

Laboratoire de Mécanique et Ingénieries
EA 3867 - FR TIMS / CNRS 2856

ERA MMS

Les aspects mécaniques de l'usinage des composites

Grégory CHARDON
gregory.chardon@ifma.fr

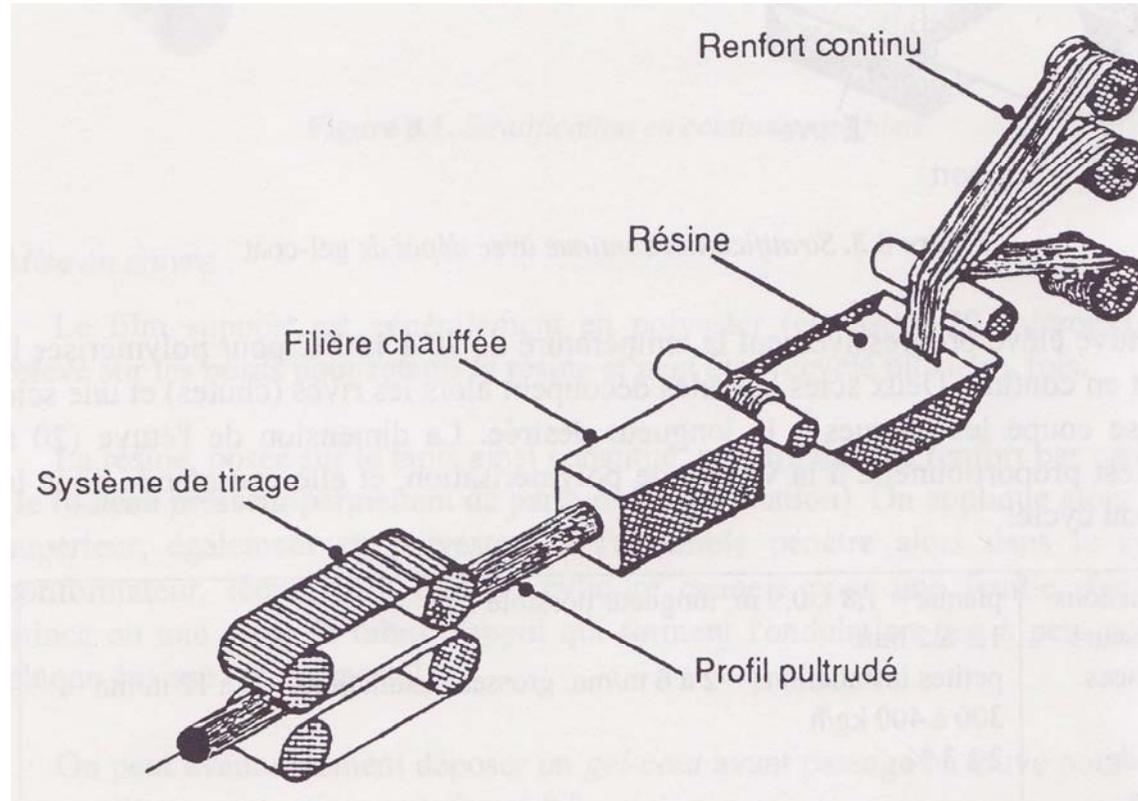


Université Blaise Pascal



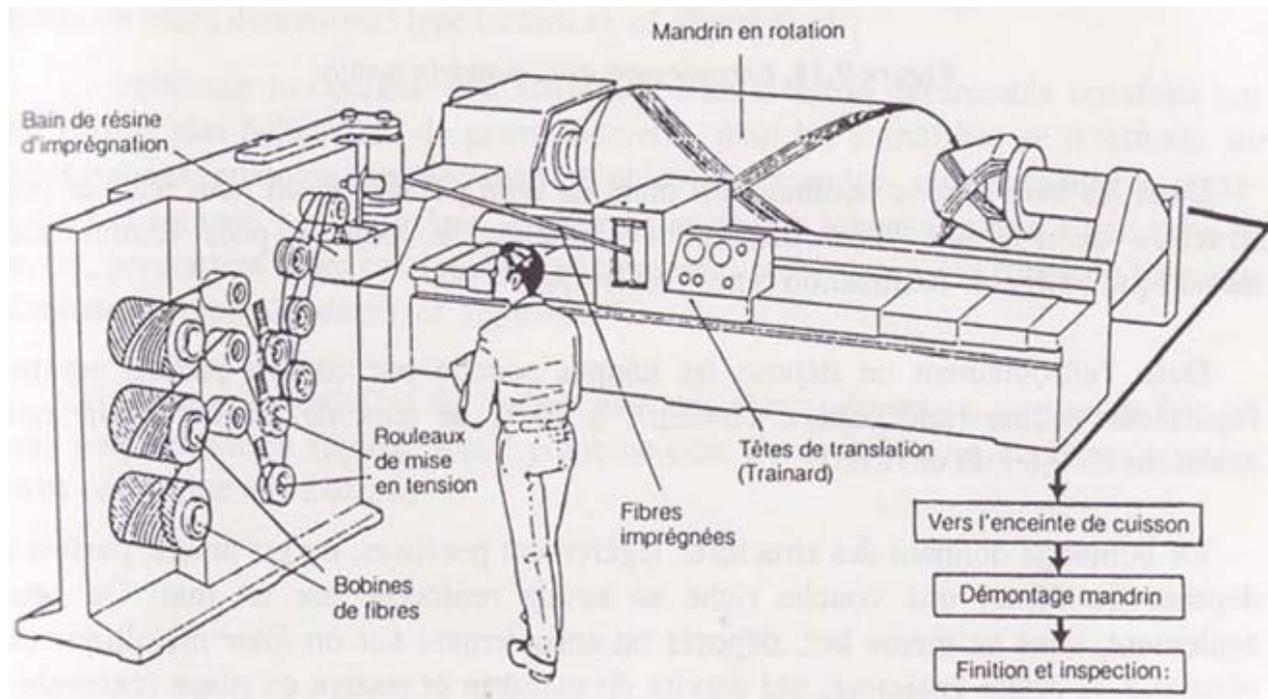
- Procédés de mise en œuvre et diversité des pièces composites
- Mécanisme de coupe
- Perçage et détournage
- Problématique de l'usinage de forme par outil coupant
- Perspectives avec les outils abrasifs

