
Aide aux choix de procédés de parachèvement des composites

Aude CAILLAUD, Mathieu RITOU, Sébastien GARNIER, Benoît FURET

IUT de NANTES

Département Génie Mécanique et Productique

*Laboratoire IRCCyN (Institut de recherche en Communication et Cybernétique de Nantes) UMR CNRS
2 avenue du Professeur Jean Rouxel 44475 Carquefou*

Benoit.Furet@univ-nantes.fr.

**Sections de rattachement : 60 et 61
Secteur : Secondaire**

RÉSUMÉ : Suite aux étapes de mise en forme d'une pièce en matériau composite, le processus d'élaboration se termine souvent par une phase de finition : c'est ce que l'on appelle le parachèvement, constitué principalement d'opérations de détournage et de perçage. Les procédés de parachèvement disponibles sont nombreux : usinage avec fraises en carbure ou en PCD, avec meules et disques diamantés, découpe au jet d'eau... La difficulté réside dans le fait que de nombreux paramètres permettent de sélectionner le ou les procédés les plus adaptés à la réalisation d'une pièce : la nature du matériau, la géométrie de la pièce ou encore les spécifications qui lui sont associées. Une stratégie a donc été mise en place pour atteindre cet objectif. Elle se base notamment sur la réalisation d'une analyse locale de la pièce qui permet d'associer à chaque entité géométrique, le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à sa réalisation. Deux méthodes ont été mises en concurrence : d'une part, une méthode quantitative se basant sur une modélisation du problème, d'autre part, une méthode qualitative mettant en œuvre la maison de la qualité (House Of Quality). Les résultats obtenus permettent d'obtenir, entité par entité, un classement des procédés exploitables sur des critères objectifs. La poursuite des travaux consistera à globaliser l'approche afin de définir la gamme complète et optimale du parachèvement des pièces composites.

MOTS-CLÉS : usinage, parachèvement, matériaux composites, aide à la décision, gamme automatique.

1 Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans les domaines du nautisme et de l'aéronautique, et suscitent aujourd'hui un intérêt grandissant dans de nouveaux secteurs, notamment grâce aux moyens mis en place pour les rendre compétitifs vis-à-vis des matériaux traditionnels. De la fibre à la pièce finie, de nombreux procédés permettent de mettre en forme les pièces réalisées à partir de ces matériaux. Cependant, une fois mis en forme, il est toujours nécessaire de réaliser une opération d'usinage pour enlever le surplus de matière. Ainsi, il est possible d'obtenir des surfaces fonctionnelles, une dimension précise ou encore une forme voulue, difficilement réalisable voire irréalisable par les procédés de mise en forme des composites. C'est pourquoi le processus d'élaboration des pièces se termine souvent par une phase de finition, constituée principalement d'opérations de détournage et de perçage, voire dans certains cas, de préparation avant peinture : c'est ce que l'on appelle le parachèvement [1].

Les procédés disponibles pour réaliser ce parachèvement sont nombreux : usinage avec fraises en carbure monobloc ou en PCD (Poly Cristallin Diamond), usinage avec des meules ou des disques diamantés, découpe au jet d'eau... La difficulté réside dans le fait que de nombreux paramètres doivent être pris en compte afin de sélectionner le ou les procédés les plus adaptés à la réalisation d'une pièce : la nature du matériau (fibre, résine, séquence de drapage...), la géométrie de la pièce (dimensions...)

ou encore les spécifications qui lui sont associées (défauts maxi d'écaillage, état de surface...) [2]. Or, peu de personnes maîtrisent l'ensemble des connaissances pratiques et technologiques associées aux différents procédés, nécessaires pour effectuer un choix optimum qui intègre la pièce dans sa globalité. La sélection du ou des procédés de parachèvement est devenue un enjeu technique et économique de plus en plus difficile et risqué. En outre, des choix erronés auront de graves conséquences sur l'intégrité et la qualité de la pièce, ainsi que sur la productivité et les coûts de réalisation associés.

L'objectif des travaux est donc de présenter une méthodologie permettant de mettre en concurrence les différents procédés de parachèvement envisageables, aux travers de critères de choix. Ainsi, une stratégie en trois points dont le but est d'associer à une pièce, le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à sa réalisation, a été mise en place. Celle-ci sera présentée puis développée à travers deux méthodes : d'une part, une méthode quantitative ; d'autre part, une méthode qualitative mettant en œuvre la maison de la qualité (HOQ : House Of Quality). Cette présentation s'appuiera sur des exemples industriels. Des perspectives à ces travaux seront ensuite proposées. Mais, tout d'abord, les difficultés associées à l'usinage de matériaux composites vont être présentées.

2 Introduction au parachèvement de matériaux composites

Aujourd'hui, l'amélioration constante des caractéristiques des composites implique la maîtrise des techniques d'usinage qui leur sont associées [3]. De nombreux procédés de parachèvement ont été mis à l'essai ces dernières années pour analyser leurs potentiels et leurs performances face aux spécificités des composites [4]. Ils sont souvent classés en deux familles [5] [6].

La première catégorie comprend les procédés dits « mécaniques » ou « conventionnels ». Ils consistent à enlever la matière sous forme de copeaux, plus précisément de poussières dans le cas des composites, à l'aide d'un outil monté sur une broche en contact direct avec la pièce. Les fraises en carbure ou en PCD, les disques diamantés et les meules diamantées intègrent cette catégorie.

