. L'optimisation du traitement thermique, la composition chimique et le travail à froid de l'AMF en sont les principaux.

En plus de ces facteurs, la grosseur du fil est un des facteurs les plus déterminants dans le choix final du matériau. Le diamètre du fil ne doit pas être trop élevé pour ne pas créer de concentrateurs de contrainte lors de l'intégration dans des composites. Par contre, la force générée est proportionnelle à la section du fil. Un fil de NiTi de 0,4 mm de diamètre, fourni par la compagnie Special Metals (NY, USA) a finalement été retenu. À la suite d'un traitement thermique de 550 °C pendant une heure et suivi d'une trempe à l'eau froide, l'échantillon se trouve biphasé à température ambiante. Les températures de transformation sont obtenues après un balayage en température à l'aide d'un essai de DSC (figure 30). La méthodologie est identique à celle utilisée au chapitre 2 pour le test de DSC.

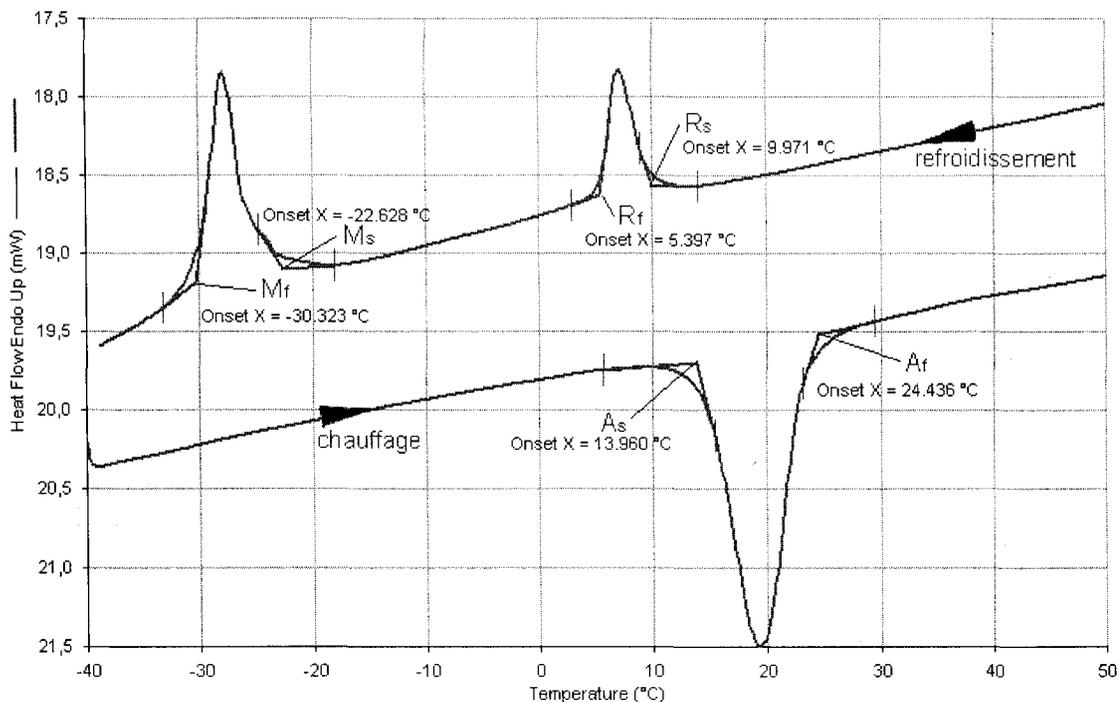


Figure 30 DSC du fil AMF de 0,4 mm de diamètre

Même avec la présence d'austénite à température ambiante et à contrainte nulle, ces fils génèrent de hautes contraintes une fois déformés, encastrés et chauffés. Une fois déformés en martensite orientée ou en phase R, les fils sont déchargés avant d'être intégrés dans les composites. Si la température  $A_r$  est en dessous de la température ambiante, toute la martensite orientée ou la phase R retournera en austénite lorsque la charge sera enlevée. Cet état de la structure ne permet aucune génération de contrainte. Par contre, l'échantillon utilisé a une température de fin de transformation austénitique assez élevée pour permettre la génération de contrainte.

