

a. Prototypes OVMI à liaisons souples

Le corps est la pièce principale du prototype et se compose de différentes parties (figure 5.7) qui requièrent des propriétés mécaniques variées et donc des géométries différentes. En effet, la membrane doit être très souple et donc assez fine et les liaisons ont pour leur part une épaisseur calibrée afin d'optimiser la transmission du mouvement. Enfin, le thorax doit être plus rigide que le reste du corps sachant qu'il sera, lors du montage, renforcé par le support.

Le procédé de fabrication d'un thorax comporte 5 couches de SU-8 d'épaisseurs différentes (voir tableau 5.1), avec pour chaque couche un des masques présenté à la figure 5.9. Ainsi, on obtient comme épaisseurs respectives 3 μm pour la membrane, 37 à 55 μm pour les veines et les liaisons, entre 70 et 85 μm pour le bord d'attaque et de 130 à 225 μm pour le thorax. Les étapes présentées précédemment dans la partie 5.1.a sont donc répétées 5 fois par procédé pour obtenir un thorax complet.

Rappelons qu'une étape est ajoutée avant la première enduction de résine afin de libérer la structure : le substrat est recouvert d'une couche sacrificielle constituée d'Omnicoat[®]. Cela permet d'intercaler une couche sacrificielle entre le silicium et la SU-8, qui sert en la solubilisant à libérer la structure de son support.

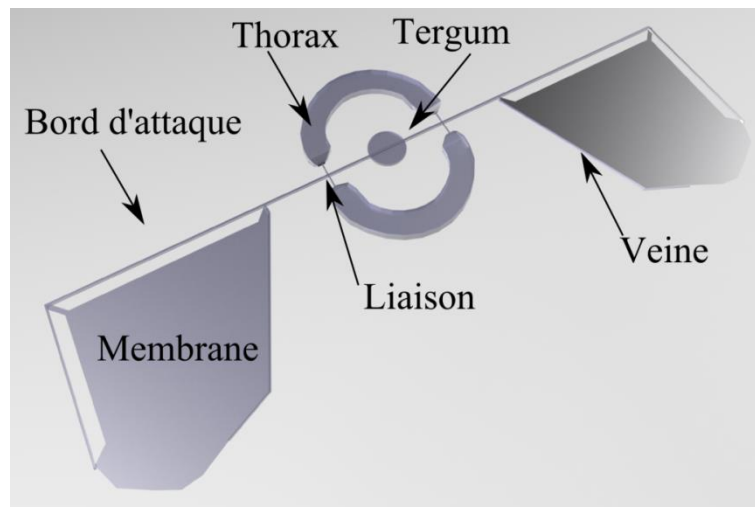


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..1: Vue globale du thorax et de ses différents composants

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..1: Recette de fabrication du thorax par photolithographie (rpm: tour par minute)

Étapes	Résine	Enduction [rpm/rpm.s ⁻¹ /s]	Recuit	Insolation (mJ.cm ⁻²)	Recuit	Développement	Épaisseur (μm)
0	Omnicoat	500/100/5 1000/1000/30	1 min, 200°C	0	0	0	0,2
1	SU-8	500/100/5	1 min, 65°C	105	1 min, 65°C	15 sec	3

	2002	1000/1000/30	2 min, 95°C		1 min, 95°C		
2	SU-8	500/100/5	2 min, 65°C	250	1 min, 65°C	0	37
	2035	3500/1000/30	5 min, 95°C		3 min, 95°C		
3	SU-8	500/100/5	2 min, 65°C	250	1 min, 65°C	0	40
	2035	3300/1000/30	5 min, 95°C		3 min, 95°C		
4	SU-8	500/100/5	2 min, 65°C	250	1 min, 65°C	0	50
	2035	3000/1000/30	5 min, 95°C		3 min, 95°C		
5	SU-8	500/100/5	8 min, 65°C	420	3 min, 65°C	10 min	100
	2075	2125/1000/30	20 min, 95°C		10 min, 95°C		

En remplaçant l'aluminium dont une épaisseur de 300 nm était auparavant déposée par pulvérisation cathodique radio fréquence [76], la couche d'Omnicoat allège le processus qui ne nécessite plus l'utilisation d'une machine de dépôt de couches minces mais uniquement de la photolithographie standard. De plus, cela accélère notablement la libération des structures qui passe de 8 heures auparavant avec l'aluminium à 2 heures maintenant.

