

**REALISATION DE GRANDES STRUCTURES NAVALES
EN MATERIAUX COMPOSITES
PAR LE PROCEDE DE MOULAGE PAR INFUSION
SOUS VIDE**

Patrick PARNEIX *, Dominique LUCAS **

* DCNS – Propulsion/CESMAN – Nantes-Indret (France)

** DCNS – Navires Armés Lorient – Lorient (France)

SOMMAIRE

Depuis une dizaine d'années, le moulage par infusion sous vide s'est imposé comme un procédé majeur pour la réalisation de grandes structures navales civiles ou militaires.

Après un rapide historique des procédés de transformation employés dans le domaine naval, la première partie du mémoire est consacrée à la présentation détaillée de l'infusion sous vide. Les principaux intérêts et limites de la technologie sont ensuite exposés : performances, excellente homogénéité et reproductibilité, absence d'émission de solvant dans l'atelier, et surtout avantage considérable pour les constructions navales, possibilité de fabrication de très grandes structures. Les interrogations sur les limites du procédé sont abordées en s'appuyant sur des exemples concrets de produits développés ou envisagés dans le domaine naval.

Certains aspects tels que les produits d'environnement, l'influence du vide, la tenue des tissus ou l'infusion en grande hauteur sont évoqués au travers de l'expérience acquise par DCNS.

Des exemples d'applications dans le domaine naval civil et militaire sont ensuite présentés en cherchant à illustrer les différents aspects du procédé de moulage par infusion.

SUMMARY

For roughly ten years, vacuum infusion process assert as a major process for the fabrication of large naval structures, both in the civilian and military fields.

After a short chronological account of process used in the naval field, the first part of the paper is dedicated to a detailed presentation of vacuum infusion process. Main interests and limits are then presented: performances, excellent homogeneity and reproducibility, no VOC in the workshop, and moreover capability for very large structures. Questions on the limits of the process are then evocated, leaning on examples of real fabrications or projects in the naval field.

Some aspects like environmental products, vacuum influence, holding of dry fabrics or infusion on large height are treated trough DCNS experience.

Somme application examples in civilian and military fields are then presented, trying to illustrate different aspects of infusion moulding process.

1. INTRODUCTION

Le moulage par infusion sous vide est actuellement devenu un procédé incontournable pour la réalisation de grandes structures navales.

Après une présentation générale du process intégrant sa genèse, ses intérêts et ses limites, un zoom est réalisé sur différents aspects d'une étude d'optimisation menée par DCNS sur le site de Lorient.

Des exemples d'applications issus du domaine naval sont ensuite présentés, avec une forte connotation militaire liée à notre domaine d'activité spécifique.

2. PRESENTATION DU PROCEDE

2.1. Historique dans le domaine naval

On retrouve mention de l'emploi des matériaux composites dans le domaine naval, dans l'immédiat après-guerre (1946-48). Ces matériaux essentiellement à base de résines polyester et fibres de verre ont déjà été employés en aéronautique. Or certaines de leurs propriétés telles que l'absence de corrosion et plus généralement un comportement intéressant en milieu marin, leur confèrent un intérêt évident pour les applications navales. L'US NAVY finance alors un programme ayant pour but de réaliser des embarcations de 28 pieds destinées au transport de personnels. La littérature [1] fait état de 2 techniques de mise en œuvre : une technique de moulage sous pression à l'aide d'un sac gonflable et une technique d'injection sous vide. Le premier procédé est assez rapidement abandonné. Quant au second, il sera utilisé pendant plus d'une dizaine d'années pour réaliser plusieurs séries d'embarcations, malgré de nombreux problèmes de remplissage. Les performances en termes de qualité de matériau restent modestes et la reproductibilité incertaine. Progressivement la technique de stratification au contact en voie humide va s'imposer pour les applications navales. C'est grâce à cette technique de transformation, et aussi à l'apparition de matériaux de plus en plus performants tant au niveau des renforts fibreux que des résines d'imprégnation, que l'industrie des composites

dans le domaine naval, et notamment le naval militaire, va prendre un essor important. Dans les années 70, de nouvelles techniques de fabrication de pièces en composites apparaissent mais ne sont guère adaptées à la réalisation de grandes structures et donc peu ou pas employées pour des structures navales. Dans les années 80, les préimprégnés sont utilisés par exemple pour la réalisation d'éléments de ponts de sous-marins [2] mais l'extension de cette technologie est freinée pour les très grandes pièces par la nécessité de cuissons sous pression, en autoclave ou au sac à vide.

Ce n'est réellement qu'au début des années 90 qu'une véritable révolution dans les procédés de transformation, va apparaître avec les premières communications sur le moulage par infusion (voir par exemple [3]). Ce procédé va rapidement s'imposer comme un procédé majeur dans la réalisation de grandes pièces unitaires ou en petite série et donc intéresser les constructions navales pour des applications civiles ou de loisirs dans un premier temps, puis pour des applications militaires.

2.2. Principe du moulage par infusion sous vide

Le procédé de moulage par infusion sous vide a été promu au début des années 90, en particulier par W.H. SEEMAN qui a développé une méthode appelée SCRIMP (Seeman Composite Resin Infusion Molding Process).

Sur le principe, la technique d'infusion met en œuvre, contrairement aux techniques traditionnelles d'injection dans un moule fermé, un moule ouvert et un système de compactage par une bâche souple. Seeman a en particulier proposé des systèmes de distribution originaux inclus dans la bâche, qui ont fait l'objet de brevets (voir par exemple [4], [5], [6]).