### 3.2 Caractéristiques des tests de récupération de contrainte

Bien que le but recherché ne soit pas l'optimisation des conditions d'utilisation des fils AMF, quelques tests sont nécessaires pour fixer les limites de leur utilisation. L'information trouvée permettra de bien contrôler l'activation une fois les alliages intégrés dans le composite. Les tests de récupération de contrainte se font sur la machine de traction Enduratec avec le même montage que celui utilisé au chapitre 2, à

l'exception de l'ajout d'une enceinte thermique ou du branchement d'une source de puissance pour la génération de contrainte. La procédure générale consiste à préparer le fil avec le bon traitement thermique tel qu'indiqué à la section 3.1 et de l'installer entre les mors de l'appareil de traction. Une fois le programme exécuté, l'appareil impose une certaine déformation au fil. La charge est ensuite relâchée (ou non) avant l'élévation de température qui permet d'augmenter la contrainte dans le fil. Les étapes de ce test sont présentées à la figure 31.

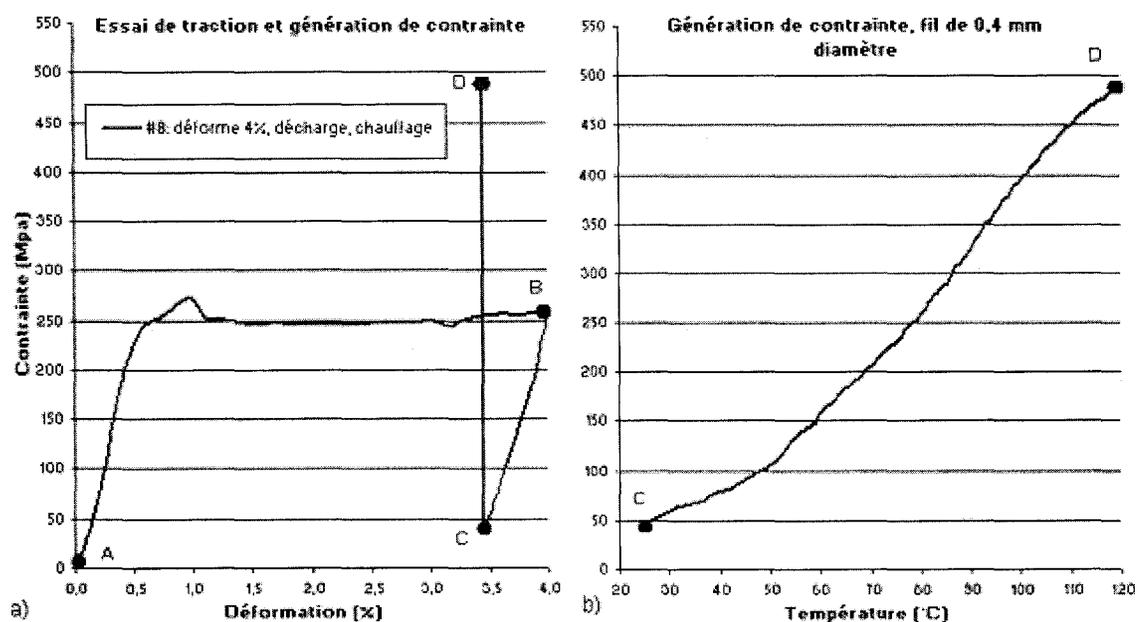


Figure 31 Génération de contrainte sur un fil d'AMF de 0,4 mm de diamètre a) échelle contrainte déformation b) échelle contrainte température

Sur la figure 31 a), la courbe située entre le point A et le point B représente une déformation en phase R ou en martensite orientée. Cela s'explique par le long plateau de transformation. Du point B au point C, le fil est déchargé. À cette étape-ci, l'échantillon serait prêt à être intégré dans le composite pour une activation ultérieure. On constate aussi qu'à la température ambiante il n'y a pas de superélasticité, mais bien un comportement de style "mémoire de forme" caractérisé par un retour pseudo élastique. Maintenant que tous les déplacements sont bloqués, l'augmentation de température est réalisée par une enceinte thermique. L'évolution de la contrainte en

fonction de la température est représentée sur la Figure 31 b). L'enceinte thermique permet un maximum de 120 °C. À cette température, l'échantillon a généré 490 MPa avec une très légère déformation plastique à la fin du cycle qui ne peut pas être observée sur ces courbes.