Cependant, ces procédés, utilisés pour certains dans le cadre de l'usinage de matériaux métalliques, rencontrent bien des limites. Effectivement, les caractéristiques des matériaux composites sont très différentes de celles des métaux : ce sont des matériaux à fort pouvoir abrasif, qui provoquent une usure prématurée des outils. De plus, leur hétérogénéité provoque la création de nombreux défauts, tels que le délaminage, l'écaillage ou encore les plis non coupés francs (Figure 1) [7]. Ces diverses limitations sont la cause de l'émergence actuelle, dans le domaine du composite, d'une nouvelle catégorie de procédés : les procédés d'usinage « avancés », tels que la découpe au jet d'eau, au laser ou la découpe par ultrasons. Dans ce cas, les outils ne sont pas animés d'un mouvement de rotation. Les efforts mis en jeu pour réaliser ces opérations de parachèvement sont beaucoup plus faibles, les moyens mis en œuvre moins puissants et les déchets créés beaucoup moins nombreux.



Figure 1. Défauts d'écaillage (à gauche) et de délaminage (à droite).

Parmi les procédés avancés, la découpe au jet d'eau est celle qui est aujourd'hui la plus utilisée industriellement. Effectivement, la découpe au laser connaît des limitations technologiques : la température nécessaire à la vaporisation des fibres nécessite des températures importantes (de 900°C à plus de 3000°C selon leur nature). La matrice, qu'elle soit thermoplastique ou thermodurcissable, ne résiste pas à cette température élevée et est par conséquent dégradée localement [8]. En ce qui concerne le procédé de découpe par ultrasons, celui-ci est utilisé exclusivement pour les matériaux crus, mi-cuits (c'est-à-dire non polymérisés), voire cuits, avec des vitesses d'avance et/ou des

épaisseurs relativement faibles. Certains travaux de notre équipe de recherche portent justement sur l'amélioration des procédés de découpe, d'usinage et de parachèvement spécifiques aux composites.

Les divers procédés présentés précédemment possèdent tous des caractéristiques spécifiques d'exploitation. Différents paramètres vont nous permettre d'effectuer un choix adapté à une application donnée. Certains sont liés aux matériaux comme la nature des fibres (direction et répartition, taux de fibre), la nature de la matrice ainsi que le procédé de mise en forme de la pièce. Mais les procédés de parachèvement ont aussi une influence dans ce choix, notamment à travers leurs paramètres de réglage, leurs limitations (vitesse d'avance et épaisseur maxi des pièces...) et la qualité qu'ils permettent d'obtenir. Par exemple, les outils PCD permettent de réaliser de meilleurs états de surface dans les composites en fibres de carbone que les meules diamantées. Ou encore, la vitesse d'avance associée à la découpe d'un composite en fibres de verre est deux fois plus importante avec un disque diamanté qu'avec un jet d'eau, ce qui permet d'augmenter considérablement la productivité.

L'ensemble de ces considérations techniques a donc été compilé dans une base de données « procédés ». Celle-ci synthétise des informations relatives notamment aux conditions de coupe associées aux différents procédés de parachèvement, issues d'expériences industrielles et de nos propres essais [9]. Cette base de données sera utilisée dans la suite de notre étude.

3 Présentation de la stratégie adoptée

3.1 Objectifs de l'étude

Comme nous venons de le préciser, les procédés de parachèvement exploitables industriellement sont nombreux, ce qui rend leur sélection difficile. L'objectif de nos travaux de recherche est donc de trouver le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à la réalisation d'une pièce, au vu des caractéristiques recherchées.

3.2 Données d'entrée

Afin d'obtenir potentiellement une solution multi-procédés, il est nécessaire de partir initialement non pas de la pièce dans sa globalité, mais des entités à parachever qui la composent (Figure 3). Ainsi, pour chacune d'elles, un classement des procédés de parachèvement répondant au mieux aux critères d'usinabilité à optimiser (temps, coût, qualité...) pourra être trouvé.

L'approche proposée est dédiée à la détermination de procédés de parachèvement pour des pièces en matériaux composites. Les opérations d'usinage prises en compte sont donc essentiellement des opérations de détournage et de perçage. C'est pourquoi seulement deux types d'entités d'usinage [10] sont considérés ici : les contours et les perçages. Dans les deux cas, il est nécessaire de recueillir les caractéristiques qui définissent ces entités. Une liste de onze caractéristiques a été retenue pour les contours et huit pour les perçages, de sorte qu'elles soient discriminantes lors du choix du procédé le plus adapté (Tableau 1). Dans le cas de la découpe d'un contour, une nouvelle entité d'usinage est créée dès qu'une caractéristique diffère localement. En effet, le choix du procédé de parachèvement est fonction de ces différentes caractéristiques. Si l'une d'elles est modifiée, le procédé sélectionné sera potentiellement différent. En ce qui concerne les opérations de perçage, chaque trou est considéré comme une entité d'usinage.

Prenons quelques exemples. Dans le cas d'un perçage, il est nécessaire de savoir si le trou à réaliser est débouchant ou non. S'il ne l'est pas, certains procédés tels que la découpe au jet d'eau, au fil diamanté ou au laser doivent être mis de côté. En ce qui concerne les contours, il est important de connaître la courbure et la concavité des surfaces à détourner. Ainsi, le procédé disque diamanté sera peut-être éliminé. Si la surface est concave et que le rayon de courbure minimum est très faible (moins de 3 mm environ), alors les meules diamantées, outils PCD et carbure ne seront pas adaptés à sa découpe.

	Entité <i>contour</i>	Entité <i>perçage</i>
Matériau	Nature du matériau détourné	Nature du matériau percé
Géométrie	Longueur Epaisseur Concavité Rayon de courbure Contour extérieur ou intérieur	Rayon Profondeur Trou débouchant ou non
Topologie	Point de départ Point d'arrivée Présence d'une surface en arrière-plan	Centre du perçage Présence d'une surface en arrière-plan
Qualité géométrique	Tolérances dimensionnelles Rugosité	Tolérances dimensionnelles Rugosité

Tableau 1. Caractéristiques descriptives des entités de parachèvement.