La préforme fibreuse, et la ou les âmes dans le cas de structures sandwichs ou multisandwichs, sont introduites dans le moule puis recouvertes des différents médias. De l'extérieur vers l'intérieur, on trouve ainsi (voir figure 1):

- un dispositif d'étanchéité assuré par une bâche à vide et des joints.
- un système de mise sous vide qui peut être périphérique ou comporter des prises d'aspiration à travers la bâche elle-même,
- un dispositif d'admission de résine, par exemple sous la forme de rampes d'admission ou de spots,
- un médium de distribution permettant de répartir aisément la résine en surface,
- des « tissus techniques » assurant le drainage air-résine,
- un ou plusieurs tissus d'arrachage (peel-ply) permettant au démoulage, la séparation entre la pièce et les différents périphériques.

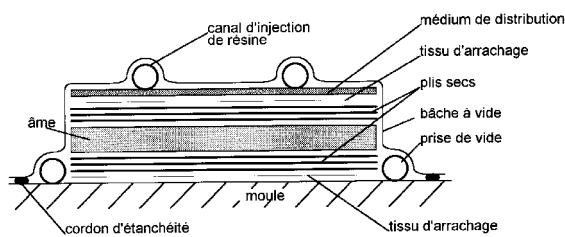


Figure 1: Principe du moulage par infusion

Après drapage de la structure et installation des "tissus techniques", le volume est mis sous vide par l'intermédiaire de pompes à vide, puis la résine est aspirée, d'abord dans le médium de distribution, puis à travers les différents tissus techniques, et enfin à travers les tissus secs. Sous l'effet du vide, la matrice vient imprégner (infuser) la préforme fibreuse.

Le procédé est également utilisable pour des structures sandwichs, mais le concepteur doit dans ce cas éviter le double écueil d'une âme parfaitement étanche qui empêcherait la migration (l'infusion) d'une face vers l'autre, ou au contraire d'une âme trop perméable qui se gorgerait de résine (cas des nids d'abeilles ou des mousses à structure ouverte par exemple). Des astuces comme le perçage des âmes ou le rainurage de celles-ci, permettent un bon drainage de la résine et l'imprégnation des couches sèches situées sous l'âme. Ces techniques ont rapidement trouvé écho chez les fournisseurs de mousses polymériques, balsa ou autres matériaux d'âmes, qui proposent

maintenant des demi-produits pré-rainurés et pré percés.

Après infusion complète de la préforme et polymérisation de la résine, la structure peut être démoulée. Le tissu d'arrachage permet une séparation aisée entre la pièce elle-même et l'excédent de résine contenu dans la zone de distribution.

Le moulage par infusion se caractérise par l'emploi de nombreux « consommables » : rampes d'admission de résine, médium de distribution, drains, tissus d'arrachage, et dans une certaine mesure bâche d'étanchéité. En outre des opérations de finition sont nécessaires, contrairement aux techniques d'injection traditionnelles en moule fermé.

3. INTERETS ET LIMITES DU PROCEDE

Le moulage par infusion présente de nombreux avantages, le principal étant la qualité du matériau proche de celle obtenue avec des techniques plus coûteuses telles que le moulage de matériaux préimprégnés en autoclave : taux de fibres très largement supérieur (de l'ordre de 70 % en masse pour un tissé verre) à ce qui est obtenu par les techniques de moulage au contact, très faible porosité (généralement inférieure à 1 %), excellente homogénéité et reproductibilité [7] [8]. Un autre avantage concerne l'absence d'émission de solvant dans l'atelier, l'imprégnation et la polymérisation ayant lieu sous enceinte étanche. Enfin, et c'est un avantage considérable, le moulage par infusion permet la réalisation de très grandes structures, contrairement aux techniques d'injection "traditionnelles".

Parmi les contraintes liées au procédé, il faut souligner que si le principe est relativement simple, son application, surtout à des pièces de géométrie ou de composition complexes, peut s'avérer délicate. Une phase d'apprentissage et quelquefois des échecs sont nécessaires afin d'appréhender un procédé qui ne laisse pas place à l'improvisation. L'infusion est un procédé « à risque » et il est indispensable d'avoir parfaitement anticipé le mode de cheminement de la résine avant de démarrer l'infusion. La phase de dépose de la préforme fibreuse ainsi que la stratégie d'infusion d'où dépendent le positionnement des rampes d'admission, des prises de vide, des drains,

etc.), sont des phases essentielles. Des essais préliminaires sur éprouvettes sont souvent nécessaires ; les outils de modélisation peuvent permettre de réduire ces essais ou de sécuriser le process ; l'expérience acquise par des années de pratique constitue la meilleure des garanties...

Une autre contrainte de l'infusion est la quantité importante de produits d'environnement qui alourdissent le poste des « consommables » : bêche à vide, drains, rampes, joints, séparateurs, etc. Certes, l'infusion permet de limiter voire d'éviter les émissions de solvants dans l'atelier de production, mais à l'heure où les contraintes environnementales pèsent de plus en plus lourd, le poste « déchets de production » peut être un élément négatif.

4. DEVELOPPEMENTS RECENTS MENES PAR DCNS SUR LE PROCEDE

4.1. Aspects technologiques

Une fois la technologie maîtrisée, il est important de l'optimiser afin d'en réduire les coûts directs et indirects, et d'améliorer les cycles de fabrication, tout en conservant un niveau irréprochable de qualité des produits finis. Différents aspects de la mise en œuvre ont été ainsi dissociés afin d'être étudiés de manière indépendante.