#### Influence de la déformation initiale

Brailovski et al. [15] affirme qu'une augmentation de la déformation initiale mène à une génération de contrainte plus élevée. Cet accroissement est relié au pourcentage de la martensite orientée, obtenu par déformation. Plus il est élevé, plus la contrainte générée sera importante. Une expérience est faite pour vérifier si une contrainte plus élevée à une température fixe peut être atteinte en variant la déformation initiale du fil. La température d'activation est fixée à 110 °C pour ne pas dégrader la résine du composite, mais aussi, pour limiter la puissance à injecter dans le système. La figure 32 présente la valeur de la contrainte générée à une température de 110 °C pour différentes déformations.

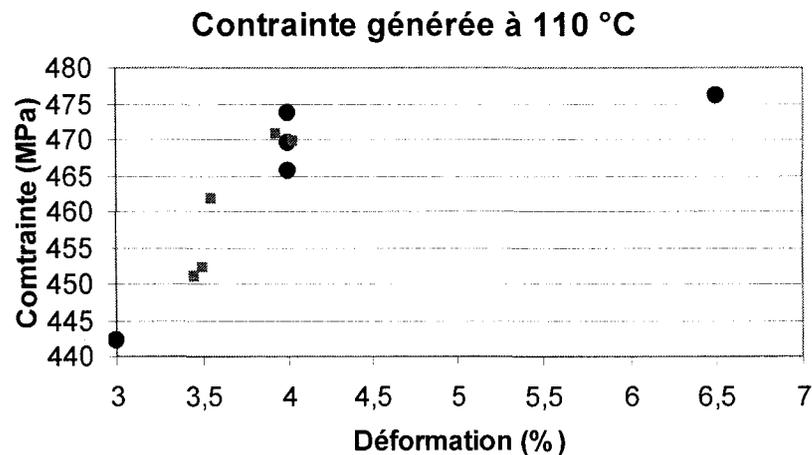


Figure 32 Génération de contrainte à 110 °C pour différentes déformations

Puisque dans cette expérience la température d'activation est fixe, l'augmentation de la contrainte générée en fonction de la déformation initiale est très faible. En théorie, les grands écarts de contrainte se remarquent à plus haute température. Cependant, avec l'alliage et le traitement thermique utilisé, l'augmentation de la température enclenche le mécanisme de déformation plastique standard qui fait intervenir les dislocations du

matériau. La limite d'écoulement du matériau devient le mécanisme prioritaire à la redistribution d'énergie. Le mécanisme de transformation de phase qui est à la base de la génération de contrainte n'a donc pas lieu si la température augmente. Avec un AMF optimisé, il est possible de générer une contrainte aussi élevée que 1000 MPa [18]. Par contre, il faut se rappeler qu'une activation trop puissante peut briser le composite et arracher les fils. Dans ce cas, la déformation à 4 % produisant environ 470 MPa à 110°C devient la valeur utilisée dans les tests subséquents. Une déformation de 4% permet à l'AMF de s'allonger sans se déformer plastiquement. De plus, comme montrée au chapitre 2, une déformation de 4 % correspond exactement à la moitié de la plage linéaire caractérisée par un facteur de jauge  $G \approx 5$ . Encore une fois, un travail important d'optimisation des conditions d'utilisation de l'alliage doit être fait pour arriver à la meilleure solution en fonction de l'application réelle du matériau.

#### Influence de l'encastrement

Le choix de la déformation initiale a été fixé à 4 % pour les raisons décrites dans le paragraphe précédent. Pour notre application, deux méthodes peuvent être sélectionnées. La première consiste à appliquer une déformation de  $\varepsilon = 4 \%$ , un déchargement d'environ  $\varepsilon = 3,5 \%$  et ensuite un chauffage (figure 31). La deuxième méthode consiste à appliquer une déformation de  $\varepsilon = 4 \%$  suivi d'un chauffage sans déchargement (figure 33).