Lorsque la couche d'Omnicoat est recuite, le dépôt de la première couche de SU-8 peut être effectué (figure 5.11). Cette première couche de 3 μm déposée constitue la membrane des ailes. Une attention particulière est portée sur les contraintes thermiques résiduelles dues aux gradients de température lors des cuissons. En effet, un gradient de température trop important cause l'enroulement des membranes sur elles-mêmes. Pour réduire au maximum ces contraintes thermiques, une plaque SAWATEC permettant de programmer des rampes de température est utilisée pour l'ensemble des recuits. Ainsi, les montées en température se font à une vitesse de $3^\circ.\text{min}^{-1}$ et la redescente en température à $1^\circ.\text{min}^{-1}$ (figure 5.8).

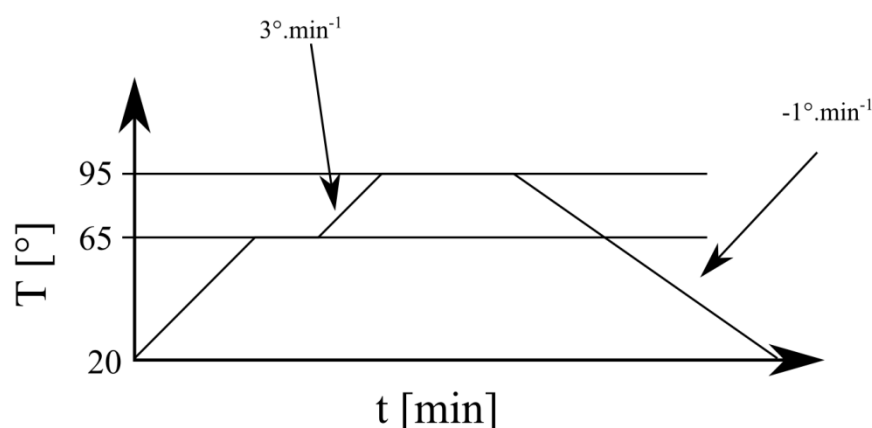


Figure 2: Profil du recuit de la SU-8 pour les membranes : les montées en températures se font à $3^\circ.\text{min}^{-1}$ et la redescente à $1^\circ.\text{min}^{-1}$.

Après le recuit, cette première couche sera développée pour permettre l'alignement des suivantes. L'alignement s'effectuant sur la face avant, il est nécessaire de pouvoir observer la première couche une fois la deuxième couche réalisée. La deuxième couche correspond quant à elle au thorax, au bord

d'attaque et aux liaisons (figure 5.9). L'épaisseur des liaisons qui est un paramètre déterminant de la transmission de la puissance de l'actionneur vers les ailes (voir chapitre 3), est déterminée par l'épaisseur de cette couche. Le procédé est le même que précédemment hormis le développement qui est fait simultanément pour les couches 2 à 5 après le dépôt de la dernière couche. Ce développement simultané de l'ensemble des couches 2 à 5 réduit les difficultés liées à l'alignement de motifs de grandes épaisseurs.

La couche 3 est un renforcement du bord d'attaque et du thorax par l'ajout d'une surépaisseur. L'épaisseur finale étant de 80 μm , les cuissons et les recuits comportent également une redescente en température de 3°C par minute pour évacuer les contraintes résiduelles qui pré-contraindraient et fléchiraient le bord d'attaque. De même, la couche 4 sert à renforcer et rigidifier le thorax (figure 5.9). Enfin, la dernière couche permet de créer des piliers utiles pour l'alignement lors de la phase d'assemblage du thorax et du support (voir paragraphe 5.1.e).