Parmi ceux-ci on retrouve des travaux sur :

- Les systèmes d'alimentation de résine
- L'optimisation des « freins »
- Les tissus d'environnement (tissus techniques)
- Les bêches à vide (membranes jetables ou réutilisables)
- ...

4.1.1 Amélioration du système d'alimentation de résine

Une série d'essais a été réalisée avec des systèmes d'alimentation différents. Ces systèmes différaient tant du point de vue de la nature des rampes (par exemple rampes en silicone réutilisables ou rampes cartonnées jetables) que de celui de l'architecture (rampes parallèles, dispositif en croix, arêtes de

poisson, ...). Les photos ci-après illustrent quelques modes d'alimentation testés :

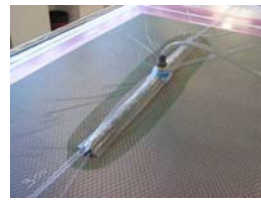


Figure 2 : Rampe silicone

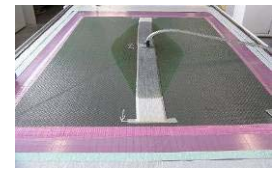


Figure 3 : Rampe cartonnée

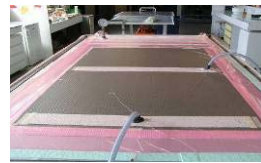


Figure 4 : Rampes en parallèle

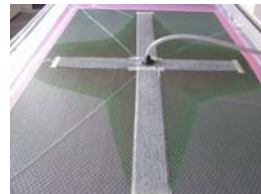


Figure 5 : Rampes en croix



Figure 6 : Rampes en feuille (ou arête de poisson)

Lors de ces essais plusieurs paramètres ont été mesurés, comme le débit massique de résine, le temps d'infusion ...

Par ailleurs, des caractéristiques d'ordre qualitatif ont été déterminées suite à ces essais : marquage de la rampe, facilité de mise en œuvre, ...

On retiendra que les rampes réutilisables, en tout cas celles évaluées dans le cadre de ce programme, présentent un certain nombre d'inconvénients comme le marquage des pièces, quelques contraintes de mise en œuvre et d'exploitation (emboitements entre connecteurs, nettoyage des rampes et des raccords,...). En outre ce concept semble mal adapté à la réalisation de pièces en forme notamment en présence de deux rayons de courbure, en raison de la raideur de l'oméga.

En revanche les rampes cartonnées jetables laissent moins de marquage sur la pièce. Le procédé se prête bien à la réalisation de structures en forme (cet aspect a été validé par ailleurs).

Sur le plan économique, le coût de la rampe et des matériels auxiliaires (Tés, vannes...) est bien moins élevé. Le temps de mise en œuvre est également réduit.

Des tests de remplissage sur des géométries planes de surfaces équivalentes ont été effectués avec différentes architectures de rampes. On obtient des temps de remplissage sensiblement différents suivant l'organisation et le positionnement des rampes, mais également le nombre et le positionnement des arrivées de résine. C'est l'ensemble de ces paramètres qui doit être compilé afin de définir la stratégie d'infusion d'une pièce complexe, comme nous le verrons ultérieurement dans la communication.

4.1.2 Optimisation des « freins »

Différents matériaux ou concepts de « freinage » ont été comparés.

Dans un premier temps, les zones de freins ont été constituées par des couches de tissus supplémentaires déposées en périphérie des pièces pour diminuer le débit de résine.

Dans un second temps pour réduire le coût de fabrication de ces freins ce sont des matériaux de type feutres qui ont été utilisés. L'expérimentation a montré que ce concept permet de jouer le rôle du frein à partir d'une largeur minimum de 50 mm.

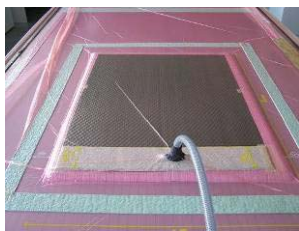


Figure 7 : Utilisation de feutres pour le freinage périphérique

Le freinage peut être amélioré en substituant à la bande de feutre un joint d'étanchéité qui permet de mieux canaliser la résine et ainsi réduire la largeur de la plage périphérique du moule. Cette configuration, qui permet de limiter les pertes dans le feutre, conduit à une réduction de 15% du temps de l'infusion (sur la base des essais réalisés sur plaques planes).



Figure 8 : Canalisation de la résine par joints d'étanchéité

Ces différents exemples montrent l'intérêt de mener des essais élémentaires sur structures simples, afin d'évaluer les rampes, les tissus d'environnement, les différents concepts de freins, ... et de mesurer leur influence sur la conception et le coût des outillages, la nature des consommables, les temps de cycles, ... afin d'optimiser le process dans son ensemble.

4.2. Influence du taux de vide lors de l'infusion

L'influence de la dépression générée dans la poche à vide lors de l'infusion est un sujet parfois controversé. Certes la nécessité de créer une dépression qui permet le compactage des renforts secs, mais surtout constitue la force motrice permettant la migration de la résine dans la préforme, est une composante essentielle du procédé. Néanmoins le niveau de dépression créé est débattu. Deux théories s'affrontent :

- Limiter la pression exercée sous la poche à vide à un niveau de l'ordre de 0,07 à 0,08 MPa. L'argument principal pour cette théorie est d'éviter le risque d'ébullition du styrène à basse pression qui générerait des bulles sur le front d'infusion et donc au sein de la pièce en final.
- Appliquer une pression plus élevée, dans la limite de ce qui est réalisable dans un dispositif sous bache à vide et joint élastomérique, et avec une pompe à vide primaire, soit supérieure ou égale à 0,095 MPa.