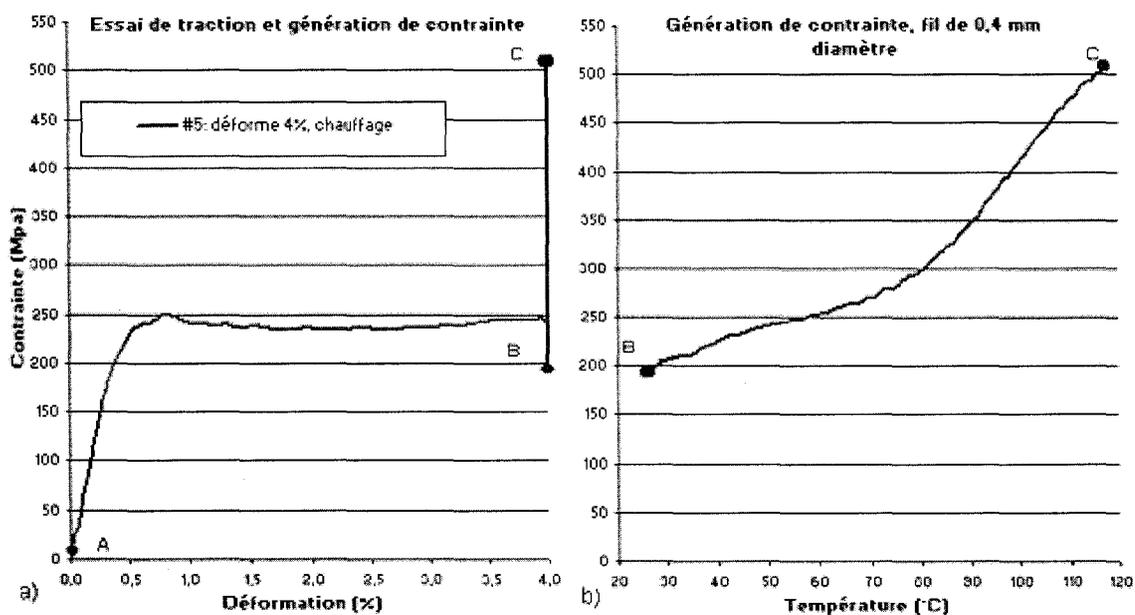


Figure 33 Génération de contrainte sans déchargement : a) échelle contrainte déformation, b) échelle contrainte température

À la figure 32, certains échantillons sont déformés  $\varepsilon = 4\%$  puis chauffés (représentés par des points). Les autres sont déformés et déchargés à  $\varepsilon = 4\%$  avant d'être chauffés (représentés par des carrés). Ce test ne montre aucune différence au niveau de la contrainte générée. Par contre, une contrainte de compression permanente peut être bénéfique dans notre système. Le plateau de chargement de la figure 33 a) montre que la contrainte de compression se trouve tout juste en dessous de 250 MPa. Dans le cas où les fils sont placés dans des zones fortement sollicitées ou proches des endroits où il y a des concentrations de contraintes, une force de compression permanente à ces endroits ne peut qu'être bénéfique. Donc, la solution qui intègre les fils précontraints dans la structure de composite est préférable. Dans les tests expérimentaux du chapitre 5 et la simulation du chapitre 6, la précontrainte (avant l'activation) est approximativement 100 MPa.

### 3.3 Contrôle de la température pour l'activation

À l'intérieur d'un four, la température d'un fil est facilement contrôlable. Par contre, cette température est plus difficile à connaître lorsque les fils sont chauffés par effet Joule. Si

un courant électrique ( $I$ ) traverse un fil conducteur de résistance ( $R$ ), une puissance ( $P$ ) est alors créée en respectant l'équation suivante :

$$P = RI^2 \quad (3.1)$$

Les unités de la puissance sont des joules par seconde ou des Watts. La puissance se dissipe en chaleur. L'élévation de la température peut ensuite être mesurée à l'aide d'un thermocouple collé sur la surface du fil. Une pâte conductrice thermique est nécessaire pour favoriser l'échange de chaleur et isoler électriquement le thermocouple. Par contre, l'erreur de mesure de ce type de montage est très grande. La lecture se résume à une moyenne entre la température ambiante et celle du fil. Donc, plus la température du fil est élevée, plus l'erreur est grande.

Néanmoins, l'utilisation d'un thermocouple est envisagée pour mesurer la température des fils AMF de la structure de composite hybride. Ce problème de lecture se résout en utilisant un facteur de correction permettant de relier la température du thermocouple à la vraie température du fil. La méthode utilisée consiste à comparer le test d'activation par effet Joule au test d'activation réalisé à l'aide de l'enceinte thermique. La figure 34 présente le facteur reliant la température du thermocouple à la température du four en se basant sur la valeur de la contrainte.