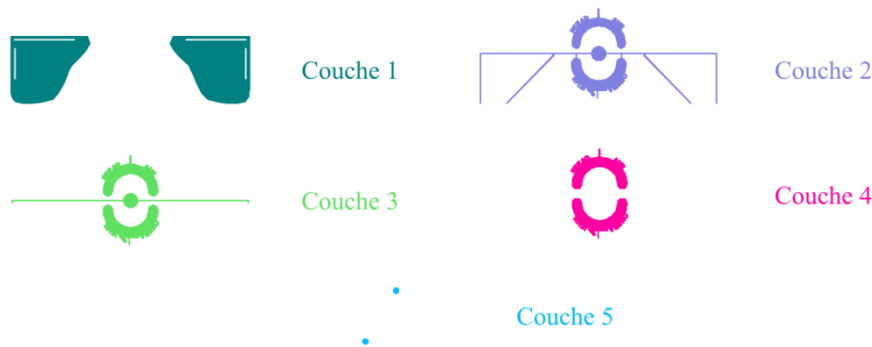


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..**3: Présentation des différents masques utilisés pour la réalisation du thorax. La première couche définit les membranes, les couches 2 et 3 correspondent au squelette du prototype, la couche 4 permet par l'ajout d'une couche épaisse de renforcer le thorax et la couche 5 engendre les plots d'alignement avec le support.**

Une fois l'ensemble de la structure réalisée, il faut développer les couches 2 à 5. Dans ce sens, le substrat est immergé dans une solution de PGMEA pendant plusieurs minutes puis rincé avec tout d'abord de l'isopropane-2-ol (IPA) et ensuite dans un bain neuf de PGMEA pour évacuer les derniers restes de résine. Il est enfin de nouveau rincé à l'IPA puis séché à l'azote. On obtient alors la structure du thorax et des ailes (figure 5.10).



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..4 : 16 thorax développés en SU-8 sur un substrat de silicium de 3 pouces, dont un sans membrane

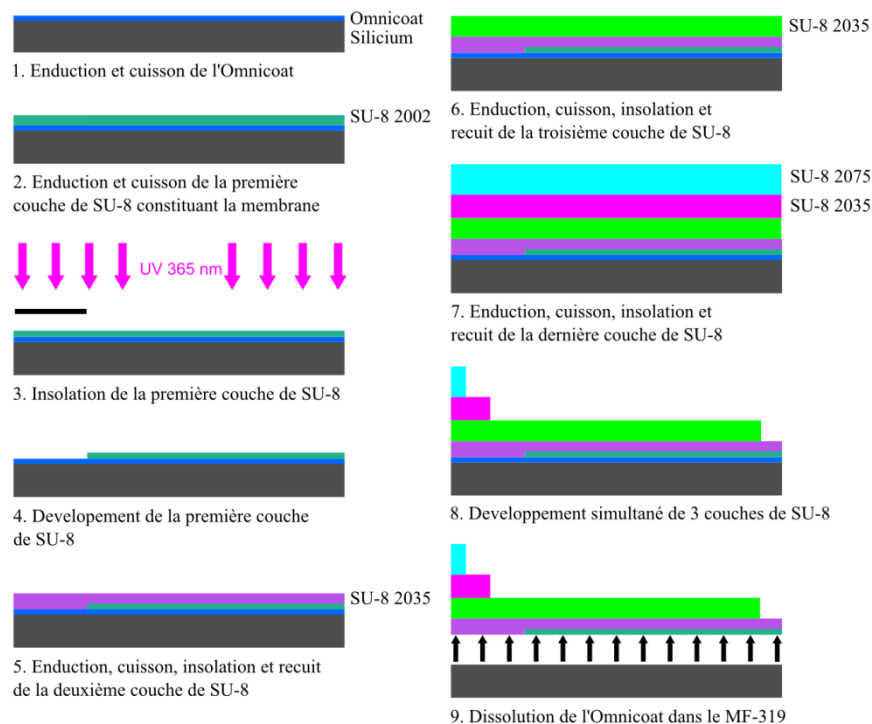


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..5 : Processus de fabrication du thorax

Par la suite, il faut dans un premier temps immerger le substrat dans un bain de MF-319 qui est un développeur à base d'hydroxyde de Tetramethylammonium (TMAH) qui va dissoudre l'Omnicat et ainsi libérer les prototypes. Dans un second temps, il faut extraire les structures de la solution puis les sécher.