Procédé sans injection de résine : pultrusion



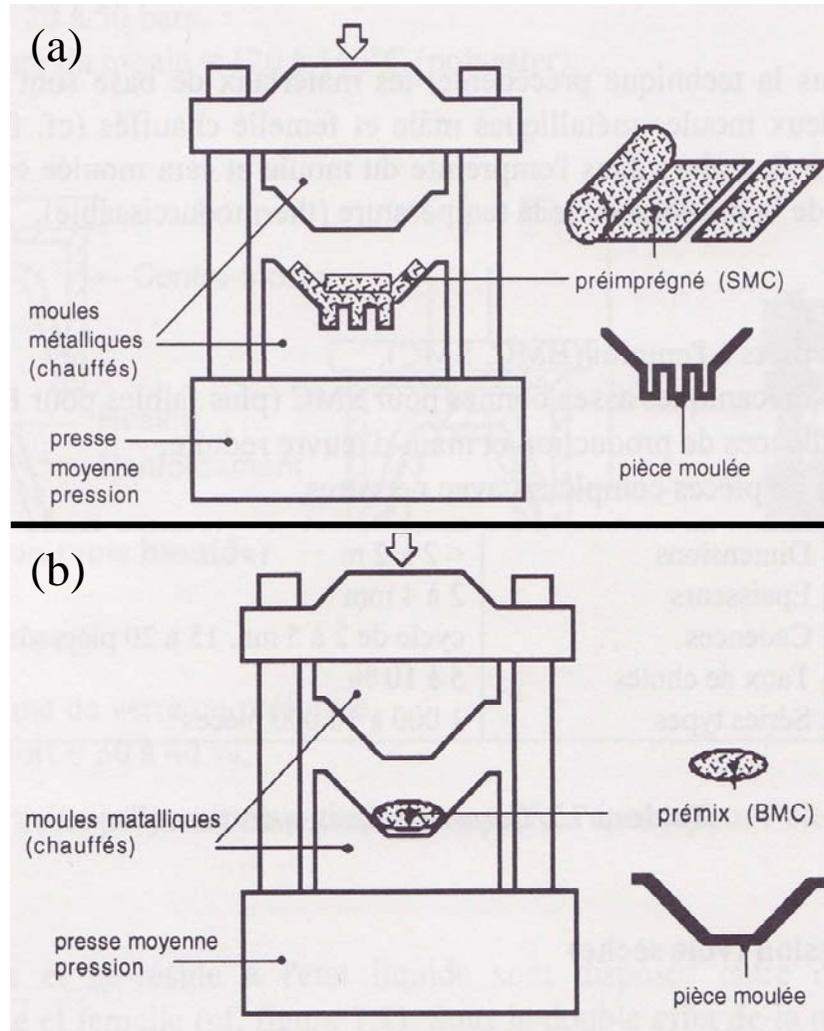
Pièces profilées

Procédé sans injection de résine : enroulement filamentaire



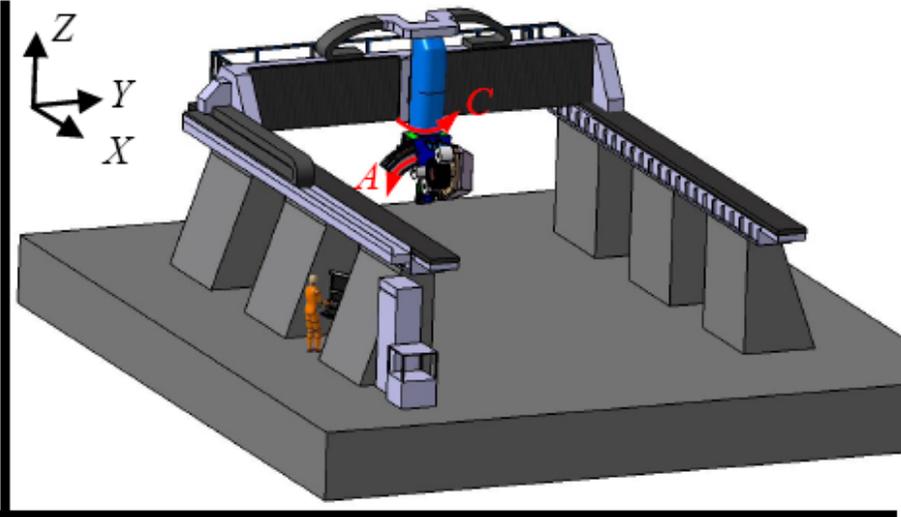
Pièce de révolution

Procédé sans injection de résine : mise en œuvre à la presse



Procédé adapté à la production en série

Procédé sans injection de résine : dépose par drapage

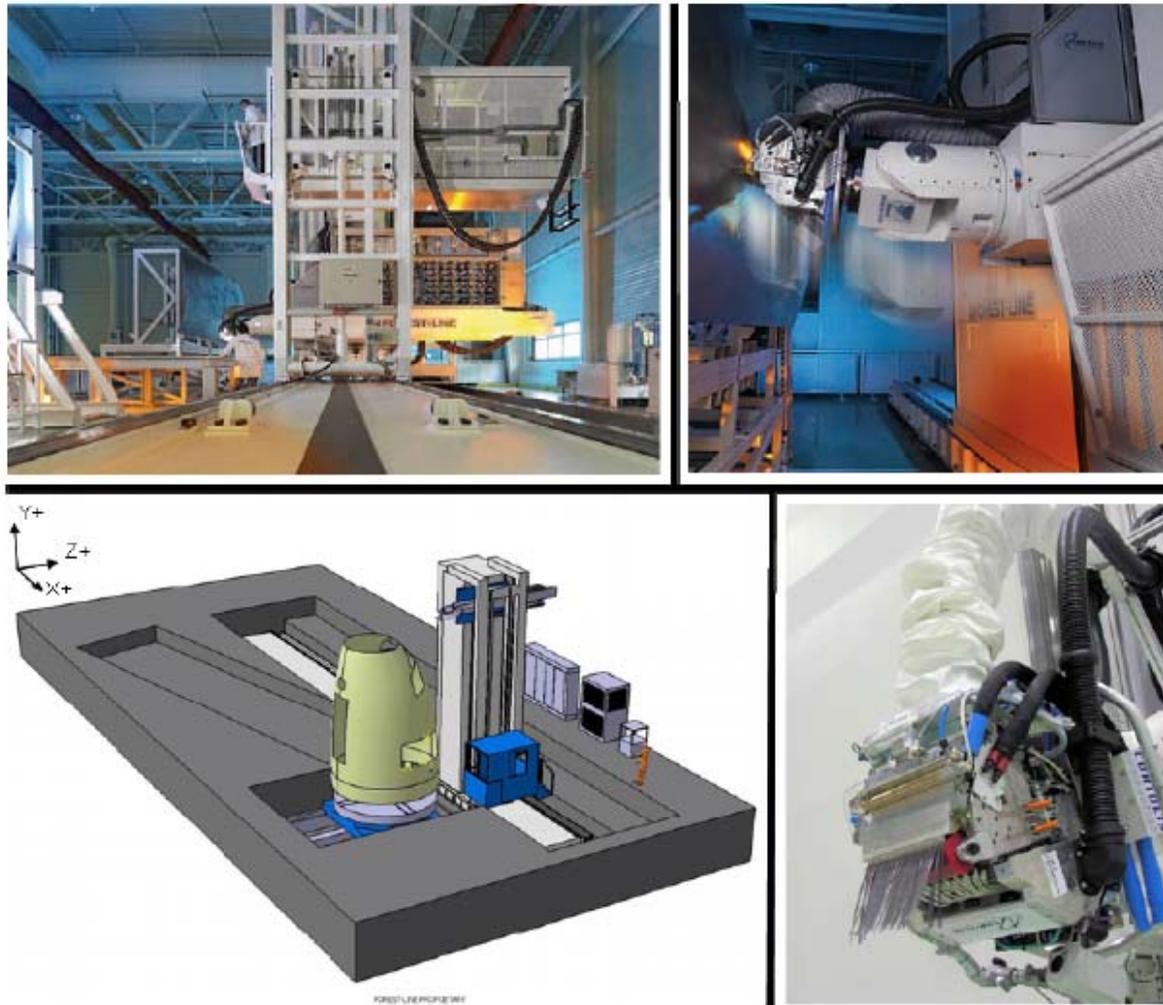


arrivée du pré-imprégné

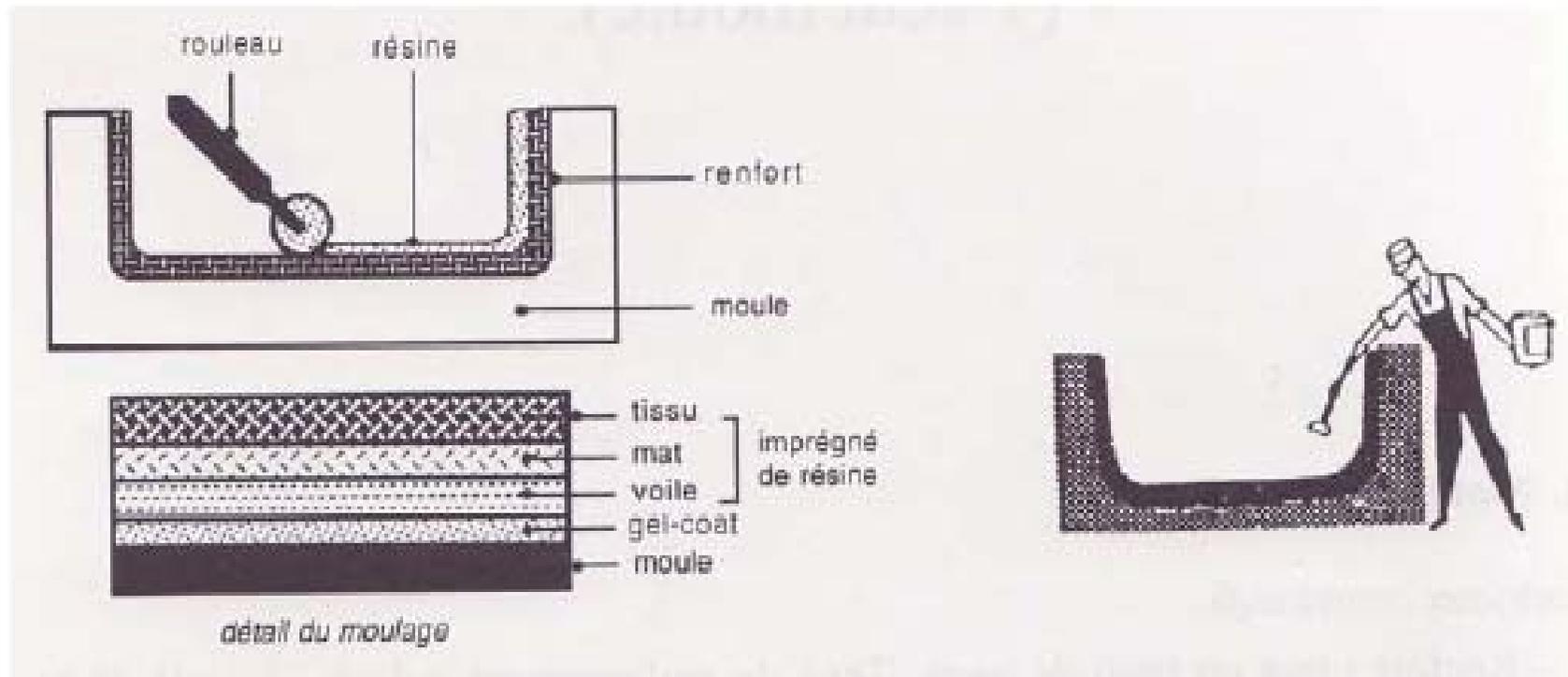
rouleau de dépose

bande précédemment déposée

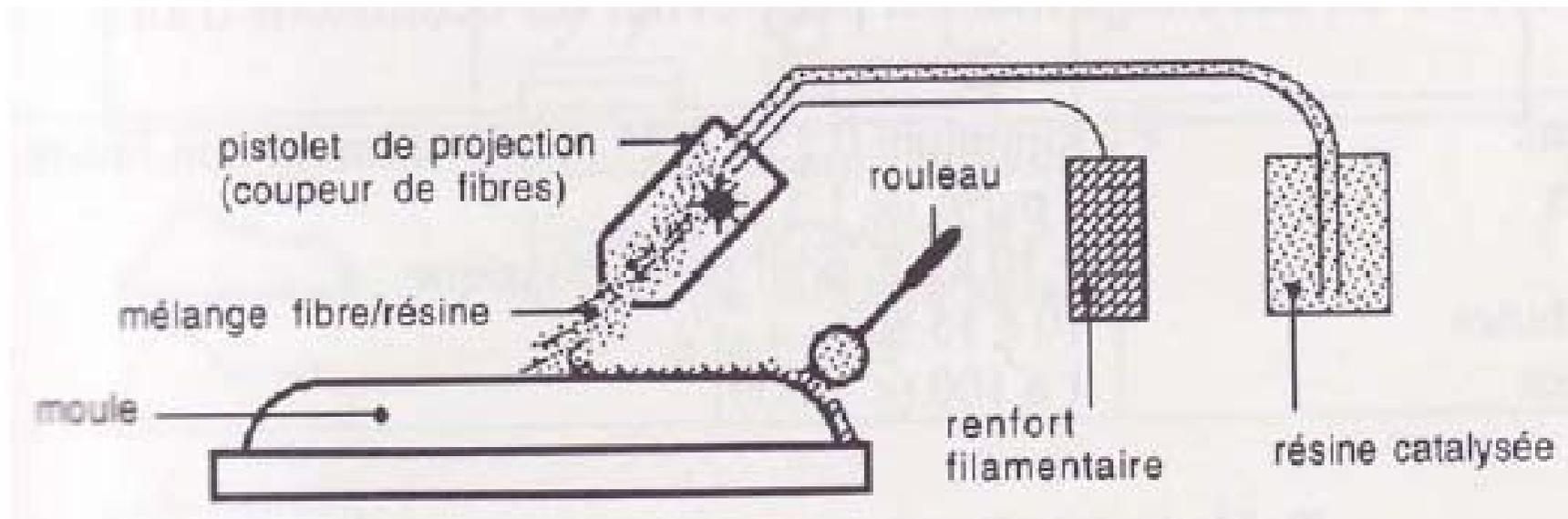
Procédé sans injection de résine : dépose par placement de fibre



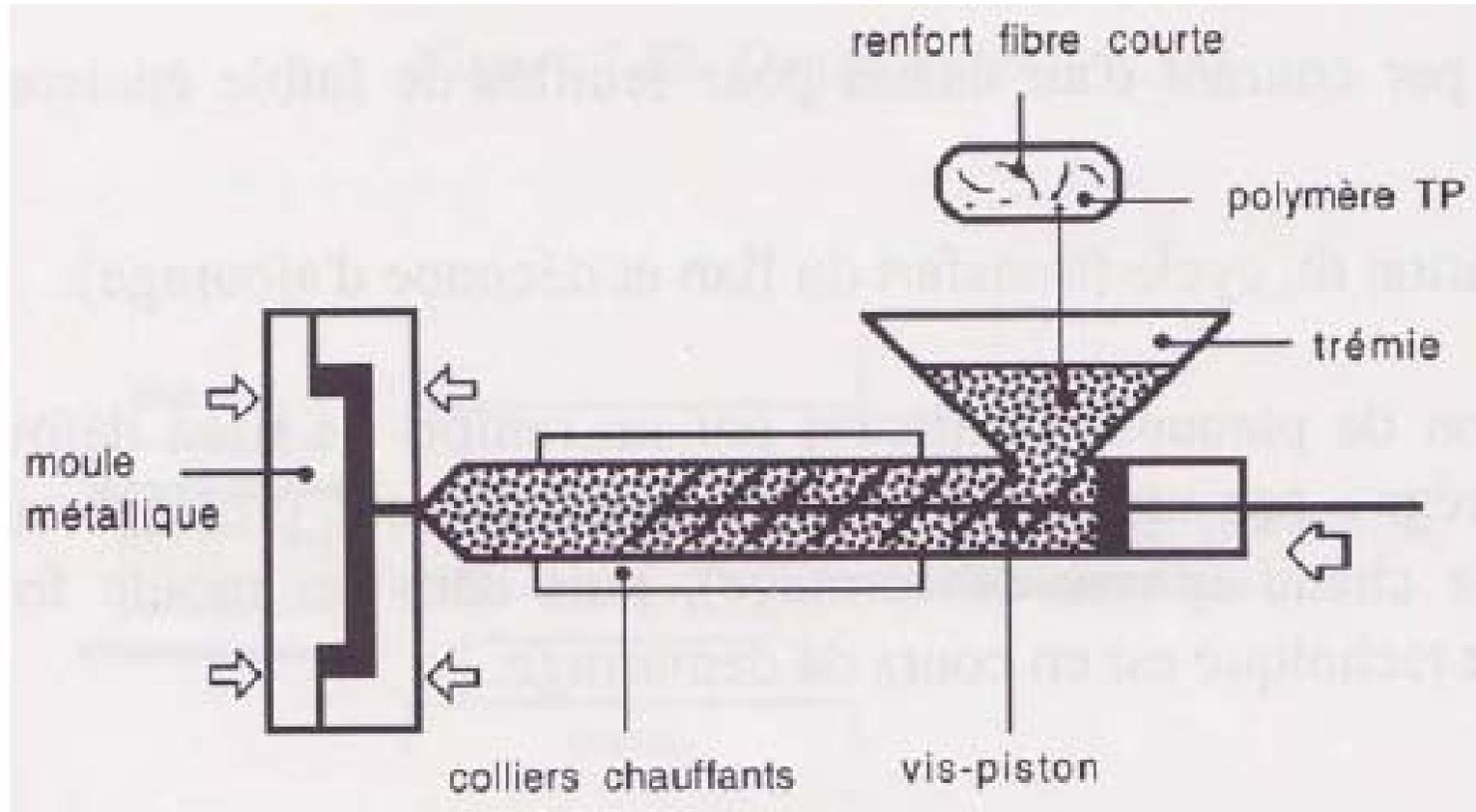
Procédé sans injection de résine : moulage au contact



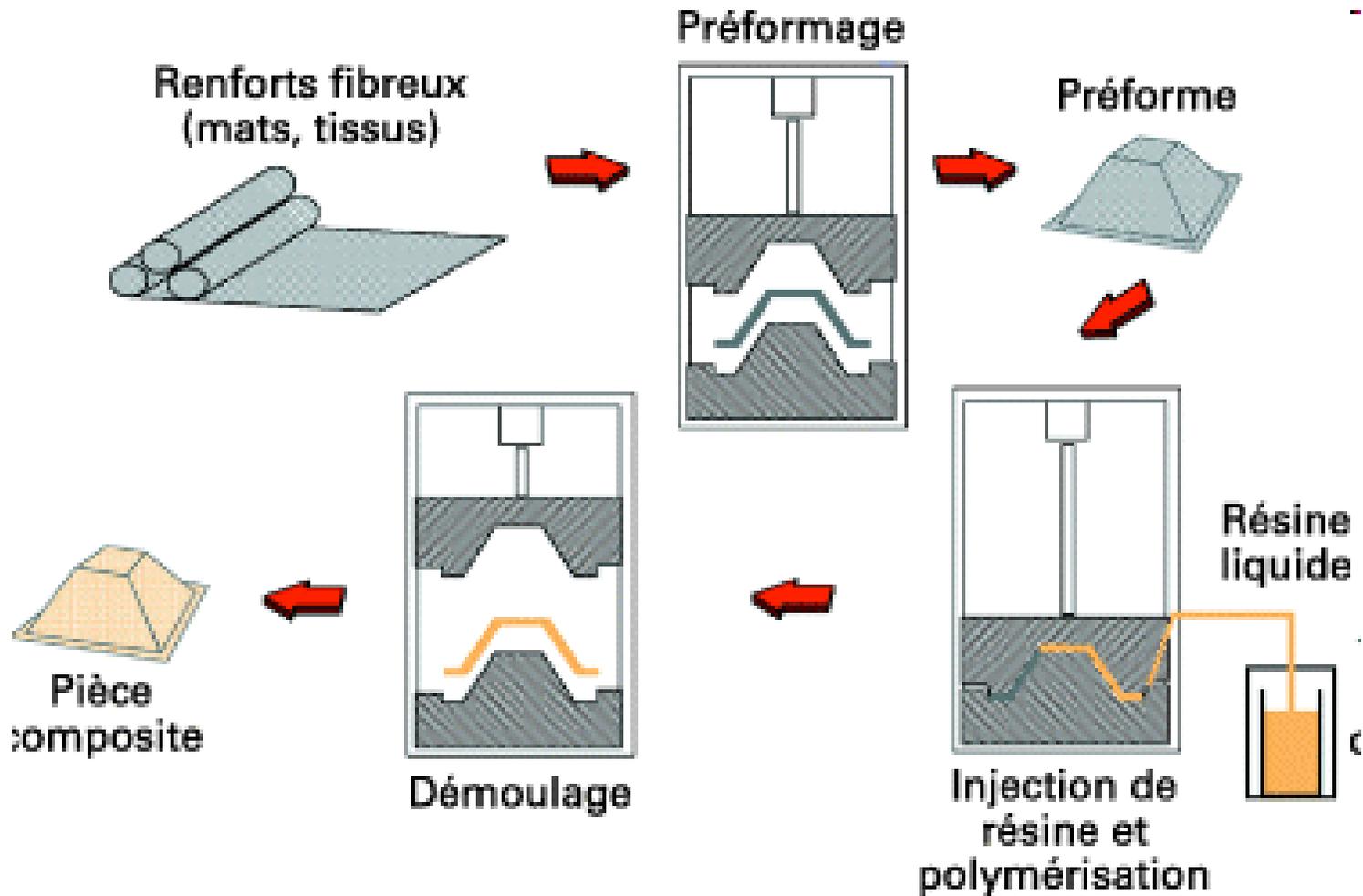
Procédé sans injection de résine : moulage par projection



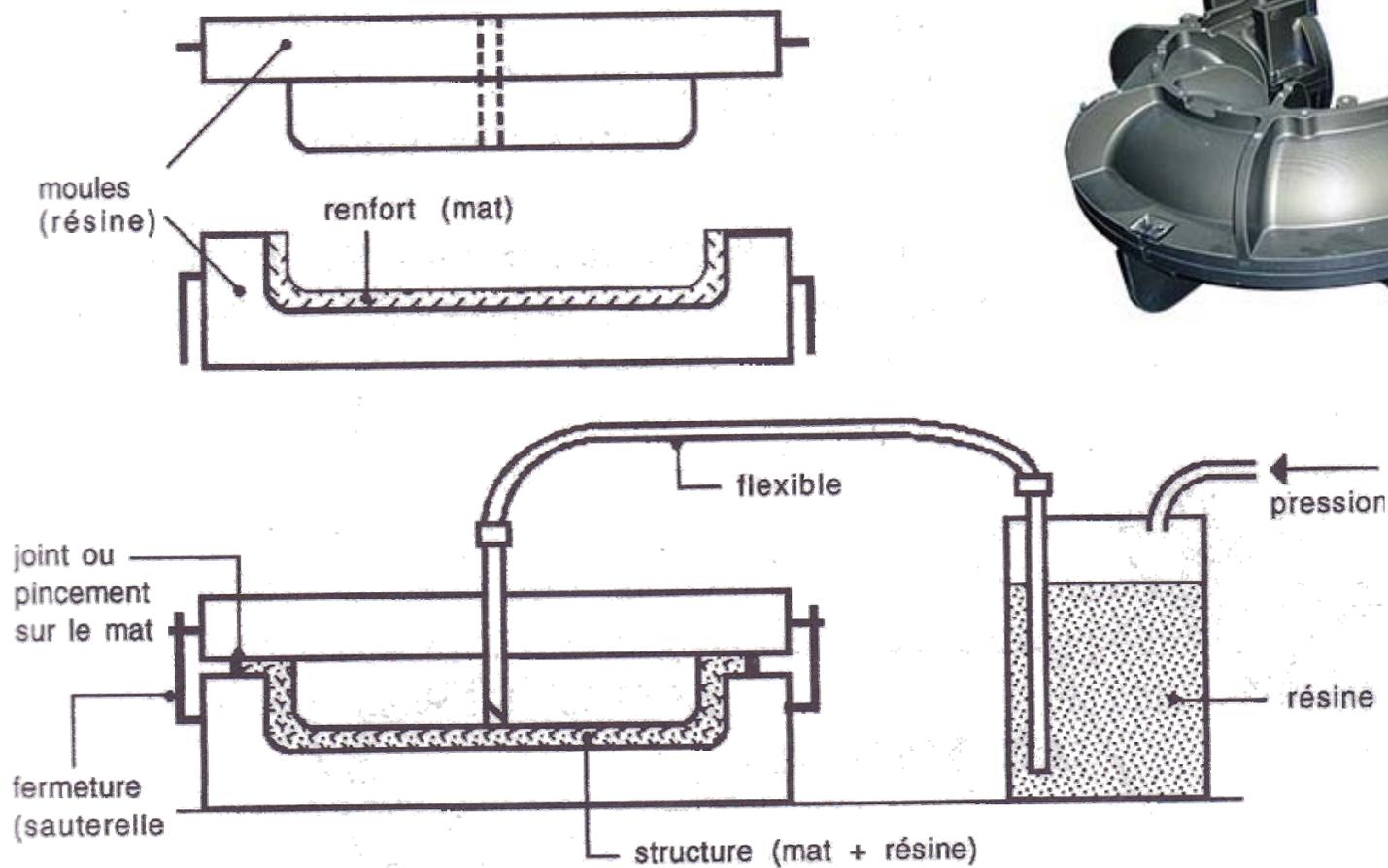
Procédé par injection de résine : cas des fibres courtes ou charges



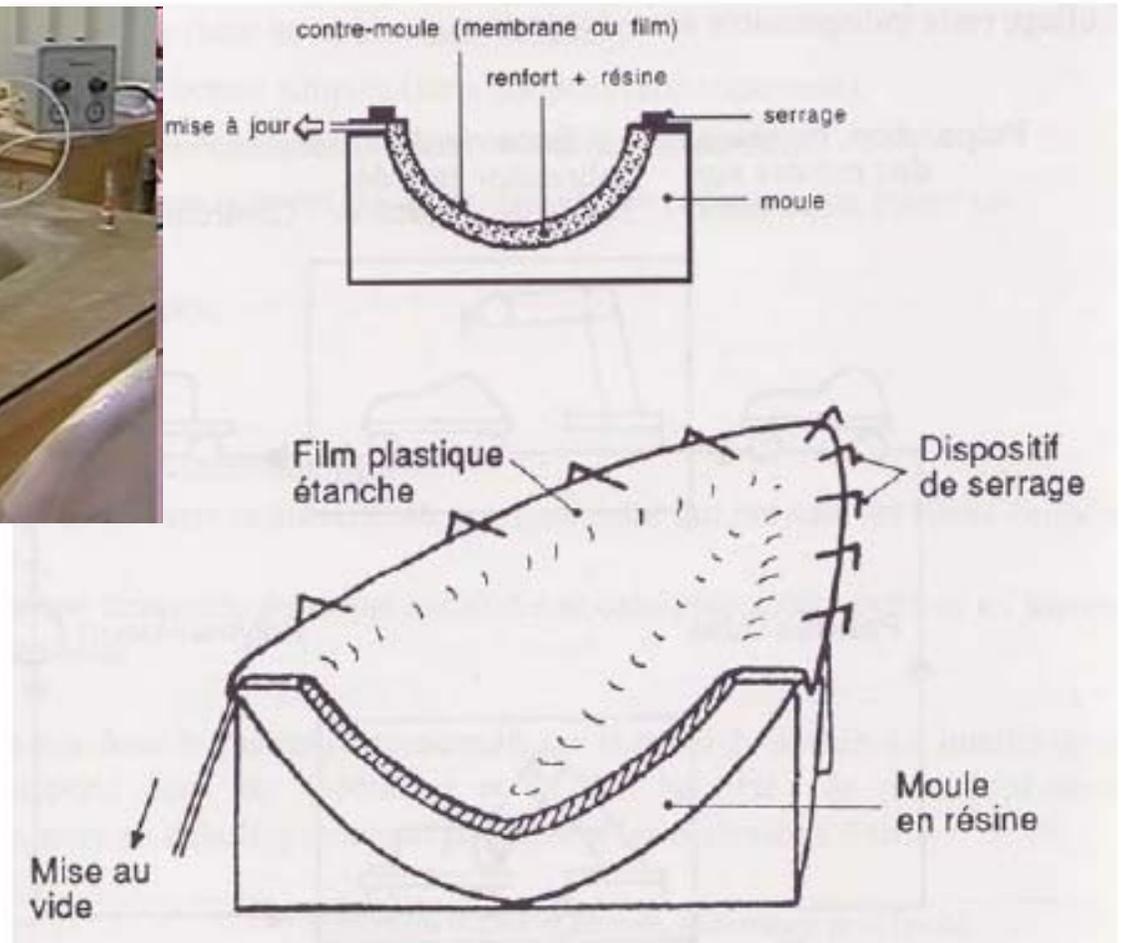
Procédé par injection de résine : principe du procédé LCM (Liquid Composite Molding)