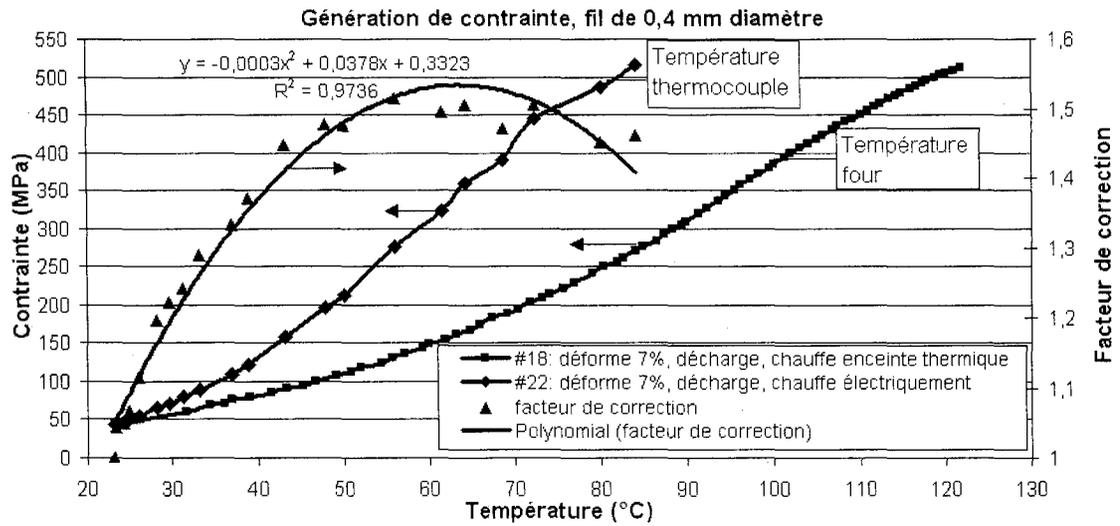


Figure 34 Relation entre la température du thermocouple et de l'enceinte thermique

Cette méthode suppose que la valeur de la contrainte générée par le fil est la même, peu importe la façon de chauffer l'échantillon (avec la même vitesse de chauffage). Cette hypothèse est validée en partie, puisque l'allure de la courbe #18 (lecture de température sur l'enceinte thermique) ressemble à celles de la courbe #22 (lecture de température à l'aide d'un thermocouple et chauffage par effet Joule).

Pour une valeur de contrainte, deux températures sont lues. Le facteur de correction se trouve en divisant la température du four par la température du thermocouple. Cette division est appliquée pour toutes les températures obtenues à l'aide du thermocouple. Ensuite, une courbe polynomiale du second degré donne une approximation de ce résultat. Finalement, la vraie température du fil est obtenue par l'équation suivante :

$$T_{fil} = -0,0003(T_{ic})^3 + 0,0378(T_{ic})^2 + 0,3323(T_{ic}) \quad (3.2)$$

Pour trouver la température du thermocouple en fonction de la température réelle du fil, la même procédure est utilisée, donnant l'équation suivante:

$$T_{ic} = 7 * 10^{-5}(T_{fil})^3 - 0,0124(T_{fil})^2 + 1,2059(T_{fil}) \quad (3.3)$$

Pour l'étude, la température est fixée à 110 °C pour générer environ 470 MPa. La lecture du thermocouple devra alors être d'environ 75 °C.

### 3.4 Puissance électrique nécessaire pour l'activation du système

Il existe un autre paramètre de conception très important à connaître. Il s'agit de la puissance nécessaire pour chauffer le ou les fils à 110 °C. Cette puissance dépend des propriétés thermiques, des propriétés physiques du matériau et des échanges de chaleur avec le milieu environnant. Le calcul théorique à l'aide des concepts de transfert de chaleur est facile à réaliser pour un fil dans les conditions de convection naturelle. Cependant, les choses se compliquent rapidement lorsqu'on vient insérer ces mêmes fils dans une structure de composite. La large surface et la bonne conductibilité thermique des fibres de carbone agissent comme échangeur de chaleur. Donc, la puissance nécessaire pour chauffer les fils devrait être plus importante. Par contre, la résine du composite est un bon isolant thermique. Le tableau VI présente la puissance nécessaire pour chauffer une longueur de fil en convection libre et la puissance nécessaire à chauffer un fil encastré dans le composite, tous deux en fonction de leur longueur. Les données expérimentales sont prises avec une source de puissance, un multimètre et un thermocouple.