L'ensemble des entités d'usinage de la pièce, ainsi que les informations associées à chacune d'elles (tableau précédent dûment complété) constituent les données d'entrée de notre système. Elles sont extraites de la maquette numérique de la pièce. Dans notre cas, la collecte de ces données a été réalisée manuellement, mais elle pourra être automatisée à l'avenir.

3.3 Stratégie de résolution

La problématique peut être formalisée sous la forme du schéma suivant (Figure 2). Afin de déterminer le processus de parachèvement de la pièce (couple procédé-outil, ressource et conditions opératoires associées à chaque entité de fabrication), un outil d'aide à la décision est proposé. Il repose sur une stratégie en trois points : la réalisation successive d'une analyse locale, d'une analyse topologique, puis d'une analyse globale. Cette stratégie permet d'aboutir à un choix optimisé et potentiellement multi-procédé.

La première étape consiste à effectuer une analyse locale de la pièce. Il s'agit d'étudier chacune des entités d'usinage qui composent la pièce, indépendamment les unes des autres afin de déterminer quels procédés de parachèvement sont souhaitables. Différentes données caractérisent ces entités : la nature du matériau, la géométrie de la pièce (dimensions, accessibilité), la qualité (tolérances géométriques, spécifications dimensionnelles, rugosité) et la topologie (position de l'entité, appartenance à un contour...). En fonction de ces données, l'objectif est de classer pour chaque entité, les procédés de parachèvement selon différents critères (capabilité, coût et temps de réalisation) et d'écarter les procédés incompatibles. Pour cela, une base de données relative aux procédés de parachèvement est utilisée (conditions de coupe, limites des procédés...). Afin de réaliser cette étape, une méthode quantitative et une méthode qualitative ont été mises en place et testées en parallèle.

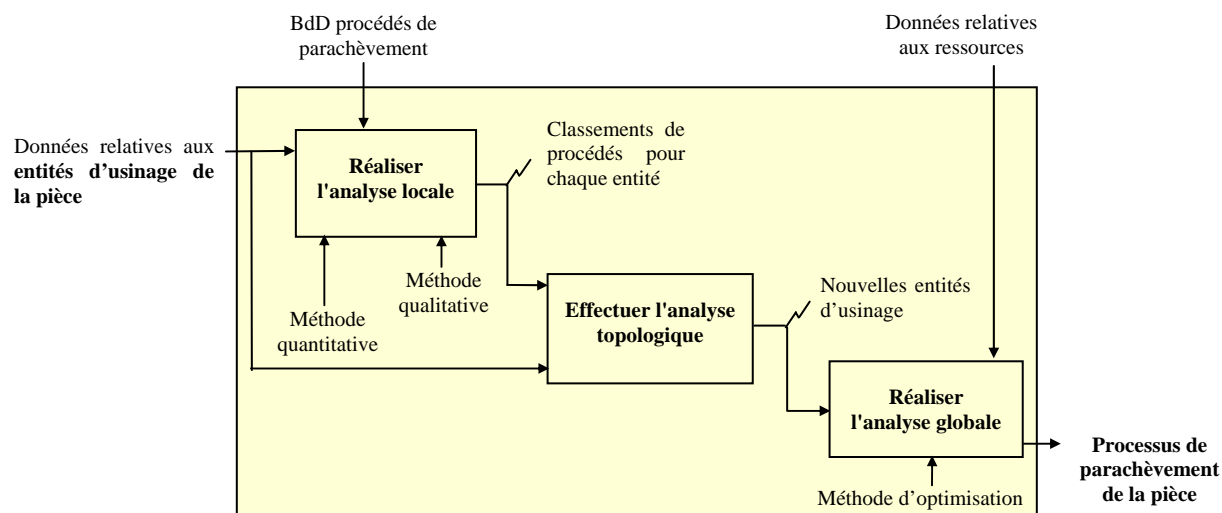


Figure 2. Schématisation de la stratégie choisie.

La seconde étape consiste à réaliser une analyse topologique. Celle-ci a pour objectif de regrouper les entités d'usinage entre elles afin de simplifier le problème en diminuant le nombre d'entités à traiter. Dans le cas des entités contours par exemple, si deux entités sont adjacentes et ont obtenues les mêmes classements de procédés lors de l'analyse locale, alors elles sont regroupées pour ne former qu'une seule et nouvelle entité d'usinage [10].

Enfin, la dernière étape, qui ne sera pas traitée dans cette article, consistera à réaliser une analyse globale de la pièce qui permettra de prendre en compte également l'enchaînement de la réalisation des entités, avec notamment les changements d'outils (ou de procédés) et les changements de posages. En effet, l'analyse locale permet d'avoir une approche seulement partielle de la fabricabilité puisqu'elle se situe à un niveau de décision lié uniquement à l'entité. Ce n'est pas suffisant pour optimiser le processus de parachèvement de l'ensemble d'une pièce composite. L'analyse globale sera donc nécessaire pour prendre en compte l'enchaînement de la réalisation des entités, en intégrant l'ensemble des données relatives à la pièce, aux procédés, ainsi qu'aux ressources (changements d'outils et de posages, cadence machine...). Le tout sera basé sur une exploitation automatique et semi-automatique s'intégrant à la chaîne numérique CAO-FAO-GPAO-MAO.

3.4 Limites de l'étude

Les travaux effectués se limitent au parachèvement de pièces composites à matrice organique. Les opérations d'usinage prises en compte sont essentiellement des opérations de détournage et de perçage. Les couples procédés-outils envisagés pour les réaliser sont les suivants :

- P : Outil PCD
- C : Outil Carbure
- M : Meule diamantée
- D : Disque diamanté
- J : Jet d'eau
- L : Laser

Par la suite, différents matériaux et procédés de parachèvement pourront être ajoutés à notre étude.