De nombreux essais ont été menés à DCNS afin d'optimiser ce paramètre. Il apparaît clairement qu'une dépression plus forte présente de nombreux avantages : la qualité

d'imprégnation des renforts est nettement améliorée, et le taux de porosité résiduel réduit. Le tableau ci-dessous fournit un exemple pour un composite verre/polyester infusé avec 2 niveaux de dépression différents

Dépression (Mpa)	Contrainte de cisaillement interlaminaire (MPa)	Module en flexion (MPa)	Contrainte à rupture en flexion (MPa)	Fraction massique de fibres	Porosité résiduelle
0,98	45,8	27500	596		
0,70	41,0	28300	461		

Tableau 1 : Influence de la dépression

Par ailleurs un taux de vide important permet d'accroître la vitesse d'infusion, d'allonger le pas de rampes et ainsi de diminuer le coût des périphériques. Enfin, dans le cas de pièces « complexes » à infuser (par exemple pièces épaisses, difficultés géométriques), ou pour contrer l'effet de la gravité (infusion en position verticale sur de grandes hauteurs ; (cf.§ 4.4), une dépression élevée est une condition quasiment indispensable à la réussite de l'infusion.

4.3. Maintien des tissus secs

Le moulage par infusion sous vide nécessite la mise en place de l'ensemble des tissus secs, voire du matériau d'âme, avant la fermeture de la bache à vide et l'admission de résine. Le positionnement et le maintien rigoureux des tissus peut s'avérer délicat, surtout pour des pièces épaisses et/ou lorsque tout ou partie de la pièce à infuser se trouve en position verticale. Des systèmes de tenue mécanique peuvent être envisagés et ont été utilisés par DCNS dans des cas très spécifiques (pincés, planches à clous, ...), mais leur utilisation reste limitée. Des colles en spray ont été employées assez rapidement lorsque le procédé de moulage par infusion est apparu. Néanmoins cette solution suscite quelques réticences notamment au niveau environnemental. Plus récemment sont apparus sur le marché des tissus préencollés.

L'utilisation de colle en spray est un procédé connu depuis longtemps, mais qui pose des problèmes notamment en termes d'hygiène et sécurité et vis-à-vis de l'environnement. Des mesures de protection individuelles doivent être prises. La maîtrise de la quantité de colle n'est pas aisée. Les colles peuvent en outre

s'avérer incompatibles avec certaines résines d'infusion.

Devant le besoin généré par le procédé d'infusion des fournisseurs mettent sur le marché des tissus autocollants simple face ou double face. Il s'agit de tissus de verre ou carbone standards pour lesquels des bandes de colle de l'ordre de 10 mm sont déposées avec un pas allant jusqu'à 20 mm. L'une des contraintes liées à ce type de matériau réside actuellement dans le choix limité de produits proposés.

Plus récemment, il est apparu possible de faire pré-encoller des tissus « traditionnels ». Dans ce cas, la stabilité du tissu est à prendre en considération. Les mêmes modes de pré encollage que pour les produits « catalogues » sont possibles. En outre la teneur en colle peut être réduite à la demande.

Au niveau de la mise en œuvre, les tissus préencollés offrent certains avantages par rapport aux tissus « classiques ». Leur conditionnement avec une ensouple (film plastique empêchant le collage d'une couche sur l'autre en phase de stockage) permet d'augmenter la précision de découpe des tissus car il empêche l'effilochage chaîne/trame rencontré sur les plis secs. Cet aspect peut s'avérer très important pour des structures requérant une précision très fine de dépose. Les tissus autocollants offrent la possibilité de pouvoir être repositionnés alors que c'est plus délicat (ou en tout cas réalisable un nombre limité de fois) avec les tissus adhésifs avec des colles en spray. En outre les tissus autocollants adhèrent sur toutes leurs surfaces et présentent ainsi un collage plus homogène que le collage par points des colles en spray.



Figure 9 : Drapage tissus préencollés (a) ou secs (b)

L'utilisation de colle en spray et à plus forte raison de tissus préencollés se traduit en revanche par des baisses importantes, voire dramatiques des caractéristiques mécaniques.

Ainsi le tableau ci-dessous permet la comparaison des performances de composite verre E/Vinylester et verre E/Polyester mettant en œuvre des tissus préencollés sur une ou deux faces.

	Cisaillement Interlaminaire (MPa)	Module en flexion (MPa)	Contrainte à rupture en flexion (MPa)
Tissu classique	45,8	27500	596
Tissu pré encollé 1 face	24,7	23200	366
Tissu préencollé 2 faces	12,6	19500	217

Tableau 2 : Performances mécaniques de composites verre /Vinylester

	Cisaillement Interlaminaire (MPa)	Module en flexion (MPa)	Contrainte à rupture en flexion (MPa)
Tissu classique	41,3	27100	501
Tissu pré encollé 1 face	21,1	26400	402
Tissu préencollé 2 faces	11,7	18500	191

Tableau 3 : Performances mécaniques de composites M1 : verre /Vinylester

L'encollage simple face fait perdre : environ 10 à 15 % sur le module en flexion mais de 20 à 40 % sur les valeurs des contraintes à rupture. Les pertes sont de l'ordre de 45 à 50% de pertes sur la contrainte de délaminage en flexion.

L'encollage double face fait perdre encore plus de caractéristiques : 30 % en module, mais plus de 60 % sur les contraintes à rupture. Les pertes sont de l'ordre de 70 % de pertes sur la contrainte de délaminage en flexion.