Variantes du procédé LCM : le RTM (Resin Transfer Molding)



Variantes du procédé LCM : le RTM-Light ou VARTM (Vacuum Assisted RTM) et le RIM (Resin Infusion Molding)

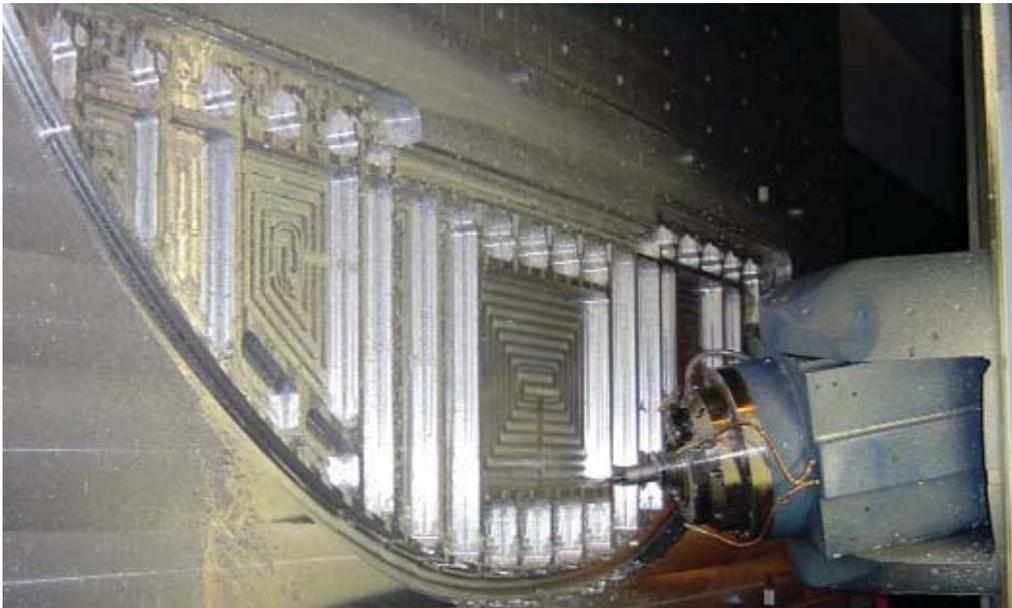


Exemples de pièces obtenues par RTM :



Possibilités de placer
une vessie gonflable
pour réaliser des pièces
creuses.

Exemples de pièces obtenues par RTM :



En concurrence avec l'usinage
d'aluminium pour les pièces de
structure aéronautiques

Bilan :

- Une grande variété de procédés : influence sur les propriétés de la pièce formée
- La plupart de ces procédés génèrent une bavure sur la périphérie
- Ces procédés ne permettent pas d'obtenir des trous de faibles diamètres

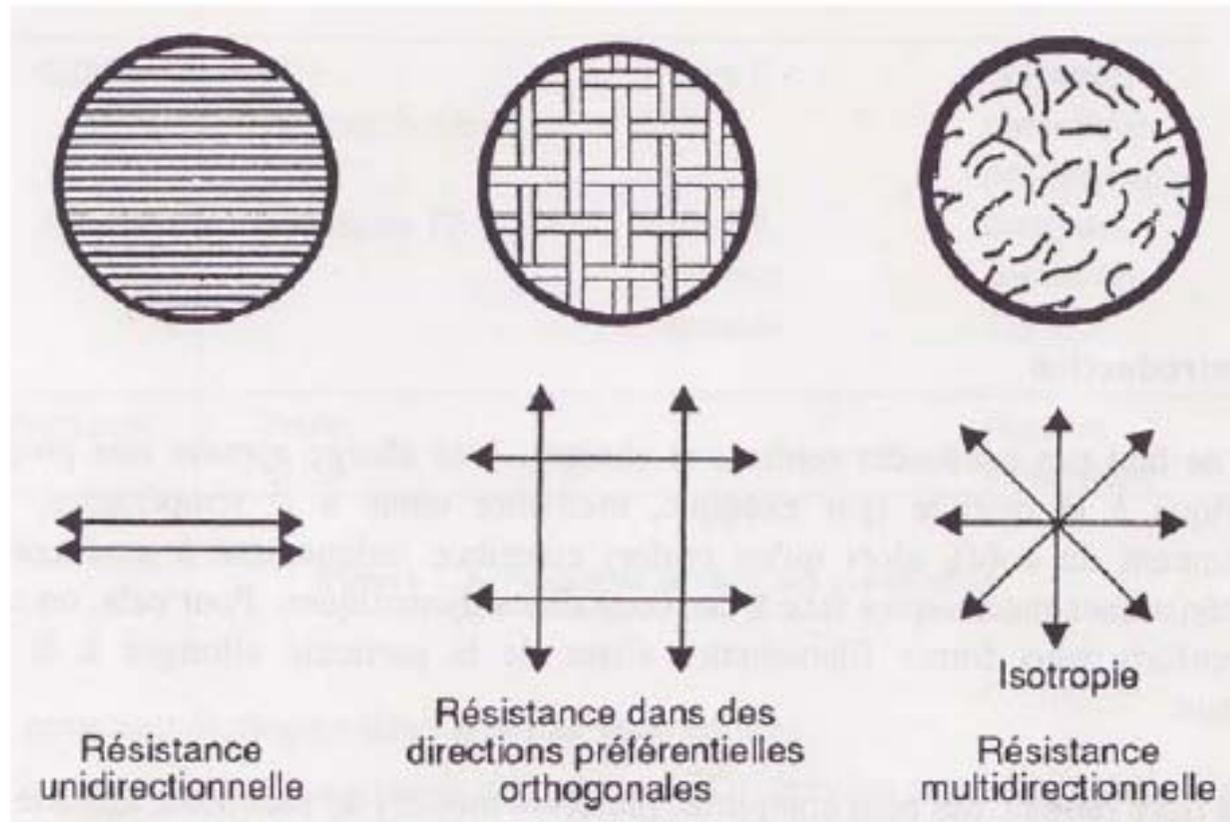
 Nécessité de reprise par usinage pour détourage et perçage

Difficulté supplémentaire liée à la grande variété de matériaux composites

Une grande variété de résines :

TP (thermoplastiques)	TD (thermodurcissables)
<p>Polymère grande diffusion : Polypropylène (PP)</p> <p>Technoplastiques : Polyamide (PA) Polytéréphtalates éthylénique et butylénique (PBT et PET) Polycarbonate (PC) Polyoxyde de phénylène (PPO) Polyoxyméthylène (POM) Polysulfuré (PPS et PSU)</p>	<p>Polyester Vinylester Phénolique Epoxyde Polyuréthane</p>

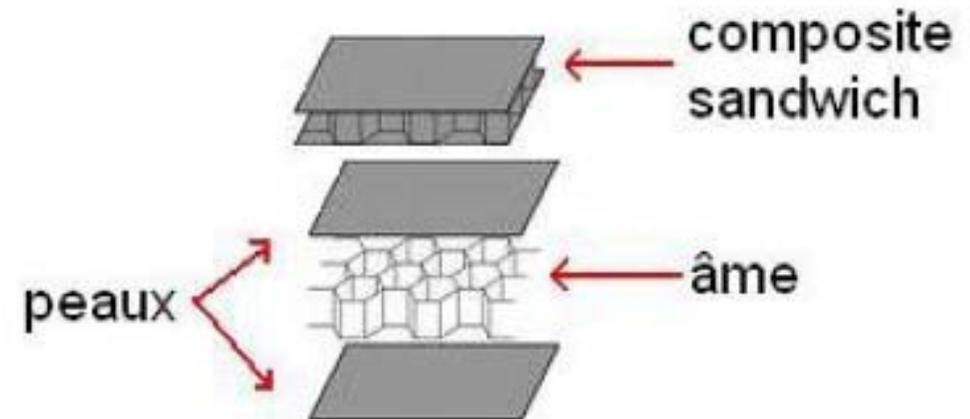
Une grande variété de renforts :



Fibres :

- Verre
- Carbone
- Aramide (Kevlar)

Les matériaux composites sandwich :



Composite Sandwich	Ame	
	Nature	Matière type
- de structure	- nid d'abeilles	- aluminium - aramide (TD) - polypropylène (TP)
- d'isolation	- mousses - plastiques	- PUR - PSE

Bilan :

- Une grande variété de procédés : influence sur les propriétés de la pièce formée
- La plupart de ce procédé génère une bavure sur la périphérie
- Ces procédés ne permettent pas d'obtenir des trous de faibles diamètres
- Grande variété de matériaux composites



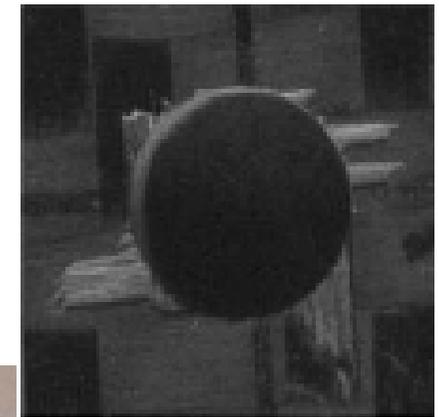
Nécessité de reprise par usinage pour détourage et perçage

Propriétés physiques particulières :

- Hétérogénéité intrinsèque



- Décohésion fibre matrice
- Fibres non coupées
- Arrachements, délaminage



Actions correctives :

- Géométrie d'outil adaptée
- Conservation de l'acuité d'arête

Propriétés physiques particulières :

- conductivité thermique



- Dégradations de la matrice
- Dilatations de la pièce : dispersion dimensionnelle



Actions correctives :

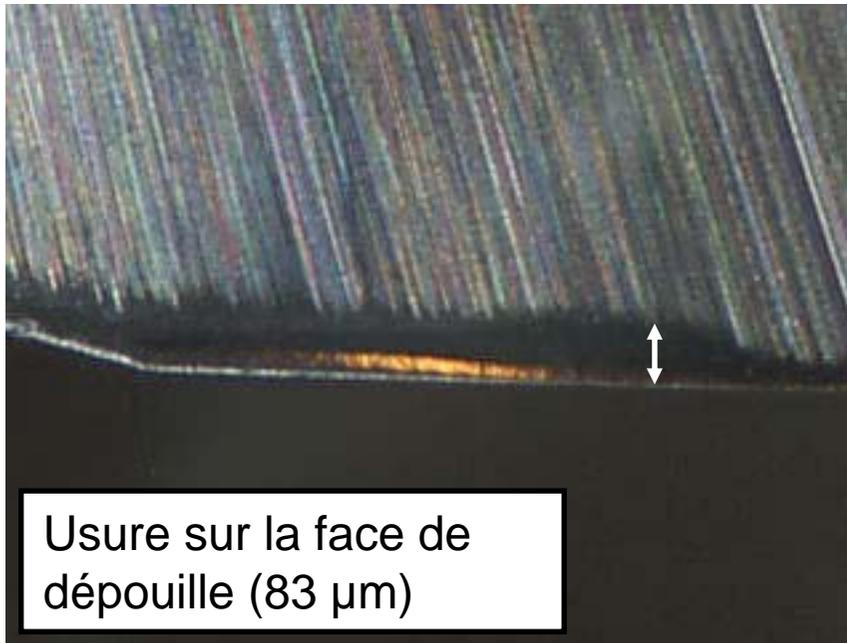
- Arrosage (eau, huile soluble...) si la matrice le tolère
- Soufflage d'air comprimé

Propriétés physiques particulières :

- caractère abrasif des fibres



- usure outil = perte d'acuité de l'arête
- L'usure conduit à une coupe moins franche = arrachement, élévation de température



Actions correctives :

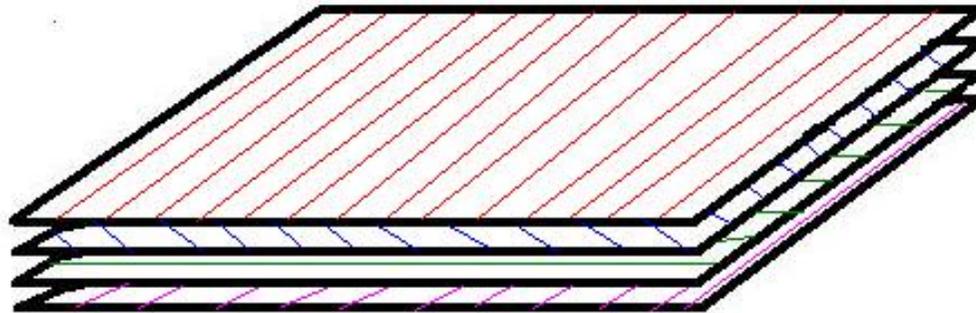
- Revêtement pour les outils carbure
- Usage du PCD

Propriétés physiques particulières :

- anisotropie

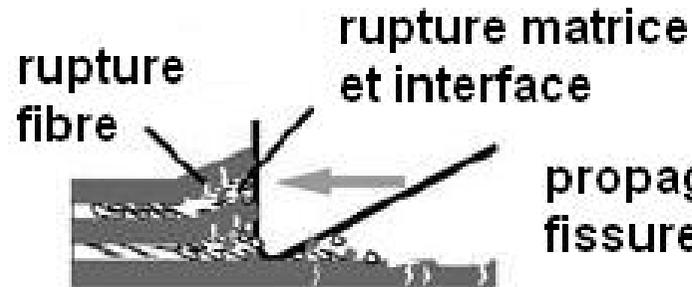


- relâchement de contraintes, déformation de la pièce usinée
- obstacle à la modélisation et généralisation des phénomènes de coupe

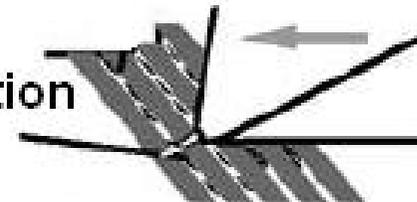


Le mécanisme de coupe dépend de l'orientation des fibres :

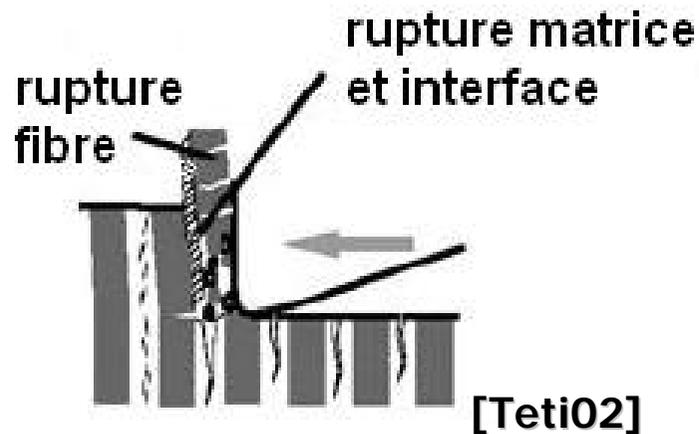
0°-fibre-orientation



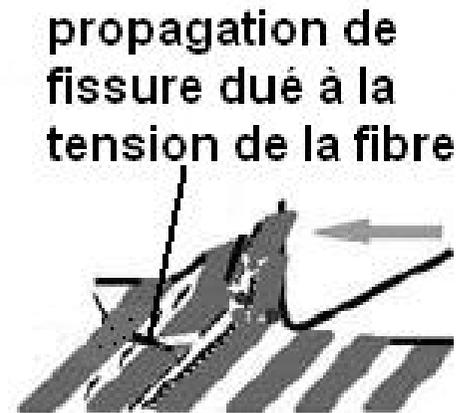
45°-fibre-orientation



90°-fibre-orientation

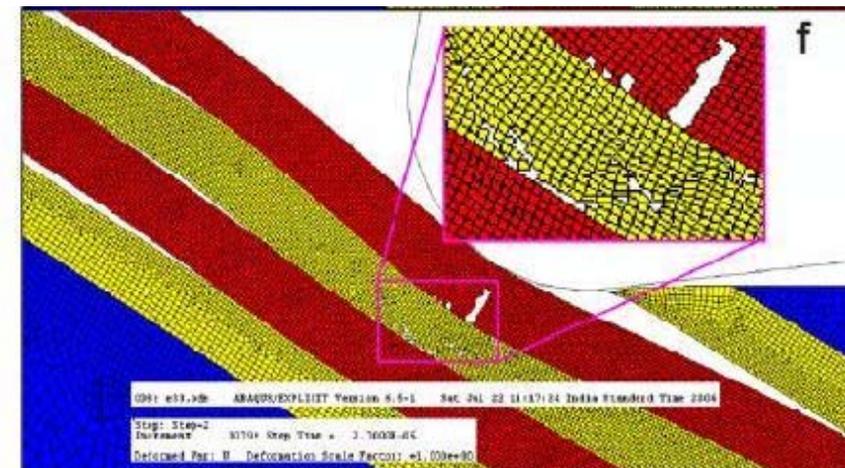
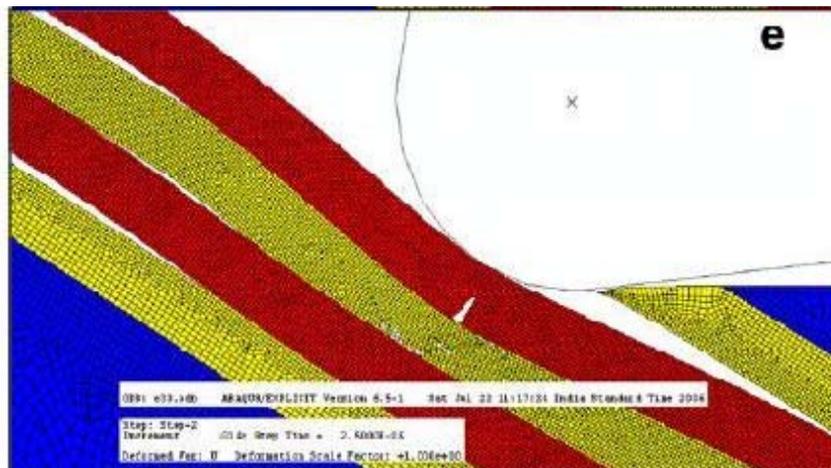


135°-fibre-orientation



Modélisation des phénomènes de coupe

- Plans d'expérience [Arola97], [Davim05]
- Modèles analytiques [Bhatnagar94], [Chang06]
- Modèles éléments finis [Arola97], [Rao07], [Gaitonde07]



- Difficulté d'identification des paramètres matériaux : fibre, matrice, interactions fibre-matrice, frottement...
- Ils existent seulement des modèles pour les composites à fibres longues et pour une orientation de fibres donnée.