3.5 Présentation des cas d'étude

Afin de vérifier la validité de notre stratégie, celle-ci a été testée sur deux cas d'études industriels (Figure 3) :

- un plan vasque en matériau composite : fibres de verre et résine polyester insaturé ;
- une pointe avant d'avion en matériau composite : fibres de carbone et résine époxy.

Ce type de pièce est représentatif des applications de parachèvement de pièces en matériaux composites. Elles ont été choisies dans l'optique de balayer un maximum de situations, en termes de matériaux, formes (surfaces planes pour l'une, plutôt courbes pour la seconde) et dimensions (170x550x950 mm pour l'évier, 4000x4000x5800 mm pour la pointe avant d'avion).

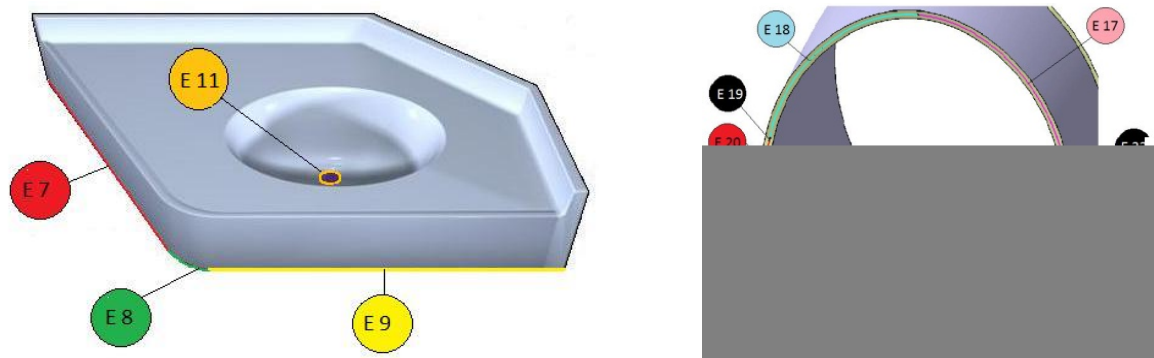


Figure 3. Les différentes entités géométriques des pièces tests

4 Méthode d'analyse locale

A partir des données d'entrée du problème, la première étape consiste à réaliser l'analyse locale. L'objectif est de classer pour chaque entité, les procédés de parachèvement selon différents critères d'usinabilité, et d'écarter les procédés incompatibles. Deux méthodes d'analyses locales ont été menées en parallèle afin de comparer les résultats obtenus.

4.1 Méthode quantitative

La méthode quantitative proposée se base sur deux fonctions qui permettent d'obtenir, pour chaque entité i de la pièce réalisée par le procédé j , un indice de temps T_i^j et un indice de coût de fabrication C_i^j . Pour cela, en fonction des caractéristiques de chaque entité, des conditions opératoires sont déterminées, et ce pour chaque procédé de parachèvement envisagé. Ces conditions permettent de calculer les deux indices de temps et de coût, qui qualifient les procédés pour chaque entité.

De nombreux auteurs utilisent ce type de méthode pour évaluer les temps et les coûts de fabrication d'une pièce. Les fonctions mises en place atteignent des niveaux de complexité différents en fonction des paramètres pris en compte. Certains intègrent seulement le temps et le coût de fabrication (occupation machine) [11] [12], d'autres y ajoutent le coût des outils, de la matière première utilisée et des frais fixes [13]. Pour finir, certains modèles, travaillant à partir d'entités de fabrication, intègrent les coûts de manutention et de préparation des outils de production entre la réalisation de deux entités [14].

4.1.1 Critère de temps : T_i^j

L'objectif étant de départager les différents procédés de parachèvement entre eux, les temps d'approche et de dégagement de l'outil, pratiquement similaires quelque soit le procédé de parachèvement utilisé, sont ici négligés. Les temps de chargement et de déchargement de l'outil sont également mis de côté au niveau de l'analyse locale puisqu'on ne sait pas quel sera l'enchaînement des entités dans la gamme de fabrication finale. Seul le temps de fabrication T_i^j est donc pris en compte. Afin de le calculer, deux catégories de procédés ont été envisagées (Tableau 2) : ceux permettant de réaliser l'entité en une seule passe comme le jet d'eau, et ceux nécessitant éventuellement plusieurs passes, comme les outils PCD... En ce qui concerne la réalisation des perçages, deux stratégies sont adoptées : si le diamètre est inférieur à 25 mm, un perçage au foret sera effectué ; s'il est supérieur, une stratégie de perçage hélicoïdal sera utilisée (le calcul est alors similaire à un contournage).

	TEMPS DE FABRICATION	COÛT DE FABRICATION
CONTOURNAGE	En plusieurs passes : outils PCD, carbures, meules et disques diamantés	
	$T_i^j = \frac{L_i}{Vf_d^j} \cdot \text{arrondi sup} \left(\frac{ap_j}{e_i} \right)$	$C_i^j = T_i^j \cdot C_H^j + \frac{L_i \cdot C_O^j}{L_T^j} \cdot \text{arrondi sup} \left(\frac{ap_j}{e_i} \right)$
	En une seule passe : jet d'eau, laser	
	$T_i^j = \frac{L_i}{Vf_d^j}$	$C_i^j = T_i^j \cdot C_H^j$
PERÇAGE	Outils PCD, carbures, meules et disques diamantés	
$\emptyset < 25\text{mm}$	$T_i^j = \frac{P_i}{Vf_p^j}$	$C_i^j = T_i^j \cdot C_H^j + \frac{P_i \cdot C_O^j}{L_T^j}$
$\emptyset > 25\text{mm}$	Idem contournage avec $L_i = \pi \cdot d_i$	
	Jet d'eau, laser	
	Idem contournage avec $L_i = \pi \cdot d_i$	

Tableau 2. Calculs des indices de temps de fabrication T_i^j et de coût de fabrication C_i^j associés à l'entité i réalisée par le procédé j .