Les modes de rupture des éprouvettes sont très différents suivant qu'il s'agit de tissus « standards » ou encollés. La ruine de certaines éprouvettes de flexion (éprouvettes préencollées) intervient par délaminage au niveau de la fibre neutre de l'éprouvette par décohéation des couches (voir photo fig.10), et



Figure 10 : Essai de délaminage en flexion sur éprouvette réalisée à partir de tissus préencollés

ceci avec les encollages simple face et double face. Les éprouvettes de délaminage en flexion ont quant à elles tendance à se ruiner par glissement des couches de tissus entre elles au fur et à mesure que le poinçon appuie sur l'éprouvette. On remarque donc bien une mauvaise cohésion entre les différentes couches de tissus.

Ce type de comportement est confirmé sur un autre type de composite verre /Vinylester (tableau 4) où l'on note que les tissus adhésés à l'aide de colle en spray subissent également une diminution de propriétés mécaniques, mais à un degré moindre que celle des tissus préencollés.

	CIL (MPa)	E flexion (MPa)	σ_R flexion (MPa)	E Compr. (MPa)	σ_R Compr. (MPa)
Tissu classique	46,3	29700	636	438	31100
Tissu pré encollé 1 face	21,6	28600	367	247	32200
Tissu adhésés par spray	32,1	27400	608	311	32400

Tableau 4: Performances mécaniques de composites M2 : verre /Vinylester

En définitive, on constate donc que, pour les systèmes évalués, l'emploi de tissus préencollés et dans une moindre mesure de tissus adhésés par colle en spray, s'ils favorisent la mise en œuvre des renforts, génèrent des pertes assez considérables au niveau des performances, mécaniques. A noter que le comportement à long terme, dans des conditions de vieillissement mécanique ou en environnement marin n'a pas été évalué dans le cadre de l'étude menée par DCNS. Ne doutons pas que les produits proposés sur le marché ne sauraient tarder à évoluer très rapidement vers des solutions de mieux en mieux adaptés aux besoins des utilisateurs. En

attendant, le recours à de telles solutions doit être effectué avec beaucoup de prudence.

Signalons également que des développements importants sont en cours pour rechercher des solutions purement textiles au problème du maintien des tissus secs.

4.4. Infusion de grandes pièces en position verticale

Les contraintes liées au processus de fabrication ou à la géométrie des pièces à réaliser peuvent conduire à effectuer des opérations d'infusion en position verticale sur de grandes hauteurs. La littérature fait ainsi état d'opérations menées jusqu'à 14 mètres [9].

Des campagnes d'essais ont été menées par DCNS afin d'assurer la maîtrise d'infusion jusqu'à des hauteurs de l'ordre de 8 mètres. L'option d'admettre la résine par la partie haute s'élimine assez rapidement : dans cette option, la gravité aide au remplissage de la préforme, mais il est extrêmement difficile de maîtriser le front de résine, et l'on court le risque d'emmagasiner quantité de bulles, voire de ne pas imprégner certaines zones, particulièrement s'il y a des obstacles tels que des inserts, des surépaisseurs, etc.

Une infusion de bas en haut permet de mieux réguler le front d'infusion et d'obtenir une meilleure homogénéité du matériau, et un remplissage plus satisfaisant de la préforme fibreuse.

Des essais ont été effectués par DCNS sur des structures monolithiques et sandwichs. Dans le cas d'une pièce de grande hauteur, la question principale est de savoir si la force motrice créée par la dépression sera suffisante pour vaincre le poids de la colonne de résine et permettre une infusion complète de la pièce. Parmi les paramètres pour faciliter l'infusion, se trouvent le différentiel de pression, le positionnement du conteneur de résine, le positionnement et le nombre des rampes d'admission et d'aspiration, la stratégie d'infusion (notamment timing d'ouverture et de fermeture des rampes, traitement des obstacles constitués par des singularités de formes,...), ainsi que des paramètres purement matériaux tels que la perméabilité des préformes, la viscosité et la réactivité de la résine, l'adaptation des âmes dans le cas de structures sandwichs.



Figure 11 : Essai d'infusion en vertical

Ces paramètres étant maîtrisés, il est possible d'effectuer le remplissage par infusion de pièces de grande hauteur tout en garantissant une qualité de matériau équivalente à celle obtenue lors de phases d'infusion en position horizontale. Ainsi, on constate qu'il n'y a pas d'évolution significative de l'épaisseur et de la composition du matériau en fonction de l'altitude. Les valeurs mesurées en laboratoire sur des prélèvements d'échantillons sont cohérentes avec les valeurs mesurées sur l'infusion du même matériau à plat.

On vérifie ainsi qu'il n'y a pas de fluage de la résine vers le pied de l'échantillon, phénomène que l'on pourrait craindre avec un process mal maîtrisé.

Les enseignements de ces développements ont été mis à profit pour la réalisation d'un prototype de mâtère intégrée qui sera présenté au paragraphe 5.

4.5. Démonstrateur

Un démonstrateur rassemblant un nombre important de singularités et difficultés potentielles pour l'infusion a été conçu et réalisé afin de confirmer la faisabilité technique d'une structure d'une telle complexité.

4.5.1 Description du démonstrateur

Le démonstrateur a été réalisé dans un moule existant (voir fig. 12). La taille modeste de ce démonstrateur (longueur 1,50 m, largeur 0,70 m, hauteur 1m) présente de l'intérêt en termes de coût limité pour l'opération. La forme en

cuvette est également représentative de différents types d'applications potentielles du procédé de moulage par infusion: petites pièces techniques de type dômes sonar, ogives d'hélice, etc. L'exiguïté constituera une difficulté supplémentaire. En outre la validité de la démonstration sera meilleure que sur des pièces planes ou quasi-planes.