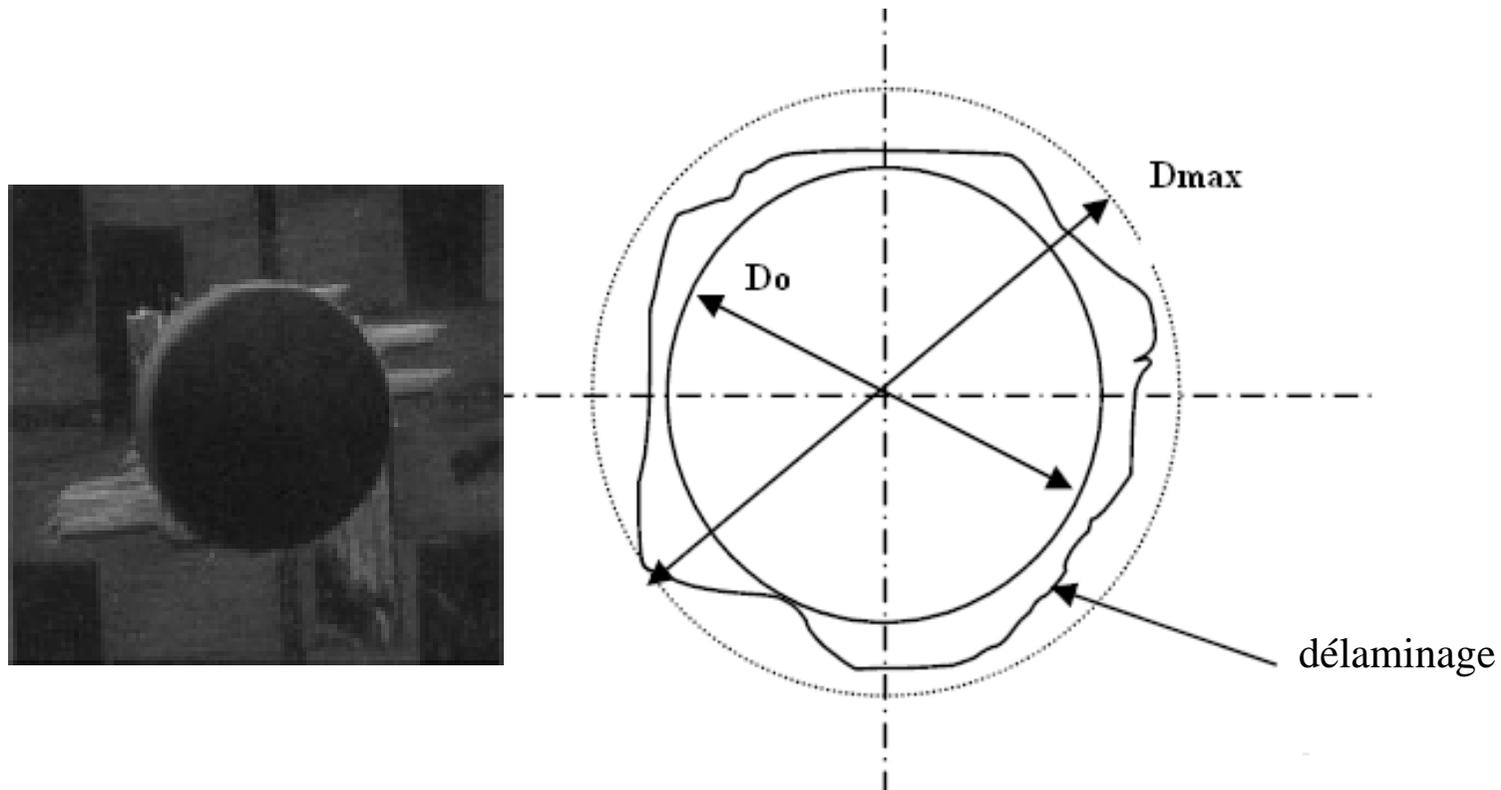
Bilan :

- Grandes variétés de matériaux
- Multitudes de procédés de mise en œuvre
- Propriétés particulières qui compliquent l'usinage
- Niveau d'expertise plus faible que pour les matériaux métalliques
- Difficultés liés à la modélisation

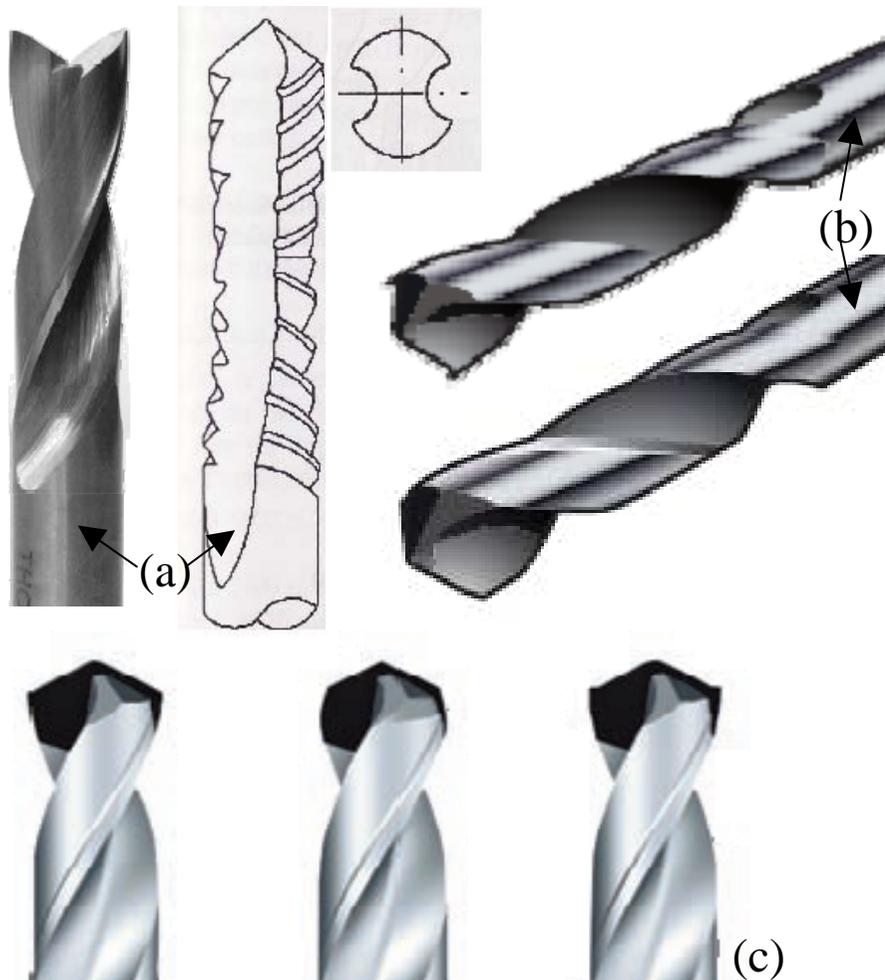


- pas d'abaques de conditions de coupe
- de nombreux travaux de modélisation mais difficilement généralisable

Malgré technique de collage, nécessité de perçage pour assemblage (boulon, rivet...)



Malgré technique de collage, nécessité de perçage pour assemblage (boulon, rivet...)



Outils:

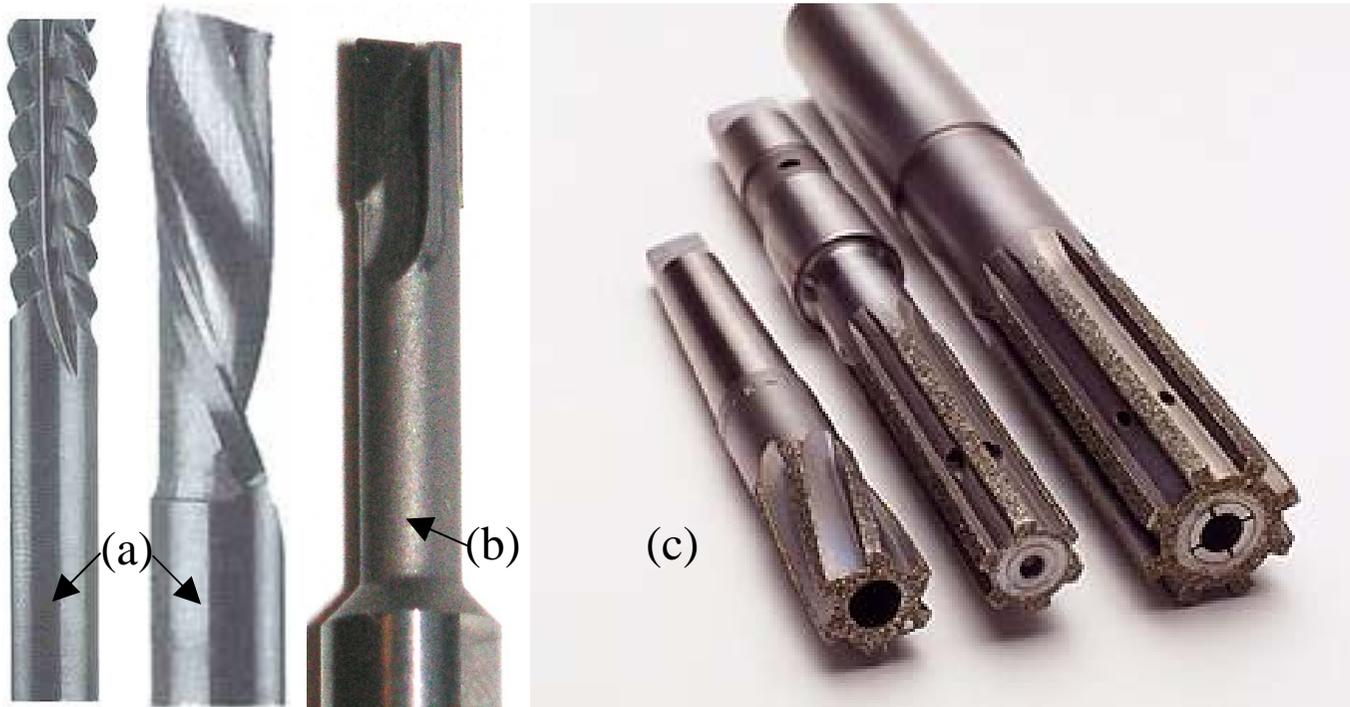
- Géométrie spécifique suivant les matériaux
- Carbure revêtu ou non
- PCD et Veined PCD

Malgré technique de collage, nécessité de perçage pour assemblage (boulon, rivet...)

Problématique du
perçage
d'empilement en
aéronautique



Nécessité de détournage pour retirer la bavure et réaliser des ouvertures sur la pièce

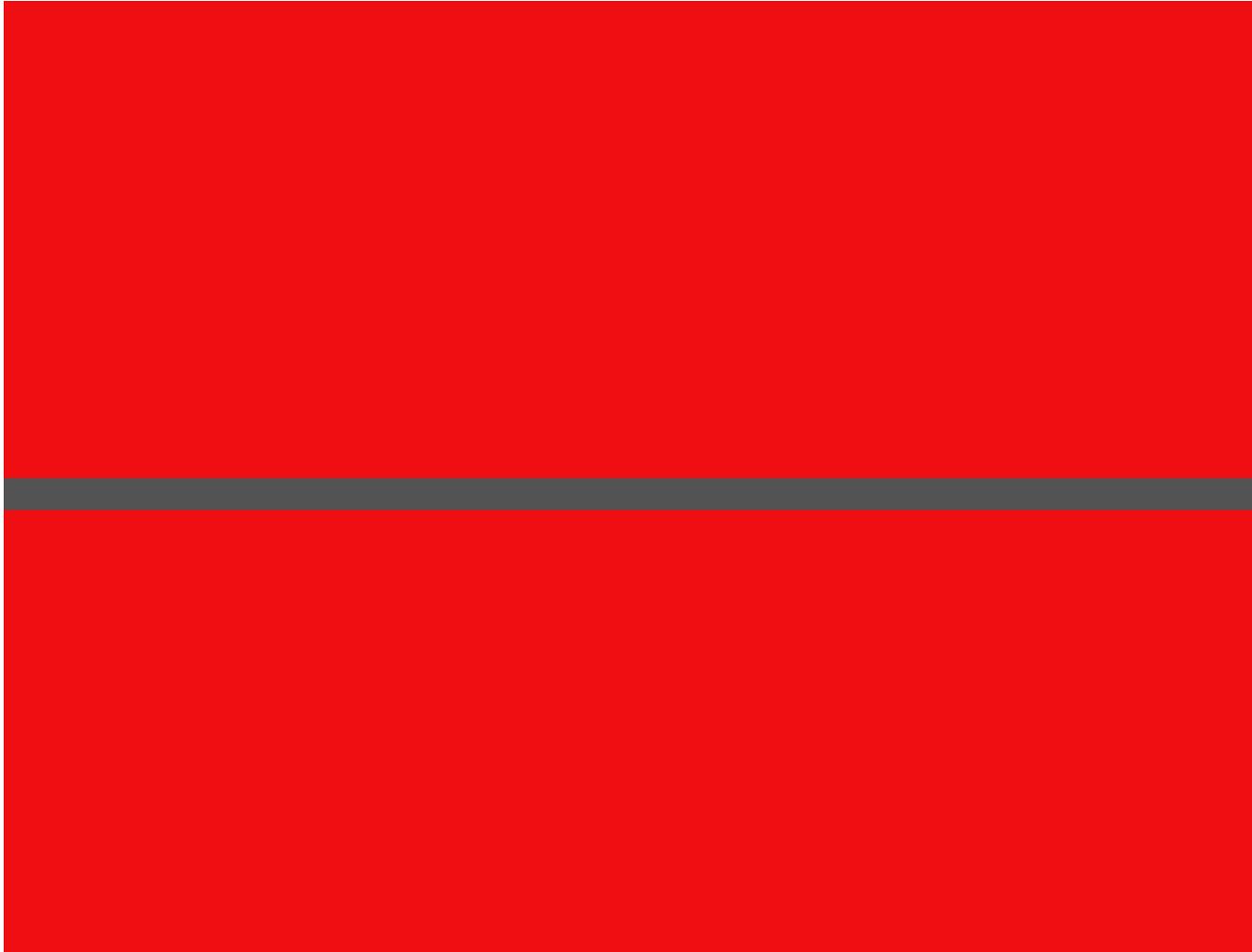


outil abrasif (ou à
concrétion diamanté)

Outils avec géométrie spécifique suivant les matériaux :