Avec :

- L_i longueur de l'entité i
- e_i épaisseur de l'entité i à découper
- p_i profondeur du perçage
- d_i diamètre du perçage
- Vf_d^j vitesse d'avance du procédé j en découpe
- Vf_p^j vitesse d'avance du procédé j en perçage
- ap_j profondeur de passe maximum réalisable avec le procédé j
- L_r^j longueur réalisable avec l'outil associé au procédé j avant usure
- C_H^j coût horaire de la machine (coût machine, coût main d'œuvre ...)
- C_O^j coût outil associé au procédé j

4.1.2 Critère de coût : C_i^j

Le critère de coût C_i^j proposé intègre deux composantes : le coût de l'outil ainsi que le coût horaire de la machine, qui inclut le coût de la main d'œuvre et le coût d'investissement de la machine. Le coût horaire est associé non seulement au procédé de parachèvement, mais également au nombre d'axes nécessaires pour réaliser la pièce (coût horaire d'une machine 3 axes inférieur à celui d'une machine 5 axes). Dans le cas de la découpe jet d'eau ou laser, les coûts associés à l'usure de l'outil sont considérés comme inexistant. Le coût de la buse est donc intégré dans le coût horaire.

La méthode quantitative est relativement simple à mettre en place. Le travail le plus laborieux est de constituer la base de données sur les conditions de coupe associées aux différents matériaux composites. Dans notre étude, elle a été mise en place à partir d'essais et de données issues de la littérature et de données expérimentales issues de partenariats industriels. Son principal avantage est d'être facilement exploitable et compréhensible par les divers utilisateurs puisque les indices obtenus (temps et coût de fabrication) sont continuellement utilisés dans les entreprises.

4.2 Méthode quantitative : House Of Quality

En 1972, la méthode « Quality Function Deployment » (QFD) a été développée par Akao afin d'améliorer le processus de développement d'un nouveau produit, à travers la satisfaction des clients. Parmi les nombreux outils appartenant à cette méthode, le plus connu est celui de la maison de la qualité (HOQ : House Of Quality), se représentant sous la forme d'une matrice (Figure 4). Au sein d'une équipe pluridisciplinaire, la mise en place de cet outil consiste à établir et évaluer les relations entre le besoin des clients et les caractéristiques du produit. Ainsi, l'écart entre le service souhaité et le service rendu peut être mesuré, ce qui permet de mettre en place des actions correctives [15].

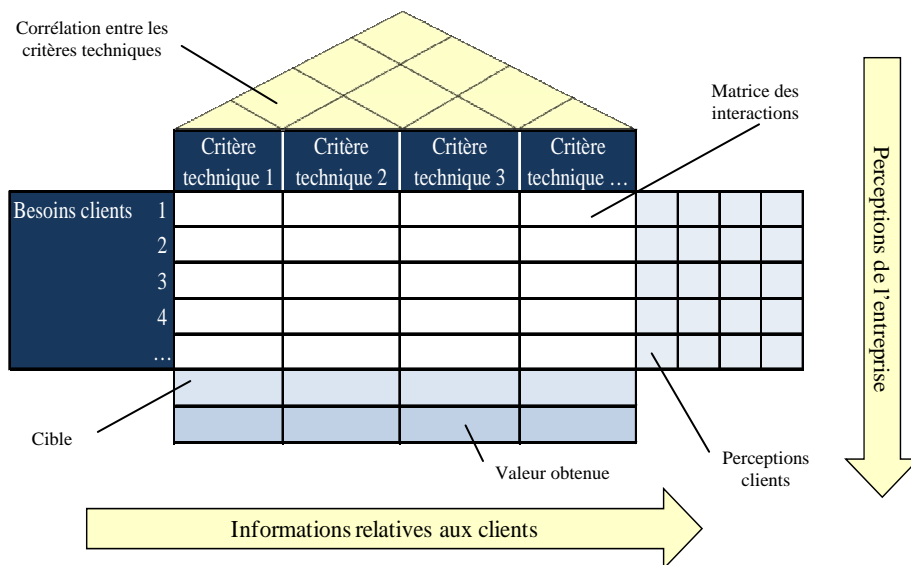


Figure 4. Maison de la qualité initiale.

Tout comme Lowe [16] et Shankar [17], cet outil d'aide à la décision a été adapté afin de classer les différents procédés de parachèvement entre eux, et ce pour chaque entité. Pour cela, différentes simplifications ont été effectuées au niveau de la forme globale de la HOQ (Tableau 3). Les besoins clients correspondent ici aux caractéristiques de la pièce à réaliser et les caractéristiques techniques aux critères de sélection des procédés. La matrice des interactions reste elle présente de même que le calcul du résultat final.

4.2.1 Utilisation de l'outil HOQ : point de vue de l'utilisateur

La méthode HOQ est relativement transparente pour l'utilisateur. Effectivement, une fois les données relatives aux entités renseignées, une HOQ est mise en place pour chacune des entités associées à chacun des procédés de parachèvement (Tableau 3). L'utilisateur remplit la colonne correspondant aux caractéristiques de l'entité, et la note associée est automatiquement calculée.