La photo ci-après illustre le moule :



Figure 12 : Moule

La structure du démonstrateur telle qu'elle a été imaginée comme cas d'école, est constituée d'un bordé en monolithique, avec une zone sandwich afin d'accroître la difficulté. Des singularités ont également été rajoutées: cloisons, vaigre, raidisseur, barrots, mise en place de différents types d'inserts, infusion sur gel-coat.



Fig. 13

Le bordé a été confectionné avec des tissus autocollants. Les opérateurs ont pu confirmer les intérêts mentionnés au paragraphe 4.3 sur ce type de produit d'un point de vue mise en œuvre. Par exemple, la possibilité de repositionner les plis, surtout sur une pièce à géométrie complexe comme c'est le cas du démonstrateur est un atout évident. Les tissus autocollants offrent également un grand intérêt pour positionner des âmes de raidisseur, ainsi que pour faciliter le drapage des raidisseurs (photos ci-dessous) :



Figure 14 : Drapage de membrures



Figure 15 : Positionnement barrot

L'intégration d'inserts dans la paroi a également été évaluée dans plusieurs zones du bordé. Ces inserts ont été placés à mi-épaisseur du bordé. Le tissu autocollant suffit à leur positionnement et maintien en place.

La partie inférieure de notre démonstrateur comporte une zone monolithique épaisse (vaigre), de 40mm environ, soit une soixantaine de plis. Des essais préliminaires d'infusion sur panneaux plans (photos ci-dessous) ont montré la nécessité d'intégrer des tissus de drainage afin d'avoir une bonne migration de la résine au sein de la préforme et ainsi obtenir une structure bien imprégnée et saine.



Figure 16 : Essais préliminaires d'infusion en forte épaisseur monolithique

Notre démonstrateur est doté d'une cloison sandwich. L'objectif de cette singularité est d'appréhender les difficultés de drapage in-situ des peaux, notamment en pied de cloison, la gestion de l'infusion d'une pièce complexe, et surtout le maintien dans une position prédéfinie d'un tel élément lors de la mise sous vide.



Figure 17 : Positionnement âme/cloison

Compte tenu de la géométrie de la pièce (symétrie globale hors singularités volontairement positionnées de façon dissymétrique), il a été décidé d'amener la résine du centre de la pièce vers la périphérie. Pour cela une rampe unique d'aspiration est positionnée sur le bord tombé du moule. L'admission de résine se fait dans un premier temps sur la partie centrale épaisse (vaigre) qui nécessite le flot de résine le plus important, puis l'on ouvre les autres rampes d'admission au fur et à mesure de l'avancée du front de résine, en remontant vers l'extérieur.



Figure 18 : Positionnement des éléments de drainage

Une bâche étanche permet la mise sous vide de l'ensemble préforme fibreuse / tissus techniques. La jonction entre le moule étanche et cette membrane se fait par un joint d'étanchéité collant.

Comme pour tout dispositif de mise sous vide, un soin tout particulier doit être apporté à la mise en place de la bâche: lui laisser de l'aisance en limitant les plis susceptibles de générer des accumulations de résine, assurer l'étanchéité au niveau des plis qui malgré tout se forment dans la membrane compte tenu de la géométrie de la pièce ...

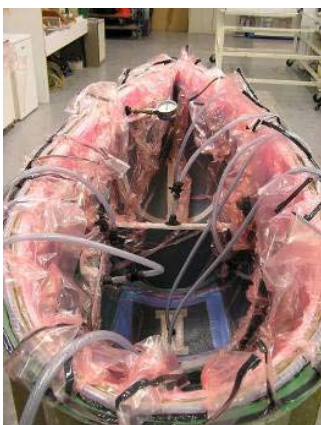


Figure 19 : Système d'aspiration

L'expérience acquise par NA Lorient milite pour le recours à un vide poussé (dépression de l'ordre de 0,9 Bar). Signalons que cette approche n'est pas partagée par tous les utilisateurs de la technologie, certains privilégiant une dépression moindre.



Figure 20 :

Pour la résine polyester retenue, les temps de gel ont été réglés au laboratoire, et sont différents suivant les parties de la pièce : plus long pour l'imprégnation de la partie « vaigre » qui est épaisse, et donc plus longue à imprégner.

Il n'a pas été rencontré de réelle difficulté durant le remplissage de la préforme qui a duré près de 3 heures. L'essentiel des problèmes potentiels avaient été réglés avant même le début de drapage du prototype. Ceci est une caractéristique du moulage par infusion où il est nécessaire d'avoir bien anticipé le mode de remplissage (migration de la résine) afin d'éviter de refermer les fronts de résine en piégeant des zones « sèches » qui resteraient des zones mal imprégnées et constitueraient des défauts, voire seraient susceptibles de conduire au rebut de la pièce. Cette anticipation nécessite une réflexion sur la stratégie à retenir pour mener à bien l'infusion, réflexion issue de l'expérience, d'un certain nombre de cas de figures déjà rencontrés, et d'essais préliminaires.

Après démoulage, on note un bon aspect de surface externe de la pièce : pièce lisse, sans fissures, sans inclusions.



Figures 21 et 22 : Pièce démoulée

Concernant la partie interne du démonstrateur, on ne note pas de zone mal imprégnée. Le remplissage par la résine a été homogène et la pièce semble saine. On observe cependant des bandes de couleurs différentes, conséquence de l'emploi de tissus préencollés.

Comme c'est souvent le cas, pour des pièces infusées, on observe que lors de la mise sous vide des formes mâles, les tissus ont tendance à générer des plis. Ce phénomène est dû à la compression de l'empilement sur le moule perdu. Il se retrouve également pour des pièces réalisées en préimprégnés.