Afin de réaliser cette étape complexe, deux méthodes semblent naturelles: la première serait de sortir directement les prototypes du liquide puis de les sécher tandis que la seconde serait d'ôter le liquide et de récupérer les prototypes secs. Néanmoins, ces deux méthodes ont été testées sans succès sur des

membranes d'une surface de 41 mm². Lors de l'extraction des prototypes par la première méthode, cette surface retient un volume important de liquide, ce qui provoque de fortes contraintes au niveau des liaisons et aboutit à leur rupture. Concernant la seconde méthode des ménisques se forment entre les deux surfaces lisses (le verre du cristalliseur et la SU-8) engendrant des forces capillaires très grandes qui excluent toute manipulation des structures. Après différents tests, la solution optimale consiste en l'utilisation de Gratton Scotch-Brite™ en tant qu'époussette pour sortir les prototypes du liquide (figure 5.12 (a)). Ce dernier a une surface extrêmement poreuse et très accidentée minimisant ainsi la surface de contact avec le prototype (figure 5.12 (b)) tout en assurant l'évacuation du liquide.

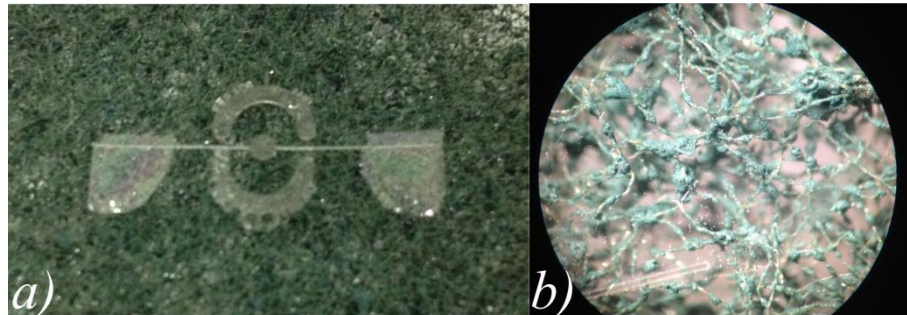


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..6 : **a) Prototype libéré et évacué du bain à l'aide du Gratton Scotch-Brite™ b) Gratton vu au microscope optique**

La structure du prototype possède une masse comprise entre 2,4 à 2,8 mg, ce qui représente 12 à 14 % de la masse globale du prototype avec l'aimant, la bobine et le support.

b. Support

Le support est principalement composé de deux parties : une base (partie 1, figure 5.13), et un cylindre de maintien (partie 2, figure 5.13). Ce support a plusieurs utilités, tout d'abord la base rigidifie le thorax pour que l'ensemble thorax et support puisse assurer l'immobilité de la bobine, ensuite le cylindre de maintien permet de positionner la bobine de façon précise par rapport à l'aimant (voir Chapitre 2) afin d'assurer un rendement optimal de l'actionneur.

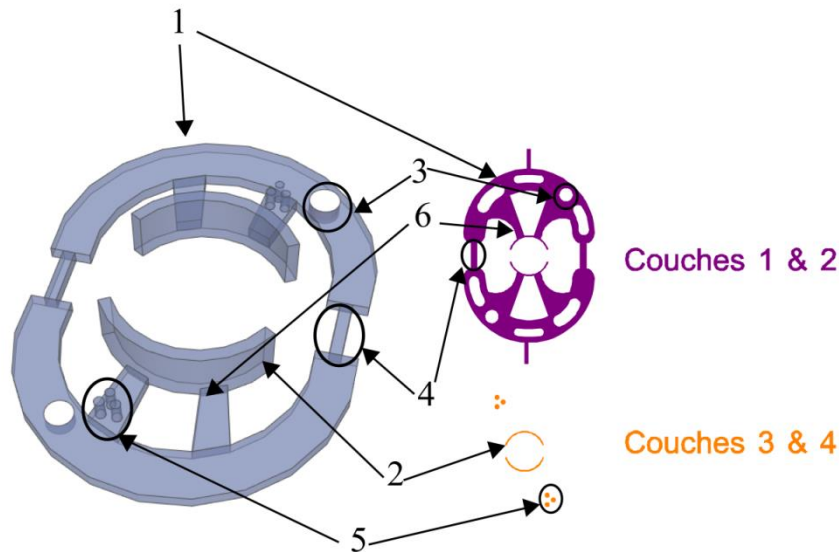


Figure 7 : Vue 3D du support ainsi que des masques utilisés. Les éléments importants associés sont, 1: base, 2 : cylindre de positionnement de la bobine, 3 : trou d'alignement entre le thorax et le support, 4 : amincissement du support au-dessus de la zone de liaison, 5 : plot de fixation de la bobine, 6 : barre de maintien du cylindre. Certaines extrusions présentes sur le schéma en deux dimensions ne sont pas présentes sur la vue 3D.