Entité 20 - Outil carbure			COMMENT : critères de choix des procédés			
			Capabilité	Coût	Rapidité	
			1	1	1	
QUOI : caractéristiques entité	Matériau	carbone/epoxy	3	3	1	
	Longueur	999	1	1	1	
	Epaisseur	2,2	1	1	3	
	Rayon minimum	6029	1/3	3	3	
	Concave-Convexe	concave				
	Contour ext / int	extérieur	1/3	3	3	
	Surf. arrière plan	non	1/3	3	3	
	Tolérances dim.	1,6	1,5	5	3	3
	Rugosité	10	1,5	5	3	3
			33	23	19	
			COMBIEN : Note par critère			
			75			
			Résultat			

Tableau 3. Maison de la qualité associée à l'entité 20 de la pointe d'avion réalisée par outil carbure

Afin d'aboutir à ce résultat, deux éléments ont été construits : un outil d'évaluation pour formaliser clairement le problème, ainsi qu'une base de données. Celle-ci permet de synthétiser les informations issues d'expériences industrielles, relatives notamment aux conditions de coupe associées aux différents procédés de parachèvement. La démarche permettant d'aboutir à ce résultat va maintenant être présentée.

4.2.2 Construction de l'outil d'évaluation : point de vue de l'expert

a) Caractéristiques entités et coefficients associés

Les caractéristiques entités mises en place dans l'étude sont au nombre de neuf pour les contours et six pour les perçages (Tableau 4). Elles constituent des critères de choix pour sélectionner un procédé de parachèvement ou le discriminer. Afin d'éviter toute redondance dans l'analyse, elles ont été choisies pertinemment par une équipe d'experts afin d'assurer qu'elles ne se corrèlent pas.

		Les contours	Coef.	Les perçages	Coef.
Matériau	/3	Matériau	3	Matériau	3
Géométrie	/3	Longueur	1	Profondeur	1
		Epaisseur	1	Diamètre	1
		Rayon minimum	1/3	Débouchant et pas de surface en arrière plan	1
		Concave-convexe-plan			
		Contour extérieur / intérieur	1/3		
		Surface en arrière plan ou non	1/3		
Qualité	/3	Tolérances dimensionnelles	3/2	Tolérances dimensionnelles	3/2
		Rugosité	3/2	Rugosité	3/2

Tableau 4. Coefficients associés aux caractéristiques entités.

Elles sont regroupées en trois classes distinctes : matériau, géométrie et qualité. Des coefficients de pondération sont affectés à chacune des caractéristiques, au sein même de ces catégories, afin d'équilibrer l'importance de chacune d'elles (Tableau 4).

b) Critères procédés et coefficients associés

Les critères procédés permettent de vérifier si les procédés sont en mesure de répondre aux exigences des caractéristiques de l'entité considérée. Trois critères ont été mis en place dans l'étude : la capabilité, le coût et la rapidité d'exécution (similaire au triptyque Qualité-Coût-Délai). Le choix restrictif de ces critères a été effectué de sorte à éliminer les éventuelles corrélations entre les différents critères. Des coefficients de pondération, attribués par l'utilisateur, permettent de mettre en avant l'objectif principal de la recherche ; par exemple, s'il souhaite trouver une solution qui permet de réaliser la pièce en un minimum de temps, il affectera un coefficient plus important à ce critère.

c) Matrice des interactions

La matrice des interactions établit la relation entre les caractéristiques de l'entité et les critères d'évaluation des procédés. Elle se remplit avec des symboles ou des valeurs qui permettent d'indiquer à quel degré chaque critère contribue à la satisfaction de chaque caractéristique. Dans notre étude, des chiffres sont utilisés pour simplifier l'analyse des résultats (Tableau 5). Un « 0 » signifie que le procédé n'est pas capable de réaliser l'entité considérée ce qui implique son élimination immédiate.

Echelle de valeurs	Signification
0	élimination du procédé
1	peu adapté
3	moyennement adapté
5	très adapté

Tableau 5. Echelle de notation.

Les éléments concernant la méthode de remplissage de cette matrice seront vus dans la partie suivante. Précisons tout de même que la base de données qui permet ce remplissage est établie une fois pour toute par des experts. Le remplissage de la matrice est ensuite automatique. Tout cela est donc transparent pour l'utilisateur.

4.2.3 Construction et remplissage de la base de données

L'ensemble de la matrice des interactions se remplit à partir d'une base de données. C'est la clé de voûte de la méthode. Elle synthétise des informations issues de l'expérience industrielle, relatives notamment aux conditions opératoires associées aux différents procédés de parachèvement. Deux bases de données différentes ont été créées : une pour les entités à détourer et une pour les perçages.

La première étape consiste à créer différents niveaux pour chaque caractéristique entité (Tableau 6). Ces niveaux correspondent à des plages de valeurs, sauf pour les données binaires, ce qui assure l'unicité d'appartenance à un niveau.

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Matériau	verre/époxy	verre/polyester	carbone/époxy
Longueur (mm)	$L < 100$	$100 < L < 500$	$500 < L$
Epaisseur (mm)	$E < 5$	$5 < E < 15$	$15 < E$
Tolérances dim. (mm)	$IT < 0,1$	$0,1 < IT < 0,5$	$0,5 < IT$
Rugosité (um)	$Ra < 5$	$5 < Ra < 12$	$12 < Ra$
Contour int. / ext.	Contour extérieur	Contour intérieur	
Surf. arrière-plan	Oui	Non	

Tableau 6. Niveaux des caractéristiques pour les entités à détourer.

La seconde étape consiste à remplir la base de données. Toutes les configurations entre les caractéristiques entités et les critères procédés doivent être renseignées. Pour chacun de ces couples, une note doit être attribuée. Plus le procédé est adapté à la réalisation de la caractéristique de l'entité, plus la note est importante (Tableau 5). Tout le système de notation se base sur des valeurs relatives : les procédés sont évalués les uns par rapport aux autres. Un tableau similaire au tableau 7 doit être renseigné par les experts pour chaque caractéristique entité. L'exemple présenté (partie grisée) indique que l'outil carbure 'C' est peu adapté à la réalisation d'une entité de plus de 500 mm de longueur (note de '1'), contrairement au disque qui lui serait un choix optimisé selon ce même critère (note de '5').