On notera qu'une solution pour « stabiliser » les préformes pourrait être de couder ou solidariser d'une façon ou d'une autre les différentes strates de l'empilement. Des essais ont été menés à NA Lorient, mais le procédé reste à industrialiser.

La qualité du composite infusé est bonne avec un taux de fibres reproductible et très peu de porosités.

La réalisation du démonstrateur a permis de consolider sur pièce réelle, les jugements apportés lors de l'évaluation sur éprouvettes de différents tissus techniques et périphériques, et d'améliorer différents points dont certains portent sur des aspects très pratiques.

Des outils de simulation numérique permettant de réduire ces phases d'essai préliminaire et d'anticiper le mode de remplissage commencent maintenant à être disponibles sur le marché et devraient être évalués pour réduire les coûts de développement des pièces. La phase d'infusion ayant été filmée devrait permettre dans un futur proche de visualiser le niveau de corrélation entre la simulation et la réalisation réelle.

5. EXEMPLES D'APPLICATION DANS LE DOMAINE NAVAL

En guise d'illustration du procédé de moulage par infusion et de son extension rapide notamment dans le domaine naval, il est fourni ci-après des exemples d'applications ou de développements, dans le secteur civil, mais aussi et surtout dans le domaine militaire sur lequel les auteurs ont une perception plus accentuée.

5.1. Dans le domaine civil

Le secteur de la construction navale de plaisance s'est intéressé très tôt au procédé de moulage par infusion, en particulier pour des navires très spécifiques que ce soit par les caractéristiques d'allègement recherchées ou par la taille. Ainsi le chantier vendéen Kingcat a développé dès les années 90, un yacht rapide de croisière dont la coque catamaran de 28 mètres de long est intégralement réalisée par infusion de résine vinylester dans des préformes verre et carbone. Au début des années 2000, le chantier CNB à Bordeaux a développé et réalisé un voilier de 35 mètres qui est un des très rares navires de cette taille construits en composite fibres de carbone, par le procédé d'infusion [10]. Le groupe Bénéteau investit également dans la technologie, principalement pour la mise en œuvre de bateaux monotypes et de compétition. Les petits chantiers n'hésitent pas également à se lancer dans le moulage par infusion qui leur offre la possibilité d'associer la performance technique et économique et le respect des normes environnementales dans l'atelier de production.

Toujours dans le secteur naval, l'industrie offshore développe également des applications en composites infusés, comme par exemple des couvertures de têtes de puits qui peuvent atteindre 25 tonnes de composites.

5.2. Dans le domaine militaire

Au début des années 90 aux Etats-Unis, un programme expérimental a été financé, pour comparer l'intérêt de technologies émergentes dans le domaine du composite, pour la réalisation de coques de navires militaires [11].

Des structures représentant des tranches de navire ont été fabriquées. Les conclusions mettaient clairement en avant la supériorité du procédé par infusion [12], pour les différents avantages énoncés plus haut, même si l'expérimentation a été marquée par un premier échec, preuve que la maturité du procédé n'était pas absolue sur ce type de pièce et à cette période. En quelques années, des progrès importants ont été accomplis.



Figure 23: Comparaison de différents procédés pour la réalisation de coques de navires (Photos du haut : démonstrateur réalisés par infusion, photos du bas, démonstrateurs en technologie prepreg)

L'infusion a été employée, toujours aux Etats-Unis, dans le cadre d'un programme expérimental de mâturation intégrée [13]: le programme AEMS. Dans ce cas l'excellente qualité du composite obtenu (fort taux de fibre, reproductibilité), a été un argument majeur dans le choix du procédé. Ces développements dans le domaine des mâturations intégrées ont connu un aboutissement avec la réalisation des mâturations des LPD de type San Antonio par Northrop Grumman à Gulfport [14]. Dans ce cas, la mâturation octogonale de 12 mètres de haut est réalisée par préfabrication puis assemblage de panneaux infusés.

Le moulage par infusion serait également employé pour la réalisation des topsides intégrés dans le cadre du programme de destroyers DD21 (voir par exemple [15]).

En Europe, le moulage par infusion trouve également des applications dans le domaine naval militaire. Ainsi, près de 30% des composites mis en œuvre par VOSPER THORNYCROFT sur la coque des HMS PENZANCE (déplacement 470 tonnes), seraient réalisés par ce procédé [16]: les zones concernées sont essentiellement les superstructures et quelques éléments internes [17].

Un des exemples les plus emblématiques de l'emploi de l'infusion dans le domaine naval militaire est sans conteste la réalisation en Suède, de la coque des corvettes Visby par le chantier Kockums à Karlskrona [18]. Ces coques de 72 mètres sont réalisées par

assemblage de panneaux préfabriqués par infusion de renforts carbone

D'autres exemples de réalisation d'éléments des structures composites par infusion existent en Scandinavie sur des programmes de navires anti-mines ou patrouilleurs (voir par exemple [19]).

Aux Etats-Unis, le programme CHSV (Composite High Speed Vessel) a pour but d'évaluer la faisabilité de coques de navires rapides de plus de 90 mètres en matériaux composites ([14] et [15]). Un démonstrateur représentant l'étrave a été infusé. Ce démonstrateur en verre et carbone mesure 24,4 mètres de long, 10,7 m de haut et 18,3 mètres de large.