De la même façon que pour le thorax, une couche d'Omnicoat est déposée sur le substrat afin de libérer les supports. La base a une épaisseur de 270 μm et celle du cylindre de maintien atteint 325 μm . Pour obtenir de telles épaisseurs de SU-8, plusieurs couches de résine (tableau 5.2) sont superposées car l'épaisseur maximale atteinte avec de la SU-8 2075 (résine la plus visqueuse de la série 2000 disponible) en une seule couche est de 225 μm . Une première couche de résine de 225 μm est donc enduite et recuite, avant qu'une seconde couche de 45 μm de résine ne soit enduite sur la précédente. La bicouche de résine est ensuite insolée, recuite, et développée comme indiqué dans le tableau 5.2.

Au cours de nos travaux, différentes améliorations ont été apportées à l'architecture de la pièce afin de faciliter les étapes d'assemblage, d'améliorer les performances du prototype mais également de réduire sa masse. Parmi ces améliorations, des trous (élément 3, figure 5.13) ont été réalisés dans le support de manière à s'imbriquer avec des piliers ajoutés sur le thorax (figure 5.14) et ainsi assurer un alignement des deux pièces. De la même façon, des plots (éléments 5, figure 5.13) maintiennent le fil de la bobine lors de son assemblage. Des amincissements du support (éléments 4, figure 5.13) ont été proposés au-dessus des liaisons souples du thorax afin d'éviter tout contact entre le bord d'attaque et le support lors des mouvements amples de ce dernier. Enfin, pour réduire au maximum la masse du support, une attention particulière a été apportée au volume des barres de renfort du cylindre de maintien et de la base du support. Leur épaisseur étant assez conséquente (270 μm), le volume de chaque partie a été minimisé au maximum, ce qui explique la présence d'extrusions sur la base du support et la forme particulière des barres de renfort.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..**2: Recette de fabrication du support par photolithographie**

Étapes	Résine	Enduction [rpm/rpm.s ⁻¹ /s]	Recuit	Insolation [mJ.cm ⁻²]	Recuit	Épaisseur [μm]
0	Omnicoat	500/100/5 3000/1000/3	1 min, 200°C			0,2
1	SU-8 2075	500/100/5 1000/1000/3	5 min, 65°C 45 min, 95°C			225
2	SU-8 2075	500/100/5 2750/1000/3	4 min, 65°C 7 min, 95°C	350	7 min, 65°C 20 min, 95°C	45
3	SU-8 2075	500/100/5 1000/1000/3	5 min, 65°C 45 min, 95°C			225
4	SU-8 2075	500/100/5 2125/1000/3	6 min, 65°C 20 min, 95°C	400	1 min, 65°C 3 min, 95°C	100

Finalement, nous obtenons un support de 5,5 mg, ce qui représente 25 % de la masse totale du prototype. Cette masse doit pouvoir être encore réduite de 20 %, d'une part en augmentant la surface des extrusions réalisées sur la partie 1 et d'autre part, en réduisant la taille des barres de maintien du cylindre (élément 6, figure 5.13). En principe, il est possible de gagner 1 à 1,5 mg sur la masse de cette pièce en assurant une quasi immobilité de la bobine. En effet, dans le cas idéal on considère l'aimant mobile et la bobine immobile. Toutefois, la force exercée par la bobine sur l'aimant induit également une force de réaction de sens opposé. Si la bobine n'est pas sur un support, cette force tendra, en fonction du sens du courant, à éloigner la bobine de l'aimant ou au contraire à ramener l'aimant au centre de la bobine, ce qui, dans les deux cas diminue la force exercée sur l'aimant. Un compromis doit donc être respecté entre ces deux critères.