		Critères procédés																	
		CAPABILITE					COUT					RAPIDITE D'EXECUTION							
		Procédés																	
LONGUEUR		P	C	J	M	D	L	P	C	J	M	D	L	P	C	J	M	D	L
		L < 100	5	3	3	3	3	3	1	3	3	5	5	3	5	3	3	5	1
100 < L < 500	5	3	3	3	3	3	1	1	3	3	5	3	3	1	3	3	5	3	
500 < L	5	3	3	3	3	3	1	1	3	3	5	3	1	1	1	3	5	1	

Tableau 7. Extrait de la base de données concernant la caractéristique longueur.

Le remplissage de ces différentes cases a été effectué par un groupe de travail, à travers des recherches personnelles sur les procédés de parachèvement, mais également lors de discussions. Il nécessite une méthode de réflexion rigoureuse.

4.2.4. Remplissage de la matrice des interactions

Une fois la base de données complétée par les experts, l'utilisateur doit seulement extraire les caractéristiques des différentes entités de la pièce, puis automatiquement les HOQ sont générées pour chacune des entités. Prenons l'exemple de la HOQ associée à l'entité 20 de la pointe avant d'avion réalisée par un outil carbure (Tableau 3 et Figure 3). La longueur de cette entité est supérieure à 500 mm ; la note de « 1 » est donc attribuée à l'interaction entre « longueur » et « rapidité d'exécution », si l'on se réfère à la base de données correspondante (Tableau 7).

Une fois la matrice remplie, le calcul de la note finale se fait automatiquement. Pour cela, les valeurs présentes dans la matrice des interactions sont pondérées par les différents coefficients (caractéristiques entités et critères procédés) avant d'être sommées pour donner le résultat final. Celui-ci permet de quantifier la capacité du procédé à réaliser une entité. Plus la note est importante, et plus le procédé est adapté à sa réalisation.

4.3 Validation des méthodes qualitatives et quantitatives

Les deux méthodes d'analyses locales ont été testées sur deux cas d'études industriels : l'évier et la pointe avant d'avion. Les résultats obtenus permettent d'associer un procédé de parachèvement à chaque entité géométrique. Le tableau 8 présente les résultats obtenus pour l'entité n°20 de la pointe avant d'avion. L'outil le plus apte à la réaliser est donc la meule diamantée. En effet, la note obtenue avec la méthode HOQ est la plus forte, et les indices de temps et de coût de fabrication obtenus avec la méthode de modélisation sont les plus faibles.

La méthode HOQ, contrairement à la méthode de modélisation, permet d'éliminer les procédés qui ne sont pas capables de réaliser l'entité. C'est le cas, pour l'exemple présenté, du disque qui ne peut réaliser une surface concave ; ainsi que du laser qui ne peut usiner un matériau carbone-époxy d'une épaisseur de 2,2 mm. Une fois ces procédés mis de côté, on peut constater que, quelle que soit la méthode utilisée, les classements obtenus en fonction des temps et des coûts de fabrication sont identiques, exception faite d'un cas. En effet, avec la méthode quantitative, le procédé PCD est plus performant que le procédé meule selon le critère de temps, alors que la méthode HOQ les juge

équivalent. On notera tout de même une faible différence entre les deux valeurs obtenues par la méthode quantitative, compte tenu de l'étendue des valeurs obtenues par les autres procédés. On considèrera l'écart comme non significatif.

Entité 20		Procédé de fabrication					
		Carbure	PCD	Meule	Disque	Laser	Jet d'eau
Modélisation	Temps production (en sec)	74,9	8,6	9,2	15	20	19,3
	Coût production (en €)	19,9	216,3	1	0,7	1,1	1,07
HOQ	Rapidité d'exécution	19	33,7	33,7	0	0	25
	Coût	23	22,3	35,7	0	0	27,7
	Capabilité	33	41,7	350	0	0	27
	Capa + Coût + Rapidité	75	97,7	99,4	0	0	79,7

Tableau 8. Résultats obtenus suite à l'analyse locale de l'entité 20 de la pointe avant d'avion

Cette étude a été effectuée sur l'ensemble des entités des deux pièces tests, soit onze entités pour le lavabo et quatre-vingt quatorze pour la pointe avant d'avion (Figure 5). Les résultats montrent une adéquation entre les deux méthodes sur l'ensemble des entités traitées, et ce, quelle que soit leur nature : contour ou perçage, matériau à base de fibres de verre ou de fibres de carbone... Ceci permet donc de valider la pertinence des éléments mis en place pour la sélection de procédés, même si le critère capabilité ne peut pas être comparé.

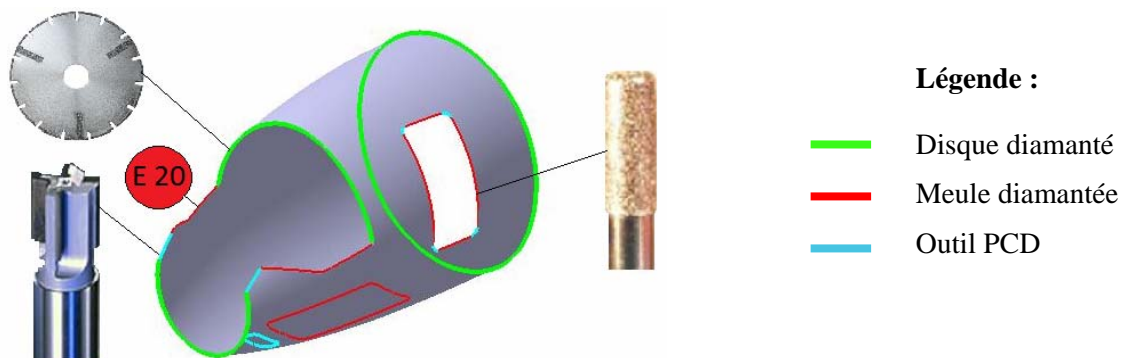


Figure 8. Résultat obtenu suite à l'analyse locale de la pointe avant d'avion

Une observation importante peut être effectuée sur la figure 6. Les résultats de l'analyse topologique, la seconde étape de la méthode, sont immédiats une fois l'analyse locale réalisée. Dans le cas étudié, les entités géométriques 'contours', initialement au nombre de soixante-dix seront rassemblées en dix-sept entités de fabrication pour la suite de l'étude (trois groupes 'disque', sept groupes 'meules' et sept groupes 'PCD').