Toujours aux Etats-Unis, la coque du Stiletto a été réalisée par Knight & Craver pour le



Figure 24 : Coque du Stiletto.

compte de l'Office of Naval Research [19]. Il s'agit d'un navire pentamaran d'un peu moins de 30 mètres, dont la coque a été réalisée par infusion de résine époxy sur des préformes à base de tissus de carbone et de mousse polymérique. Ce démonstrateur est destiné à valider le concept pour des navires rapides de beaucoup plus grande taille.

5.3. Applications DCNS

A DCNS, les applications intégrant le procédé d'infusion sous vide se multiplient depuis quelques années, tant pour les pièces de dimensions limitées que pour les grandes structures, et ceci tant dans le domaine des bâtiments de surface que dans celui des sous-marins.

A titre d'illustrations voici quelques exemples significatifs :

Ogives en croix pour propulseur de Frégates



Pièces en cours d'infusion



Préparation du collage des 4 éléments



Ogives terminées

Figure 25 :

Carénages d'antennes latérales de sous-marins



Figure 26 : Vue d'ensemble



Pièce d'extrémité



Pièce de jonction après démoulage



Pièces de jonction après détourage et perçage (prêtes à être livrées)

Figure 27 :

Panneaux de superstructure



Figure 28 : Platelage en cours d'infusion sur le marbre



Figure 29 : Platelage après infusion

Mâture intégrée pour Corvettes

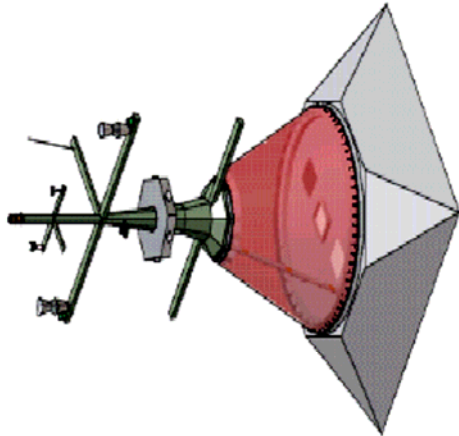


Figure 30 : Vue d'ensemble



Figure 31 : Démonstrateur d'essais radioélectriques

6. CONCLUSION

Le procédé de moulage par infusion a connu au cours de la dernière décennie un développement important dans le domaine des constructions navales militaires, jusqu'à devenir le procédé principal de transformation des composites. Nous avons dans cette communication développé les raisons de ce succès en les illustrant par des exemples d'application à DCNS et par d'autres industriels principalement du domaine militaire. Nous avons également mis en lumière certains aspects du procédé au travers d'un programme de développement mené par DCNS. Malgré certaines contraintes comme l'excellence technique pour la maîtrise du



Figure 32 : Réglage du moule

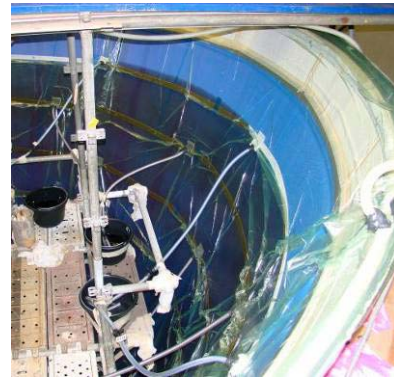


Figure 33 : Vue intérieure du moule durant l'infusion

process pour des pièces complexes, ou l'impact environnemental lié aux nombreux produits d'environnement, il est probable que la technologie d'infusion soit appelée à se développer encore durant les prochaines années. D'une part certains aspects du procédé seront sans doute davantage exploités comme la capacité à intégrer des fonctions de plus en plus complexes au cœur même du composite.

D'autre part une forte synergie existe entre les besoins des transformateurs et l'offre proposée par les fournisseurs de matériaux, de produits d'environnement, d'outils de simulation, ... délivrant la promesse de composites à la fois moins chers, à plus forte valeur technique ajoutée et plus écologiques.

7. REFERENCES

- [1] SPAULDING K.B. – Naval Engineers Journal, April 1966, p 333-342.
- [2] LEMIERE Y. - La Construction Navale en Composites - Colloque IFREMER - Paris - Déc. 1992 - pp 455-464
- [3] CHALMERS D.W.- J.N.E., Vol.30, n°1, p. 65-84.
- [4] SEEMAN W.H. - U.S. PATENT - 5.02.906
- [5] SEEMAN W.H. - U.S.PATENT - 5.316.462
- [6] SEEMAN W.H. - U.S. PATENT - 5.439.635[1]
- [7] P. PARNEIX – D. LUCAS- Matériaux composites en construction navale militaire- Techniques de l'Ingénieur – AM 5660.
- [8] P. PARNEIX – D. LUCAS- Structures composites en construction navale militaire- Techniques de l'Ingénieur – AM 5665.
- [9] Composites international N° 55
- [10] LAZARUS P. - Professional Boat Builder - August / September 1997 - pp 35 - 47
- [11] NGUYEN L.B. - CRITCHFIELD M.O. - International Conference "Advances in Marine Structures III" - DUMFERLINE - Scotland - 20-23 May 1997
- [12] Warship Technology - August 1998
- [13] K.F. MASON, Composite ships: building A New Paradigm. August 2005.
- [14] E. GREEN- Building for the military- The International Boatbuilders International Conference – Miami- October-19-21/2005.
- [15] Reinforced Plastic – April 1998- p 8
- [16] Reinforced Plastic – October 1998- p 10
- [17] S. E. HELLBRATT- Fighting ships augment combat readiness with advanced composites – High performance composites- 9/01/2003.
- [18] A. HJELMSETH –
- [19] N. S^T JOHN- Fibre reinforced composite for naval applications.