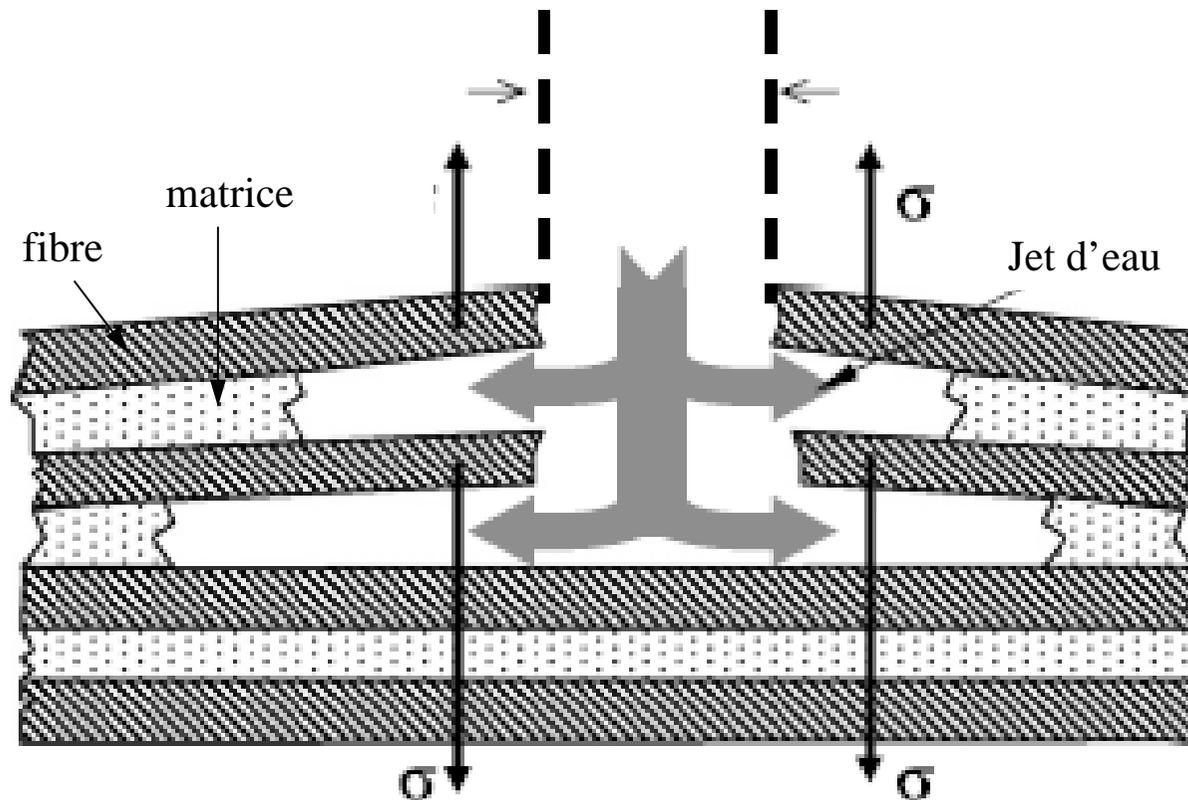
- Carbure revêtu ou non (a)
- PCD (b)

Nécessité de détournement pour retirer la bavure et réaliser des ouvertures sur la pièce



Procédés alternatifs à l'usinage :

- Découpe laser
- Découpe jet d'eau

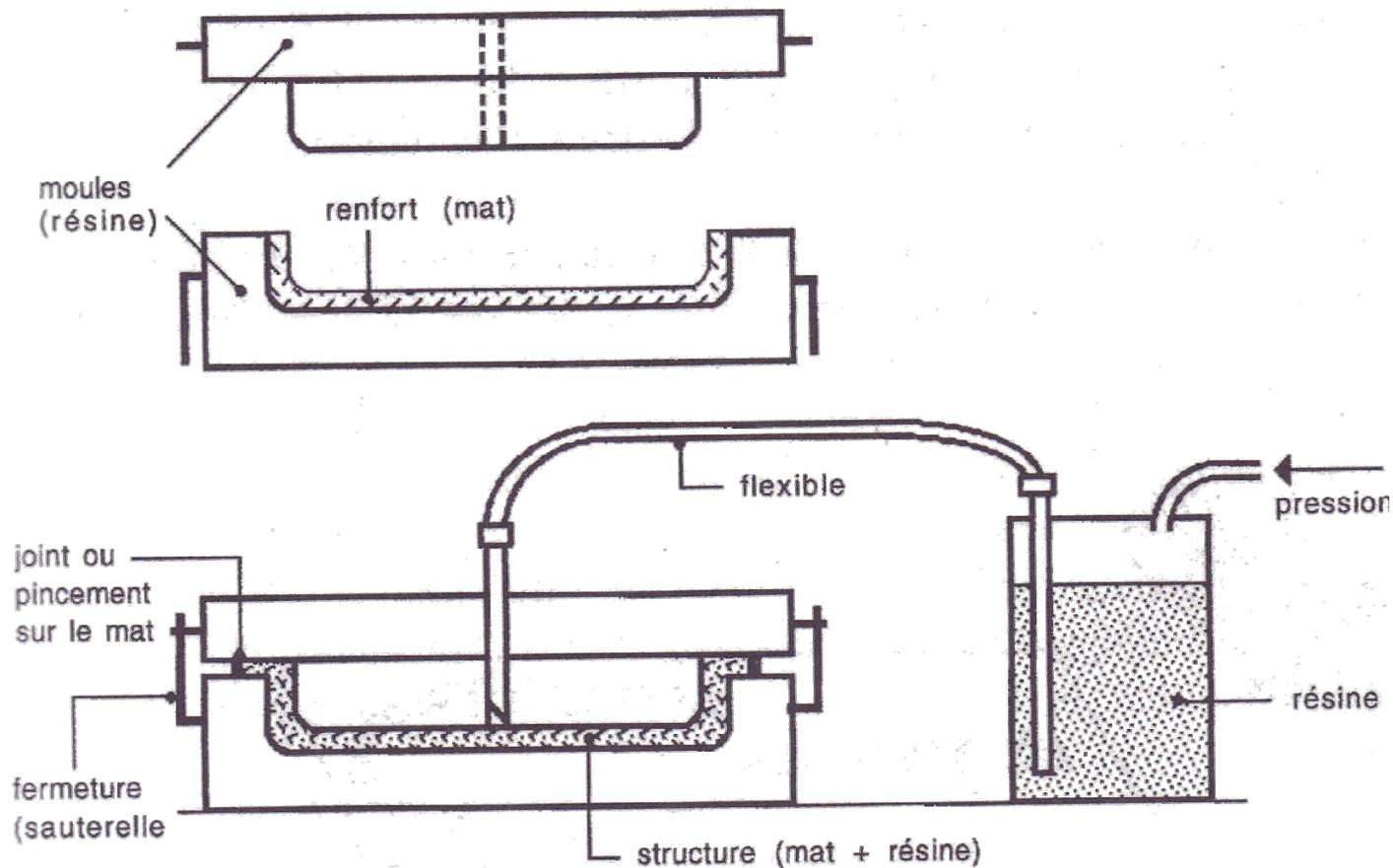


Bilan :

- absence d'abaques
- absence de modèle générique exploitable
- de nombreuses technologies d'outil adaptées
- essais préliminaires indispensables avant une mise en production

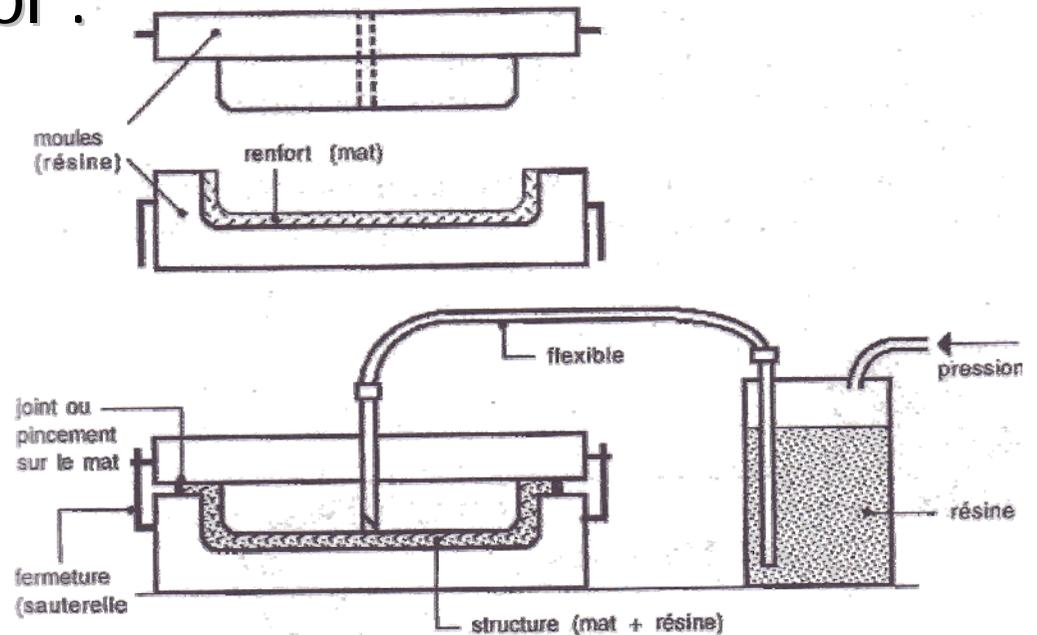
Géométries plus complexes , fraisage de formes?

- dilatation thermique du moule qui nuisent à la qualité dimensionnelle de la pièce
- moule en aluminium ou Invar (alliage fer nickel)
- **Idee : moule en matériaux composites**



➤ Présentation de l'Hextool :

- Matériau composite à base de fibres de carbone et de résine bismaléimide.
- Composite sous forme de rubans de préimprégnés (thermodurcissable) : dépose puis autoclave.
- Matériau dédié à la production de moules pour les procédés LCM.



➤ Le projet LCM-Smart :

- Projet FUI pôle de compétitivité.
- partenaires industriels : Hexcel, SKF Aerospace France, Isoire Aviation...
- Laboratoires : LaMI, LTDS de l'ENISE...



➤ Gain de poids

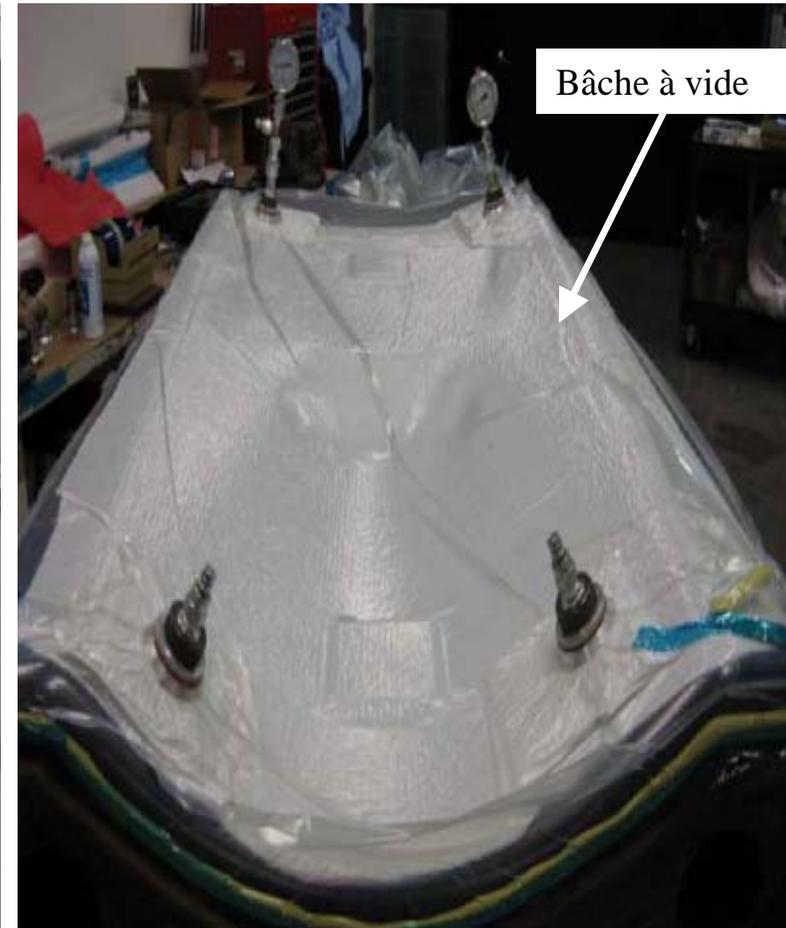
(a) Mandrin en Hextool™ (1558kg) (b) Mandrin en Invar® (5443kg)



- Facilité de rechargement matière

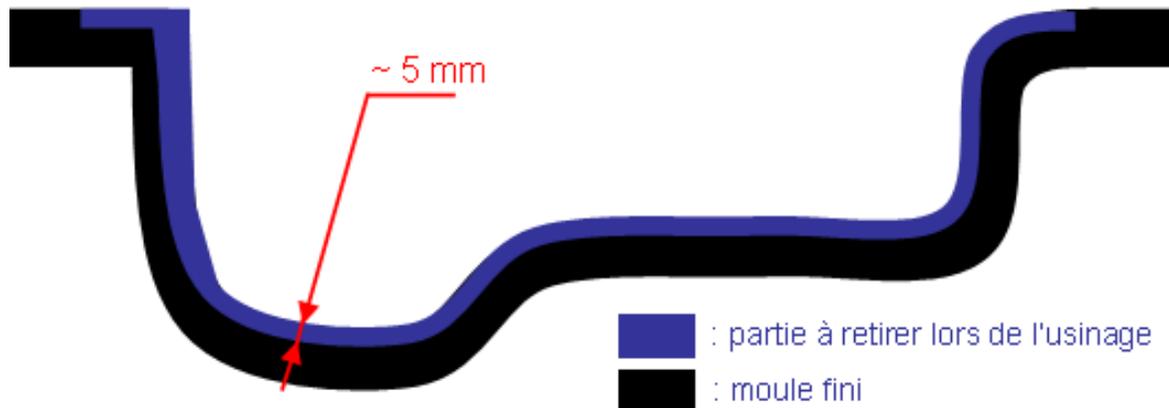


➤ Exemple d'outillage



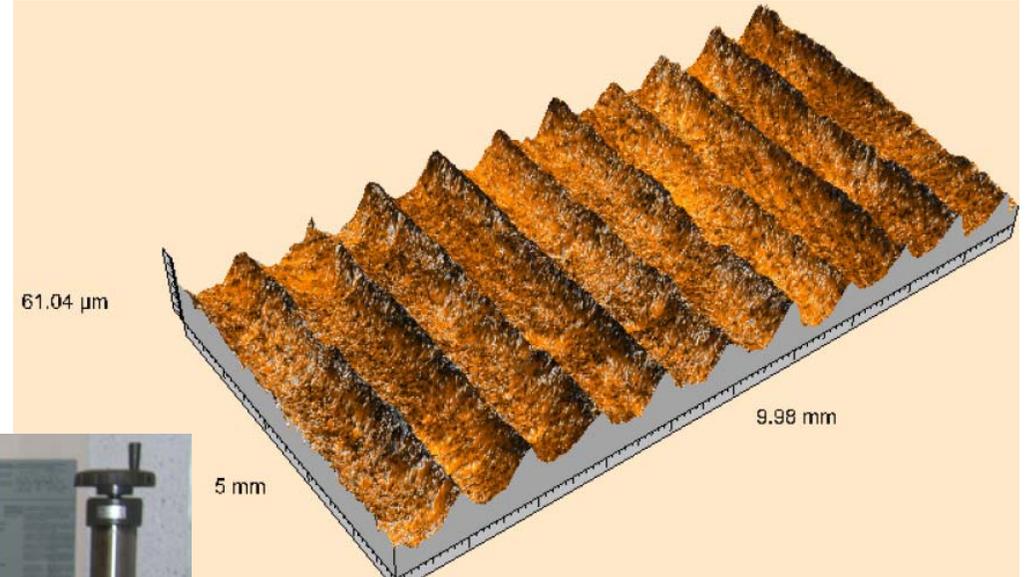
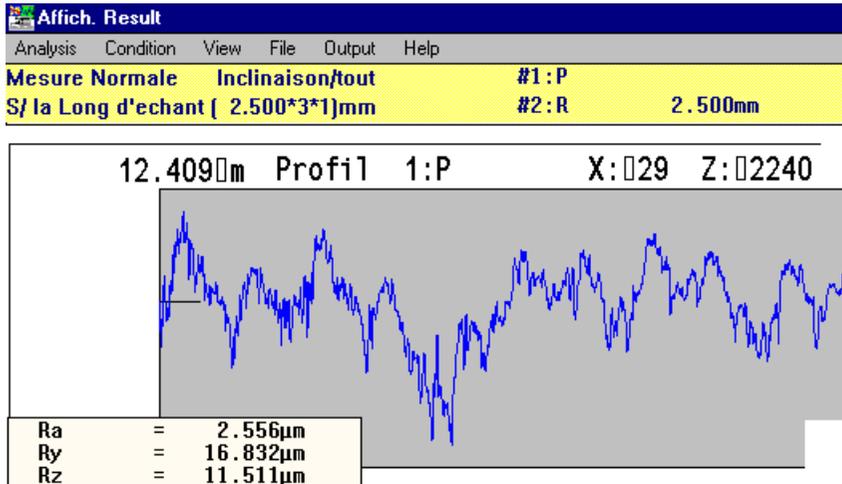
➤ Problématique industrielle : Obtenir un moule avec un Ra de $0,8\mu\text{m}$