Tableau VI

Puissance nécessaire à chauffer un fil à 110 °C

	Puissance linéaire nécessaire à chauffer un fil jusqu'à 110 °C en fonction de sa longueur (l) pour un diamètre de 0,4 mm (W/mm)
Convection libre	0,0103
Inséré dans le composite	0,0024

Les résultats montrent que le composite agit comme un isolant comparativement à la convection libre du fil. Pour une même longueur de fil, il faut environ quatre fois moins de puissance pour chauffer le fil intégré dans le composite. Il est à noter que la mesure

de puissance du fil intégré est prise parmi un groupe de fils. Ces données sont une approximation grossière puisque le coefficient de transfert de chaleur change rapidement en fonction de l'environnement. L'exemple suivant présente les calculs pour trouver le voltage et le courant nécessaire à injecter pour chauffer par effet Joule dans un échantillon de composite hybride. Les spécifications de la figure 35 sont les vraies valeurs des échantillons dont les explications relatives à la fabrication seront faites au prochain chapitre.

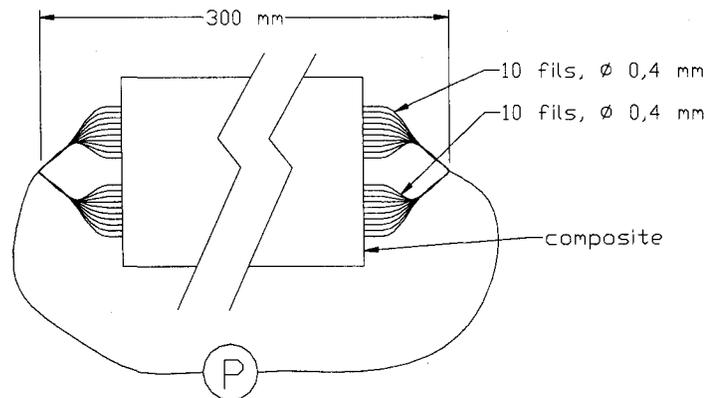


Figure 35 Montage électrique pour le chauffage par effet Joule

En utilisant le résultat du Tableau VI et les spécifications de l'éprouvette précédente, la puissance électrique est calculée comme suit :

$$P = 0,0024 (W / mm) * 300 (mm) * 20 (fils) = \underline{14,4 W} \quad (3.3)$$

Dans notre application, la résistivité électrique de l'AMF sous contrainte en phase austénitique est d'environ  $140 * 10^{-5} \Omega \cdot mm$ . La résistance du fil est donc :

$$R = \rho \frac{l}{s} = 140 * 10^{-5} * \frac{300}{\left( \frac{\pi * 0,4^2}{4} \right)} = 3,34 \Omega \quad (3.4)$$

La résistance équivalente du circuit parallèle est :

$$R_{eqv.} = \frac{1}{\left(20 * \frac{1}{3,34}\right)} = 0,167 \Omega \quad (3.5)$$

Nous trouvons ensuite le courant traversant le système en utilisant la formule (3.1) :

$$I = \sqrt{\frac{P}{R_{eqv.}}} = \sqrt{\frac{14.4}{0,167}} = \underline{9,3 A} \quad (3.6)$$

Finalement avec la loi d'Ohm on trouve le voltage du circuit :

$$V = R_{eqv.} * I = 0,167 * 9,3 = \underline{1,55 V} \quad (3.7)$$

Donc, les éprouvettes absorberont environ 14.4 watts, c'est-à-dire 1.55 volt et 9.3 ampères afin de générer une contrainte de compression de 470 MPa à une température de 110 °C. Avec les valeurs et les formules de base, une approximation rapide permet de trouver la puissance à injecter dans le système pour la génération de contrainte. Avec une configuration en parallèle (figure 35), l'augmentation du nombre de fils fait augmenter le courant du système, tandis que le voltage demeura dans un ordre de grandeur respectable. Pour un même type d'intégration avec un montage en série, l'effet contraire est observé : plus la longueur du fil est grande, plus le voltage sera élevé. Dans les deux cas, la puissance nécessaire pour faire chauffer les fils reste acceptable. Cependant, si le système complet devient plus gros, des difficultés techniques seront à envisager pour l'obtention de haut courant ou de haut voltage.

Enfin, beaucoup de travail d'optimisation sur les AMF sera nécessaire pour garantir le meilleur fonctionnement. Plusieurs aspects restent à être testés et validés pour une multitude de conditions d'utilisation.