c. Assemblage

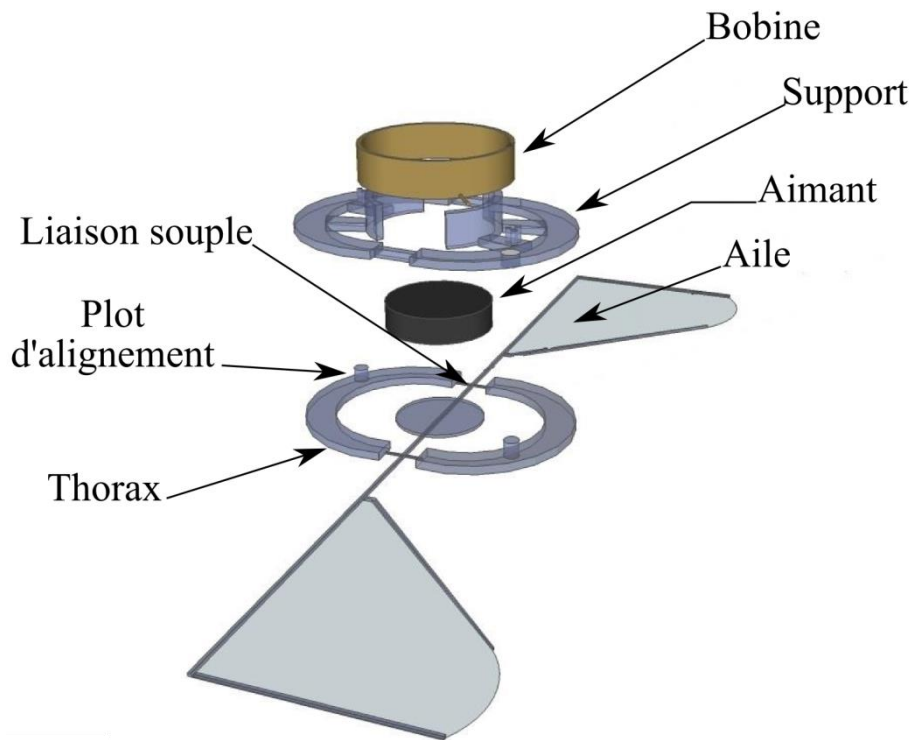


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..8 : **Vue éclatée du prototype complet**

Comme le présente la figure 5.14, le prototype est composé de 4 pièces, le thorax, le support, l'aimant et la bobine. L'assemblage s'effectue sous une loupe binoculaire de façon séquentielle. Dans un premier temps, l'aimant est collé au thorax, avec une colle dont le temps de séchage est assez long pour permettre si besoin d'ajuster la position de l'aimant sur la structure. Le cylindre présent au centre du tergum (figure 5.15 (a)) a un diamètre égal à celui de l'aimant, afin de centrer l'aimant par rapport au thorax (figure 5.15 (b)).

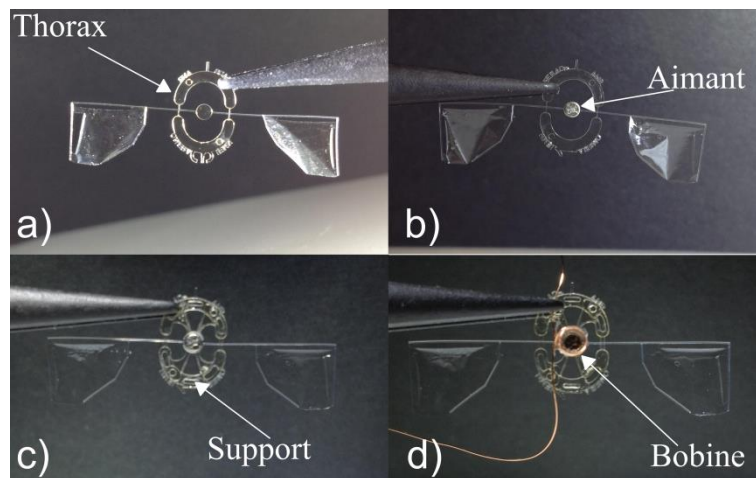


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..9 : **Séquence d'assemblage du prototype**