- Moule obtenu par dépose de préimprégnés puis autoclave
- Pas d'ébauche lourde
- Semi-finition et finition
- Polissage manuel



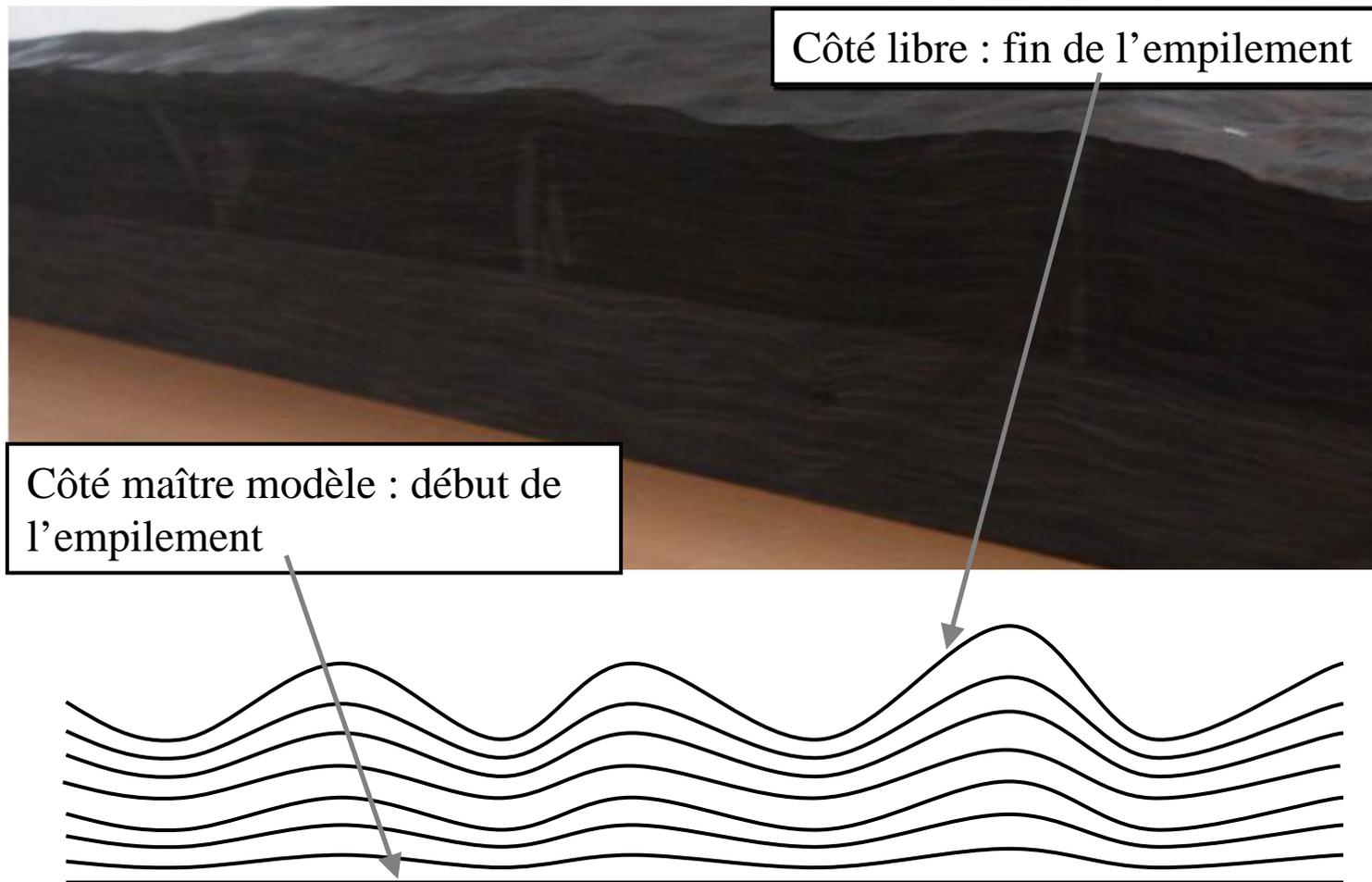
Moule peu profond : emploi outil boule et torique (plus productif)

- Quel critère de rugosité utilisé pour un matériau composite et comment le mesurer?



$$\frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

➤ Problématique de l'ébauche



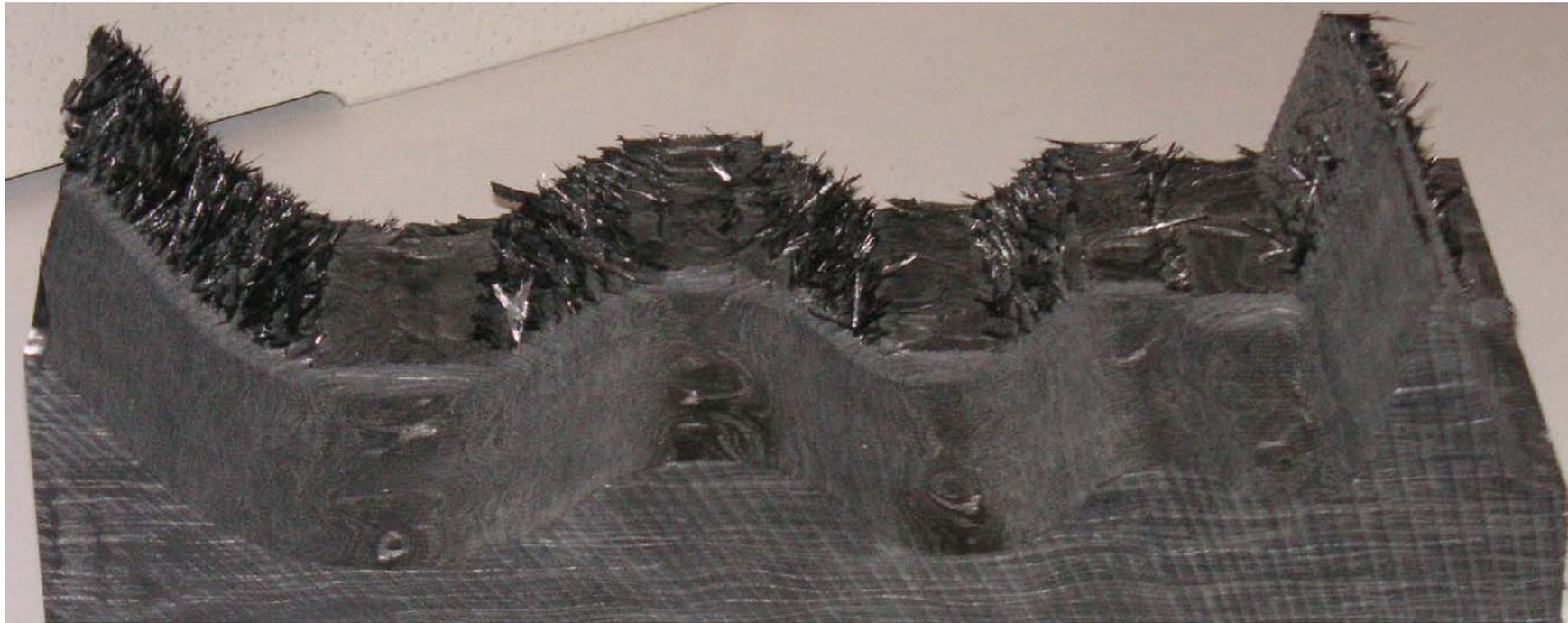
➤ Problématique de l'ébauche



$K_c = 300 \text{ N/mm}^2$ pour outil carbure

$K_c = 200 \text{ N/mm}^2$ pour outil PCD

➤ Problématique de l'ébauche



Fibres non coupées mais pas d'arrachement en profondeur

➤ Problématique de l'ébauche



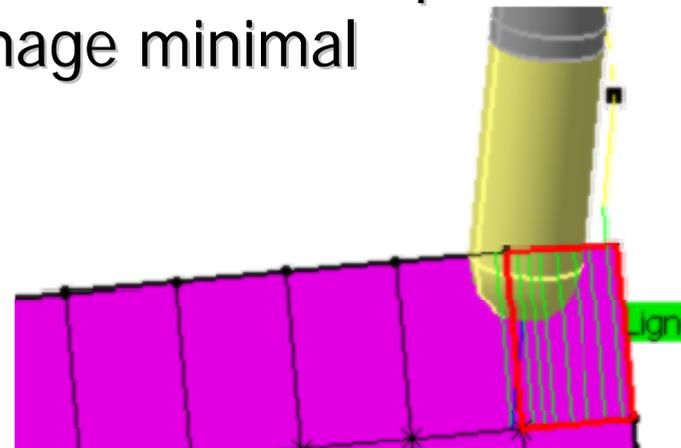
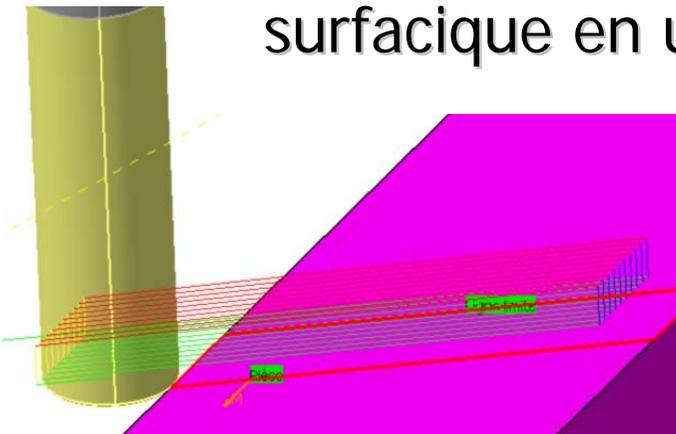
Délaminage essentiellement lors de l'usinage sur le flanc

- Ra de $0,8\mu\text{m}$ ne peut pas être atteint en usinage
 - Essais avec outil carbure et PCD
 - Bibliographie : [Bhatnagar 94]...

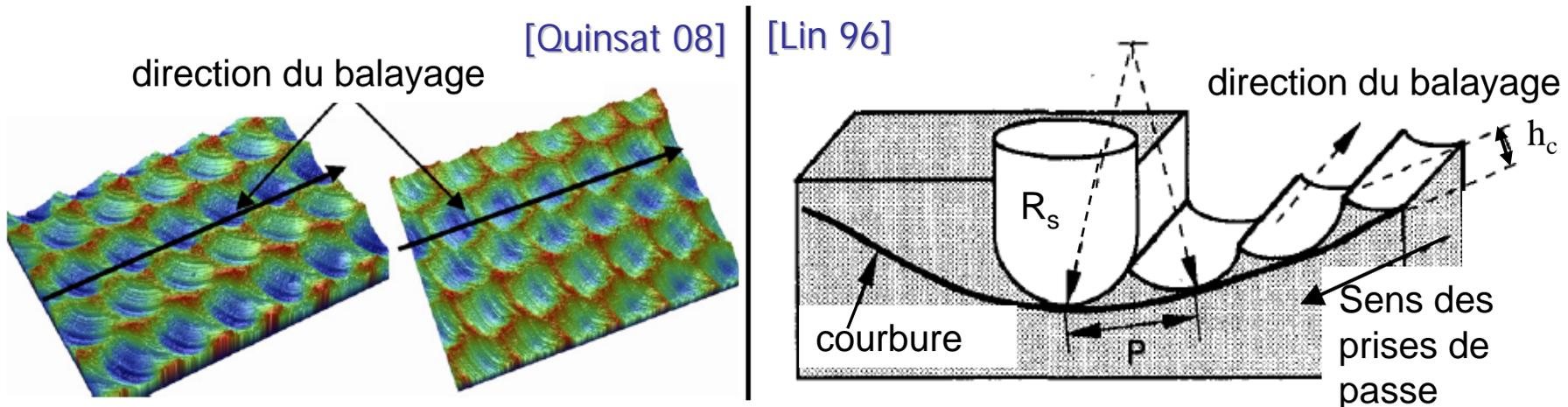
➔ Polissage manuel

- Nécessité de maîtriser la qualité surfacique afin de réduire le temps de polissage [Lee 06]

- Problématique : proposer une valeur de distance entre passes radiales permettant d'atteindre une qualité surfacique en un temps d'usinage minimal



Motif laissé sur la pièce par une opération de balayage :

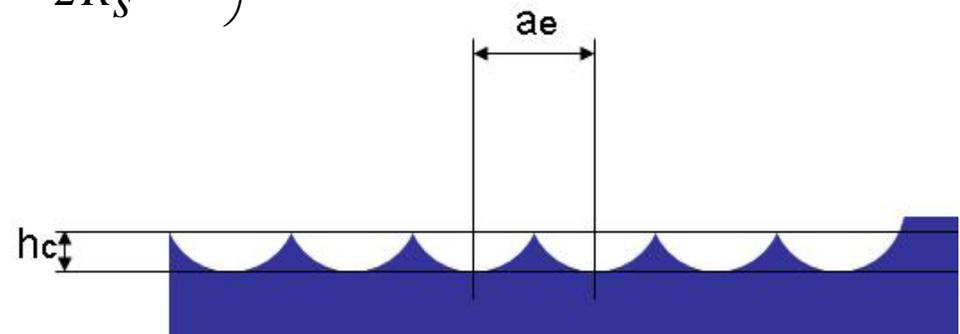


Ra et hauteur de crête théorique [Lin 96], [Grzesik 96] :

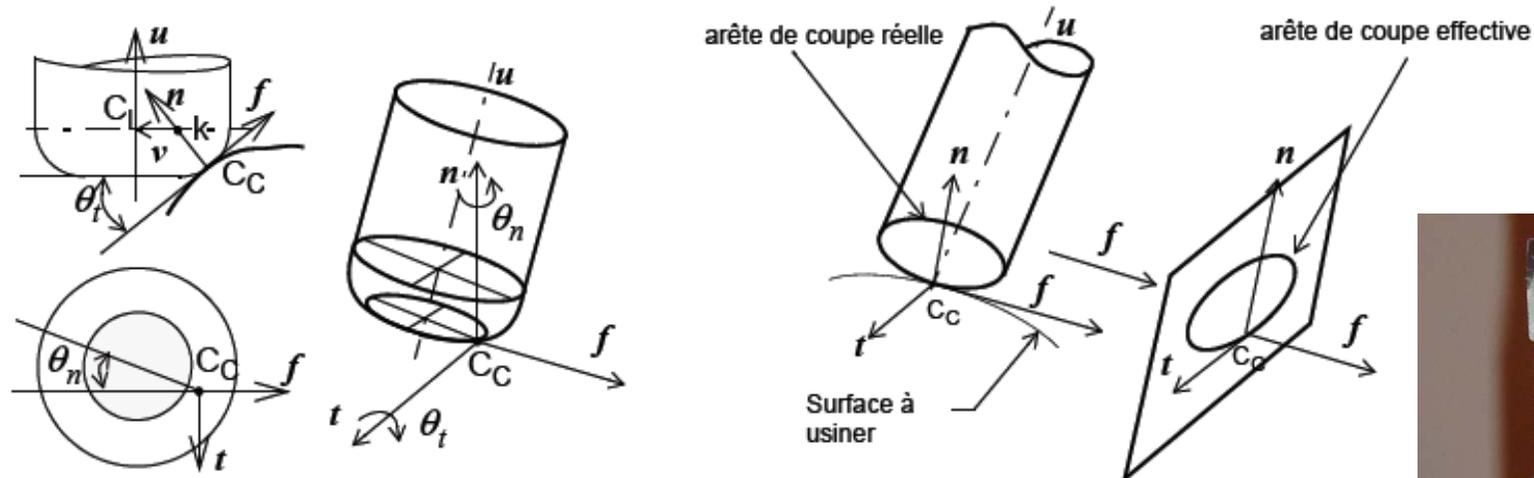
$$h_c = R_s - (R_s + R) \sqrt{1 - \left(\frac{p}{2R_s}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{(R_s + R)p}{2R_s}\right)^2}$$

Pour une surface plane

$$h_c = \frac{a_e^2}{8R} \quad \rightarrow \quad R_a = \frac{a_e^2}{18\sqrt{3}R}$$



Calcul du rayon effectif de coupe pour un outil torique [Tournier 05]:



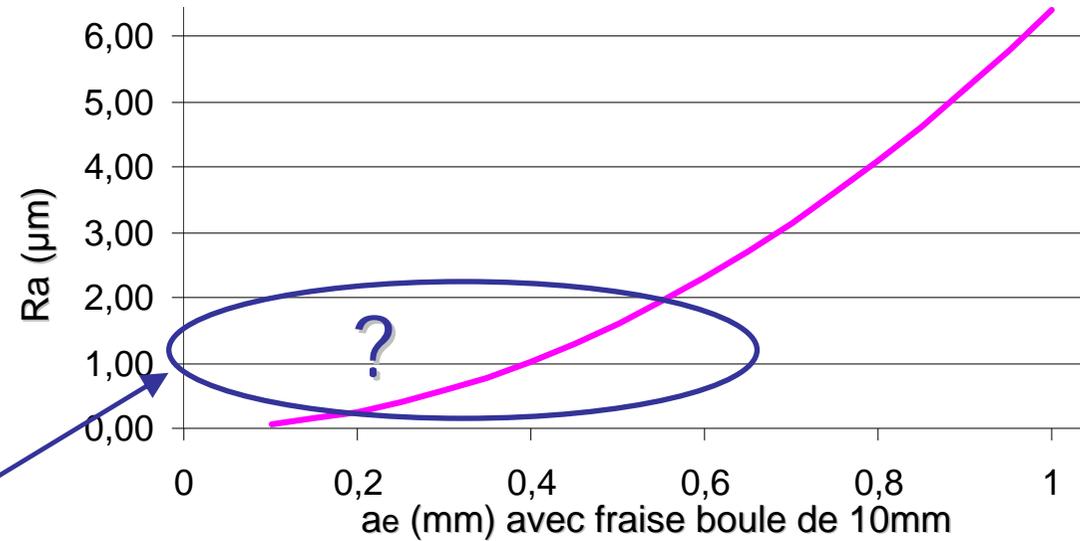
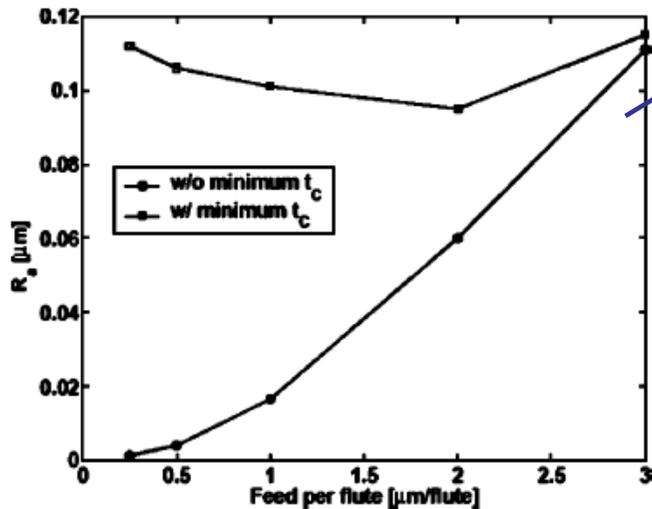
$$R_{eff} = \frac{r(R + r \sin(\theta_t))}{r \sin(\theta_t) \cos(\theta_n^2) + (R + r \sin(\theta_t)) \sin(\theta_n^2)}$$

$$\rightarrow R_a = \frac{a_e^2}{18\sqrt{3}R_{eff}}$$



Courbe de rugosité théorique en fonction de la distance entre passes radiale :

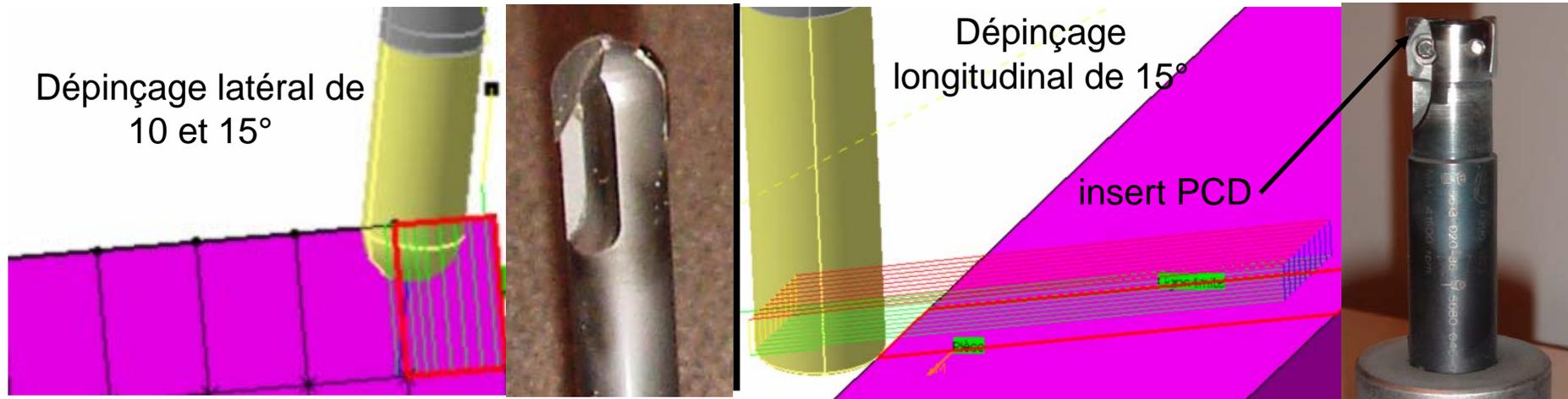
Pour des matériaux métalliques homogènes apparition d'un phénomène de copeau minimum [Vogler 04]



Phénomènes de coupe différents pour les composites [Rao 07] : Essais pour observer les phénomènes dans cette zone

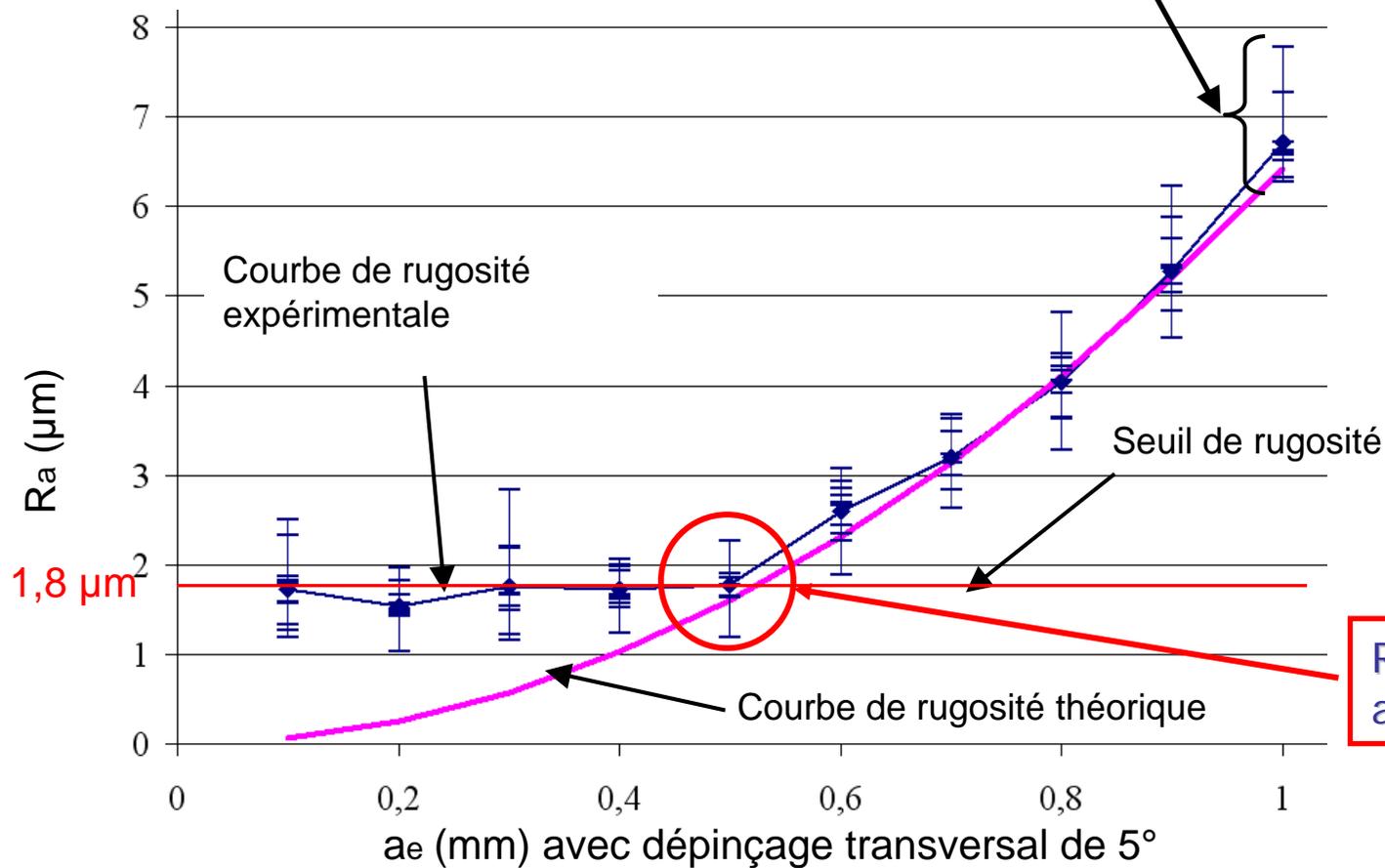
- Usinage à sec avec outils PCD boule et torique sur Huron KX15
- Essais avec dépinçage pour éviter une vitesse de coupe nulle en bout d'outil [Bouzakis 03]

outil	dépinçage (°)	V_c (m/min)	f_z (mm/tour/dent)	V_f (mm/min)	N (/min)
Boule (10mm)	transversal 5/10	500	0.1	3200	16000
Torique (R 16mm ; r 0,4mm)	longitudinal 15	800	0.1	3200	16000



Courbes de rugosité théorique et expérimentale avec boule PCD 10mm et un dépinçage transversal de 5° :

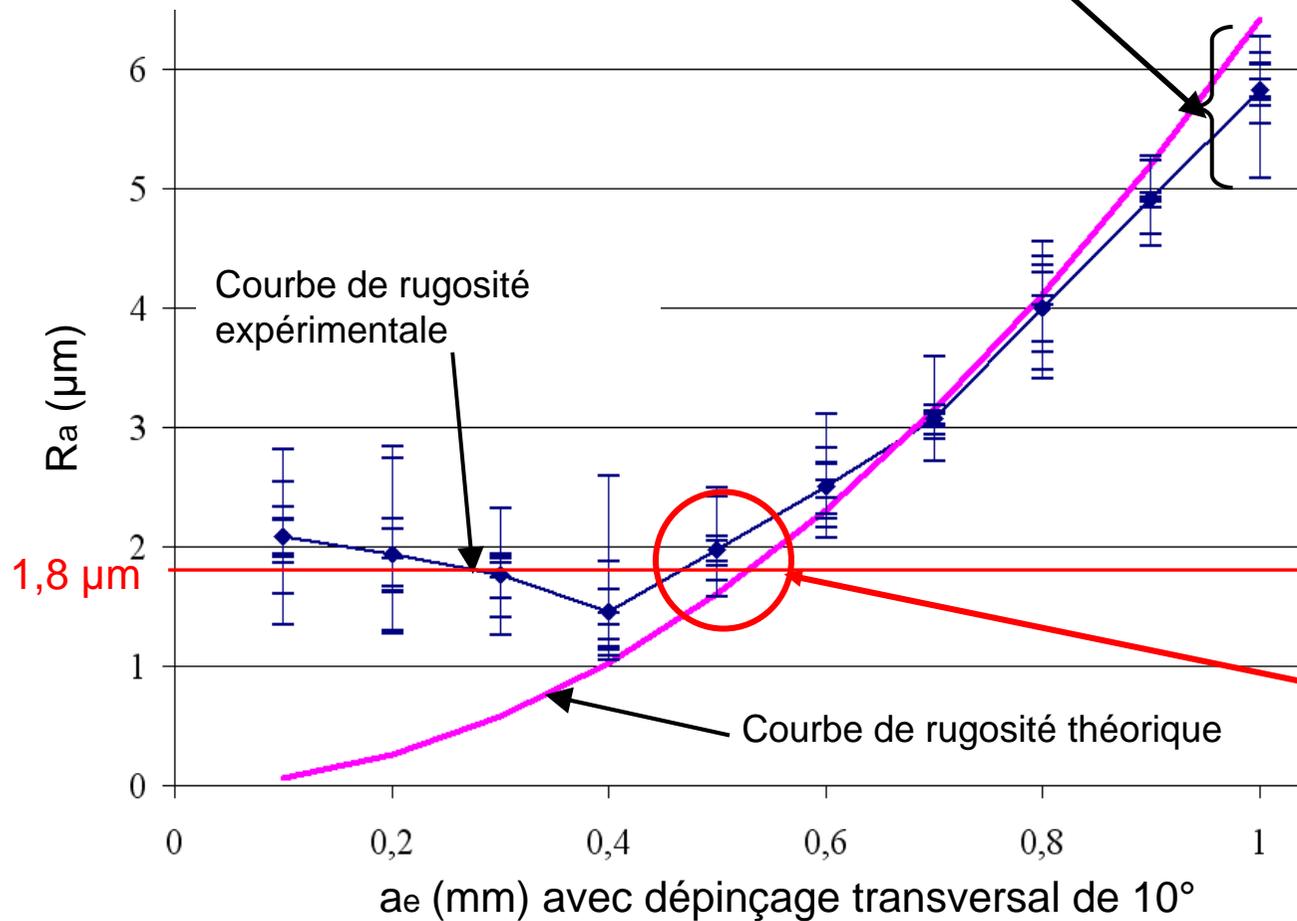
Mesure répétée 10 fois car grande dispersion due à l'hétérogénéité et aux différents mécanismes de coupe liés à l'orientation des fibres [Rao 07]



$R_a \text{ mini} = 1,8 \mu\text{m}$ pour $a_e = 0,5 \text{ mm}$

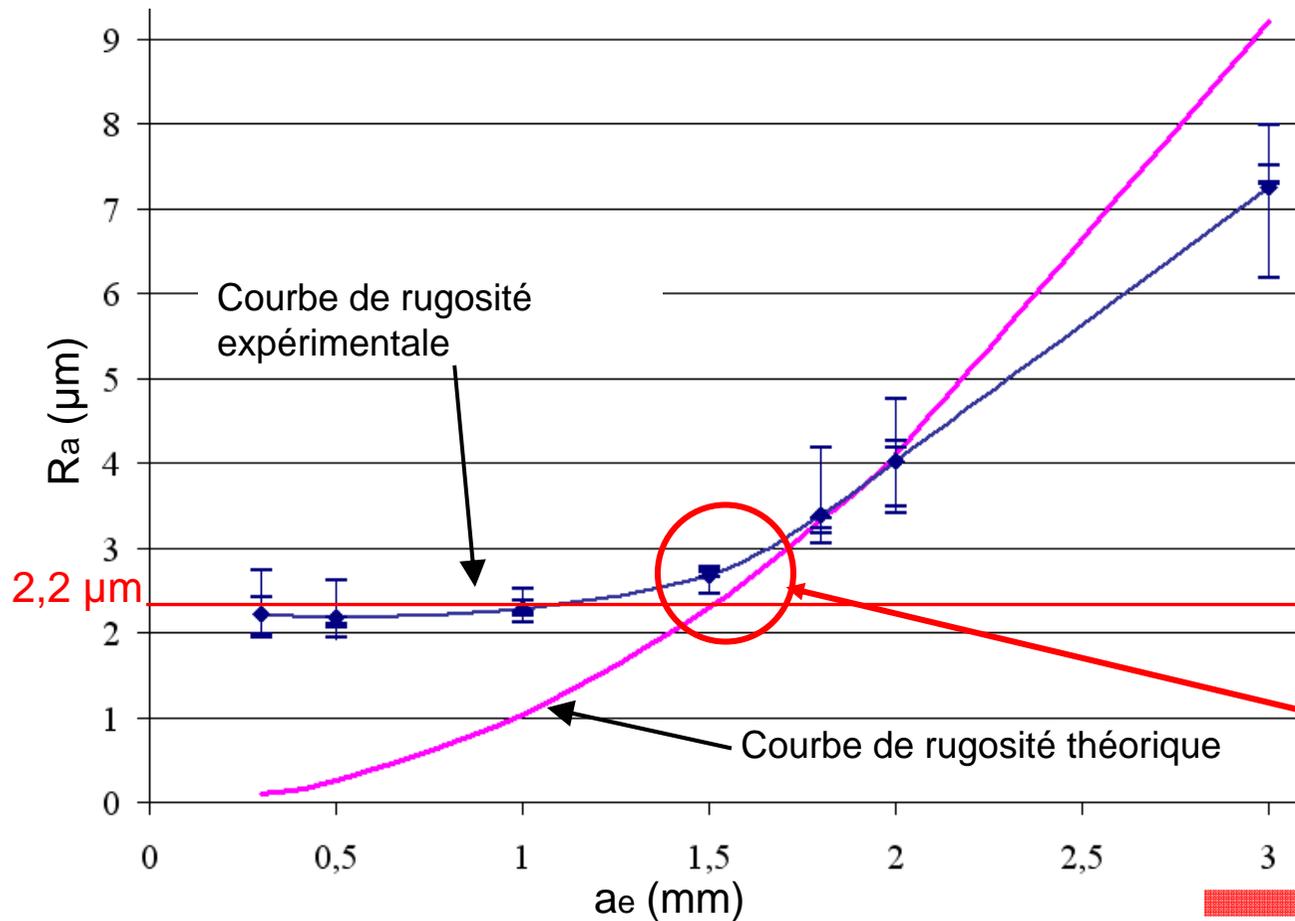
Courbes de rugosité théorique et expérimentale avec boule PCD 10mm et un dépinçage transversal de 10° :

Mesure répétée 10 fois car grande dispersion due à l'hétérogénéité et aux différents mécanismes de coupe liés à l'orientation des fibres [Rao 07]