5 Conclusion et perspectives

Les travaux effectués ont pour objectif de proposer une méthode d'aide à la décision permettant de choisir le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à la réalisation de pièces en matériaux composites. Pour répondre à cet objectif, une stratégie en trois étapes a été mise en place. Tout d'abord, l'analyse locale a été réalisée sur chaque entité. Deux méthodes ont alors été testées : une méthode quantitative (basée sur l'utilisation de fonctions) et une méthode qualitative (HOQ). Leur objectif est de classer l'ensemble des différents procédés de parachèvement entre eux, selon différents critères. Ces deux méthodes se basent sur une base de données procédés, mise en place par des experts, et basée sur leurs expériences industrielles. Elles montrent une adéquation des résultats obtenus ce qui permet de valider la pertinence des éléments mis en place. Un intérêt particulier est à souligner pour l'approche mise en place avec la méthode HOQ : elle permet une intégration plus facile des règles métiers. Ainsi, les procédés incompatibles sont écartés et la ou les causes d'une mauvaise

note (ou de son élimination) peuvent être identifiées. De plus, le résultat obtenu est homogène, contrairement à la méthode de modélisation avec laquelle on obtient deux indices dépendants (le calcul du coût prend en compte le temps de fabrication) qui s'expriment de surcroît dans des unités différentes. Pour finir, la simplicité d'utilisation des deux méthodes d'analyses locales est à souligner : l'utilisateur n'a pas besoin de connaissances spécifiques pour la mettre en œuvre. De plus, une grande flexibilité est offerte : la base de données est facilement modifiable en cas d'évolution des procédés de parachèvement ; de nouveaux procédés peuvent également être ajoutés si de nouvelles technologies de détournage ou de perçage sont mises au point.

Une fois l'analyse locale réalisée, l'analyse topologique est mise en œuvre. Son objectif est de regrouper les entités d'usinage entre elles afin de simplifier le problème en diminuant le nombre d'entités à traiter. Le problème d'optimisation globale du processus de parachèvement de la pièce est ainsi simplifié. Il sera mis en place prochainement dans la troisième étape de notre stratégie : l'analyse globale. Cette dernière prendra en compte l'enchaînement de la réalisation des entités, en intégrant l'ensemble des données relatives à la pièce, ainsi que les changements d'outils et de posages. Ainsi, l'optimisation du parachèvement sera effectuée en considérant la pièce dans sa globalité.

Références

- [1] B. FURET, B. JOLIVEL, D. LE BORGNE, "Milling and drilling of composite materials for the aeronautics: feature aeronautics", JEC Composite, N°18, 2005.
- [2] A. DESSARTHE, "Usinage des composites", Techniques de l'ingénieur, AM5215, Octobre 1997.
- [3] R. TETI, "Machining of composite materials", Annals of the CIRP, Vol. 51 n°2, 2002.
- [4] B. FURET, "Les dernières avancées en détournage des pièces composites", Cetim, Senlis, 2008.
- [5] S. CHAYOUKHI, Z. BOUAZIZ, A. ZGHAL, "Cost estimation of joints preparation for GMAW welding process using feature model", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 199, p. 402-411, 2008.
- [6] M.A. AZMIR, K. AHASAN, "Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining", Journal of Materials Processing Technology, 2007.
- [7] J. RAMKUMAR, S.K. MALHOTRA, R. KRISHNAMURTHY, "Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 152, p. 329-332, 2004.
- [8] S. MAZUMDAR, "Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering", CRC Press, 2002.
- [9] PROGRAMME UGV ALU-COMPOSITE, "www.ugv-alu-composites.com", 2008.
- [10] P. BOURDET, "Introduction générale à la conception automatique de gammes d'usinage", La gamme automatique en usinage, Groupe GAMA, Editions Hermes, 1990.
- [11] F. GILLOT, "Méthodologie de conception et de fabrication d'outillages prototypes hybrides", Thèse, 2006.
- [12] P. MAROPOULOS, R. BAKER, K. PARAMOR, "Integration of tool selection with design - Part 2: Aggregate machining time estimation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 107, p.135-142, Novembre 2000.
- [13] A. ESAWI, M. ASHBY, "Cost based ranking for manufacturing process", Proceedings of the Second International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME98), Compiegne, Vol. 4, p. 1001-1008, Mai 1998.
- [14] F. H'MIDAA, P. MARTIN, F. VERNADAT, "Cost estimation in mechanical production: The Cost Entity approach applied to integrated product engineering", Int. J. Production Economics, Vol. 103, p. 17-35, Août 2005.
- [15] Y. AKAO, "Quality Function Deployment", Productivity Press, Cambridge, MA, 1990.
- [16] A. LOWE, K. RIDGWAY, H. ATKINSON, "QFD in new production technology evaluation", International Journal Production Economics, Vol. 67, pp. 103-112, 1999.
- [17] C. SHANKAR, D. SAMMILAN, "QFD-based expert system for non-traditional machining processes selection", Expert Systems with Applications, Vol. 32, pp. 1208-1217, 2007.