Ra mini = 1,8µm pour ae = 0,5mm

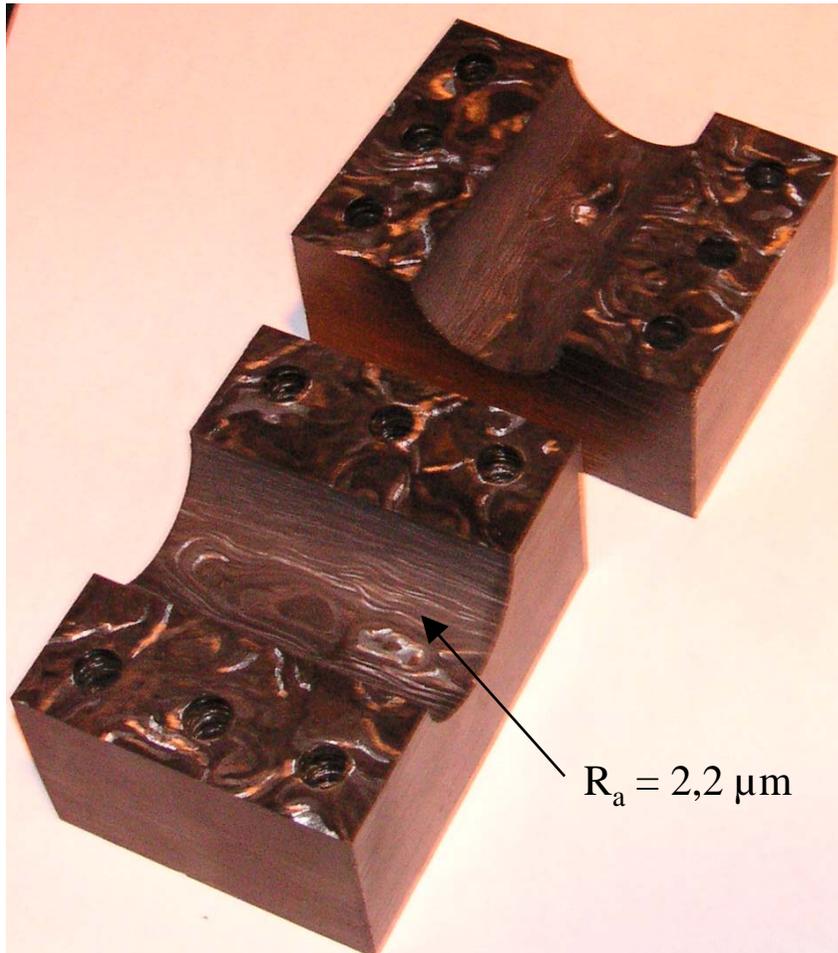
Courbes de rugosité théorique et expérimentale avec fraise torique PCD et un dépinçage longitudinal de 15° :



Ra mini = 2,2µm pour
ae = 1mm

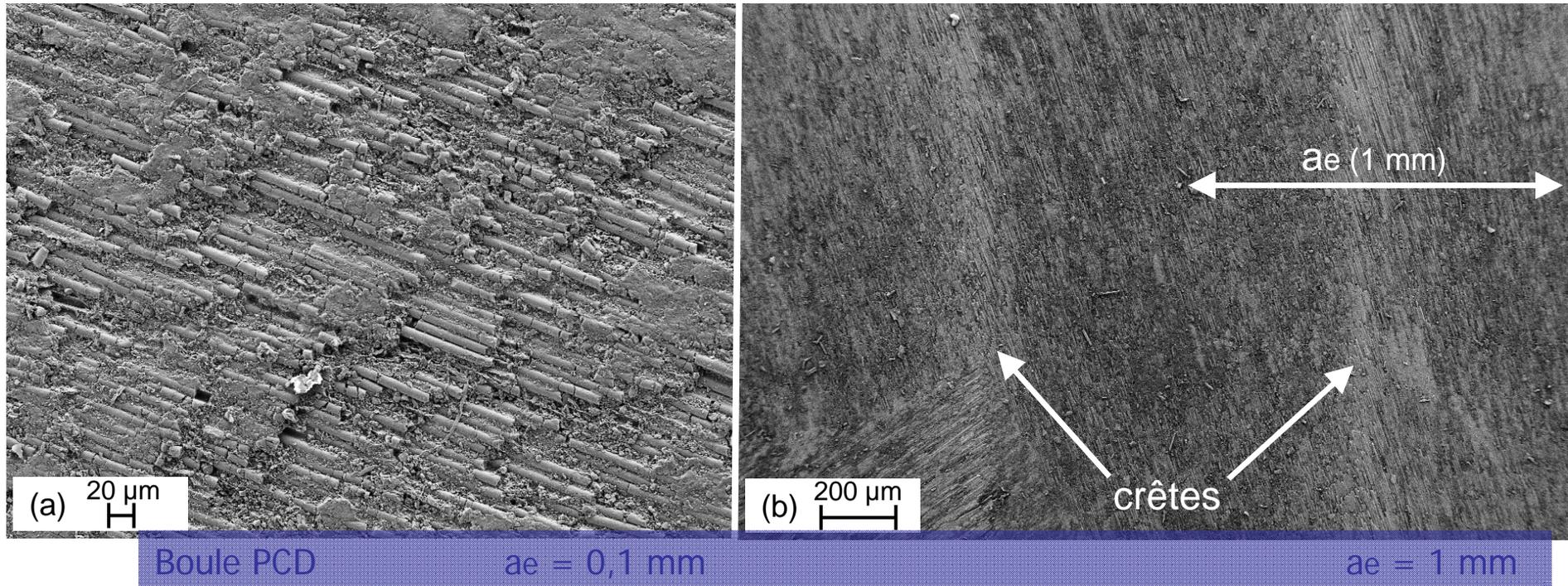
➔ Seuil 1,8 ou 2,2µm ?

Courbes de rugosité théorique et expérimentale avec fraise torique PCD et un dépinçage longitudinal de 15° :



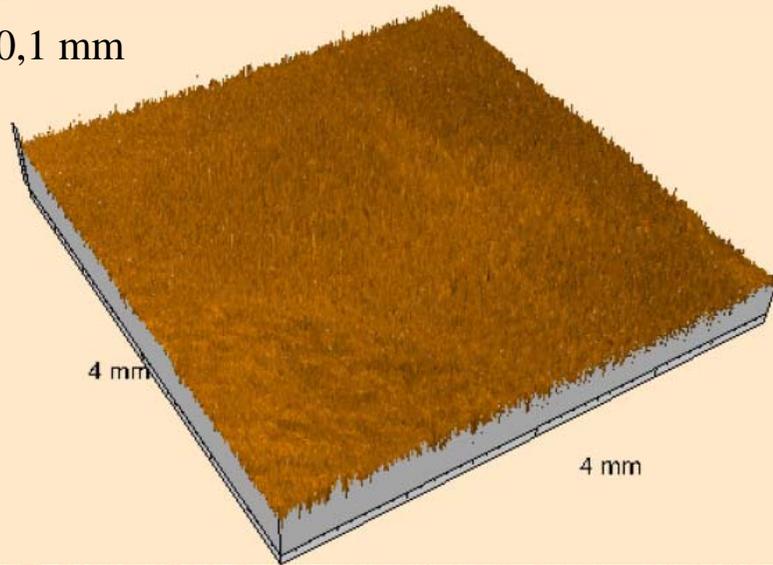
➔ Seuil 1,8 ou 2,2 μm ?

Explication du phénomène de seuil de rugosité :



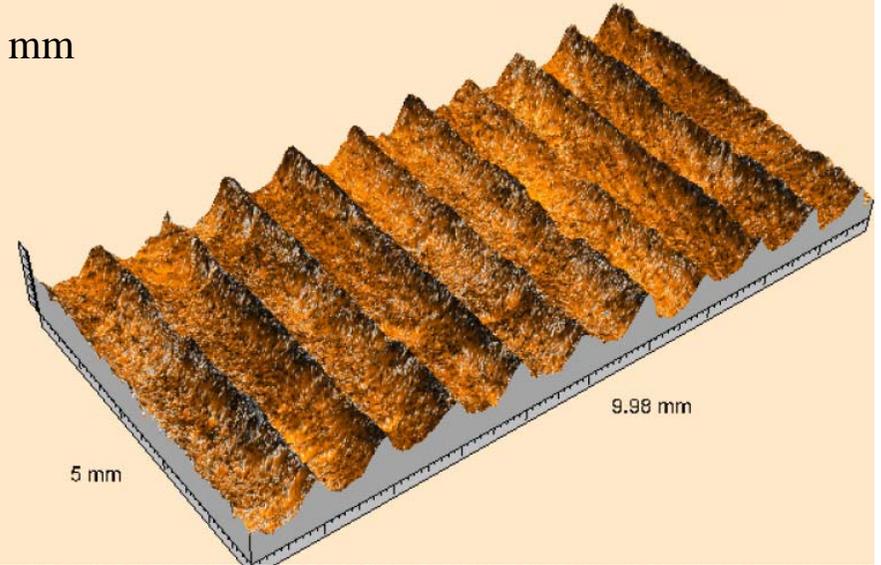
- Phénomène lié aux arrachements lors de la coupe [Rao 07]
- Apparaît lorsque la hauteur de crête est égale à la hauteur des arrachements
- Phénomène dépendant de la qualité de la coupe (arrachements) et donc du couple outil/matière

$a_e = 0,1 \text{ mm}$

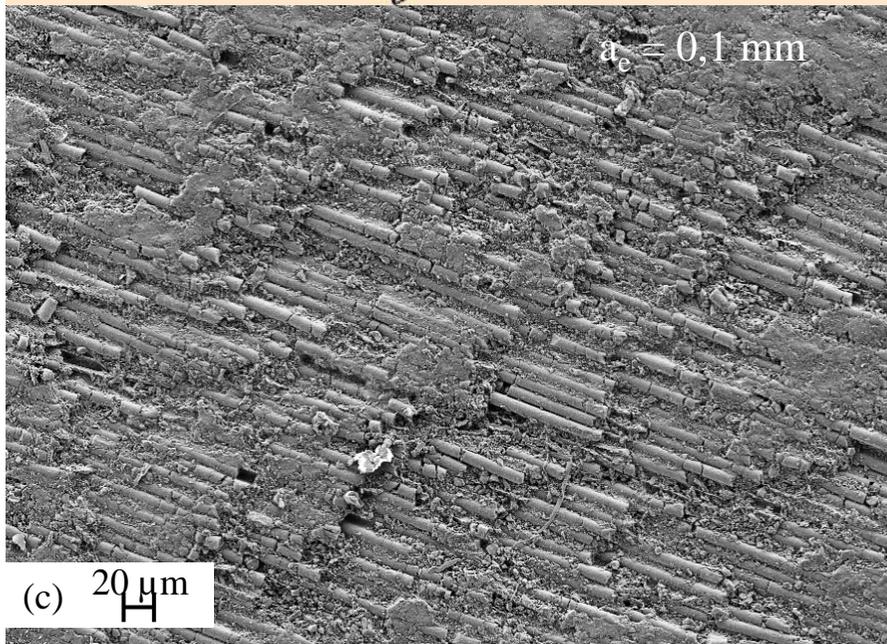


(a)

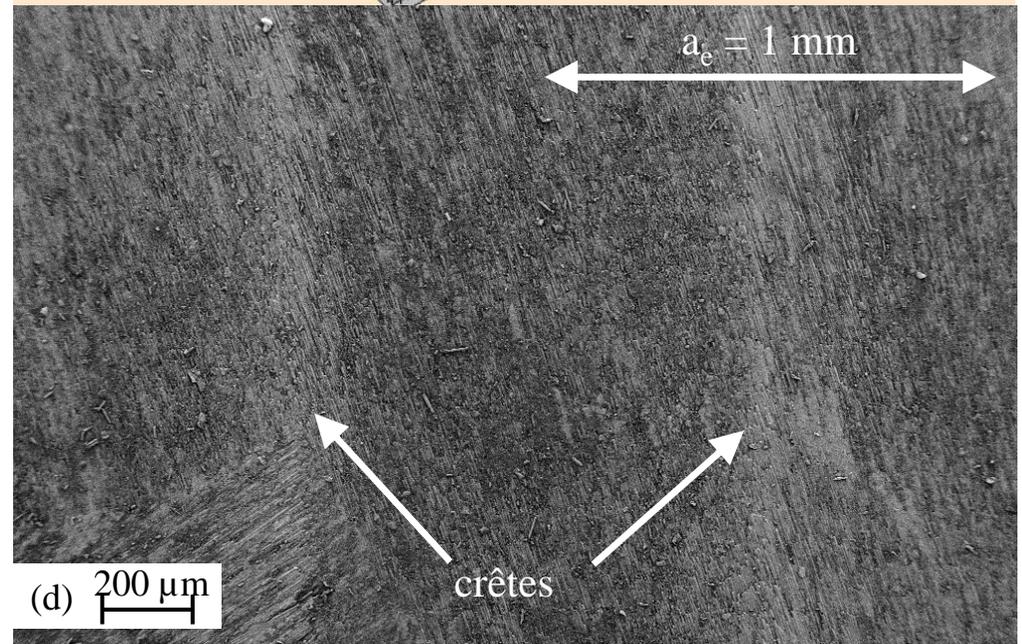
$a_e = 1 \text{ mm}$



(b)



(c) 20 μm



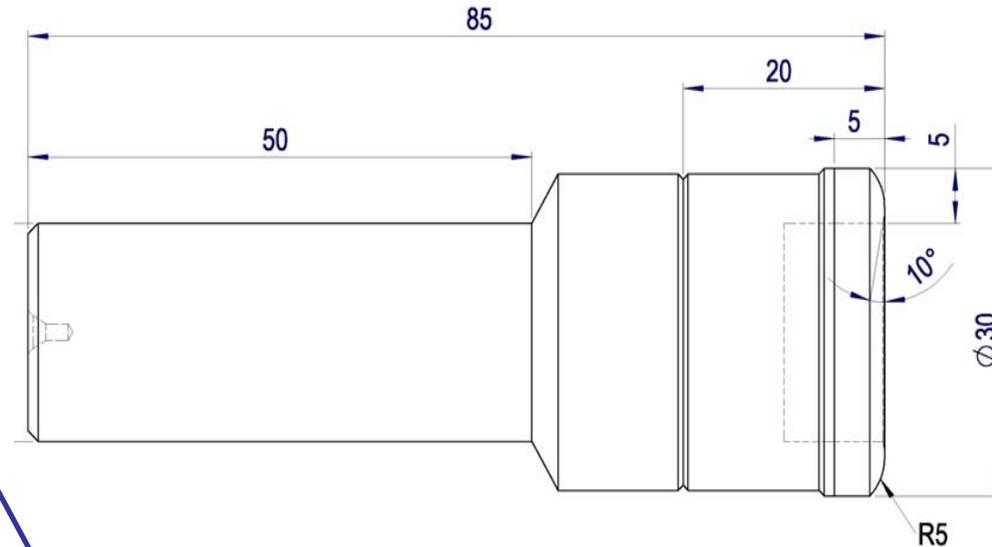
(d) 200 μm

- Mise en évidence d'un seuil de rugosité lors de l'usinage par balayage de matériaux composites
- Ce phénomène s'explique par les arrachements lors de la coupe et dépend donc du couple outil/matière utilisé
- La valeur de distance entre passes radiale où le seuil apparaît offre le meilleur ratio qualité surfacique/temps d'usinage.



- Le critère $Ra=0,8\mu\text{m}$ n'est pas atteint
- Perspectives sur l'automatisation de l'opération de polissage manuel

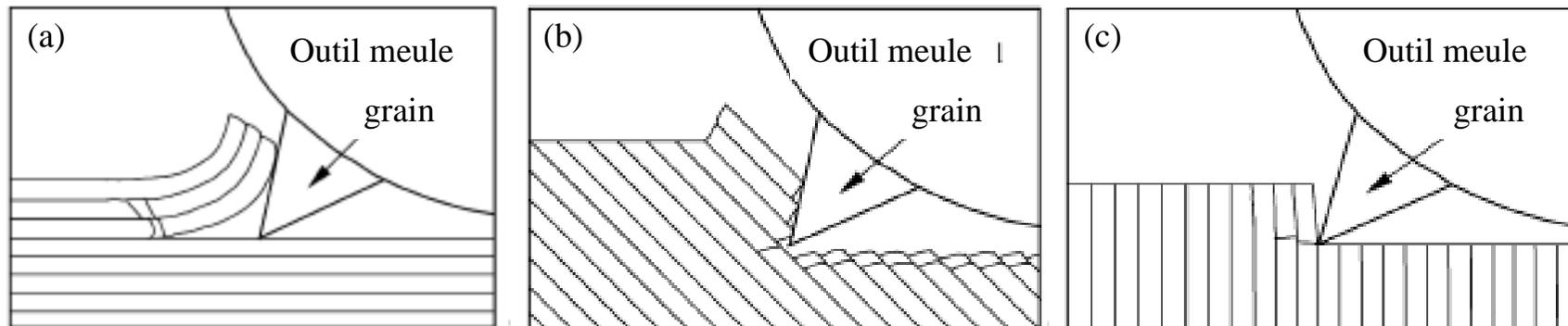
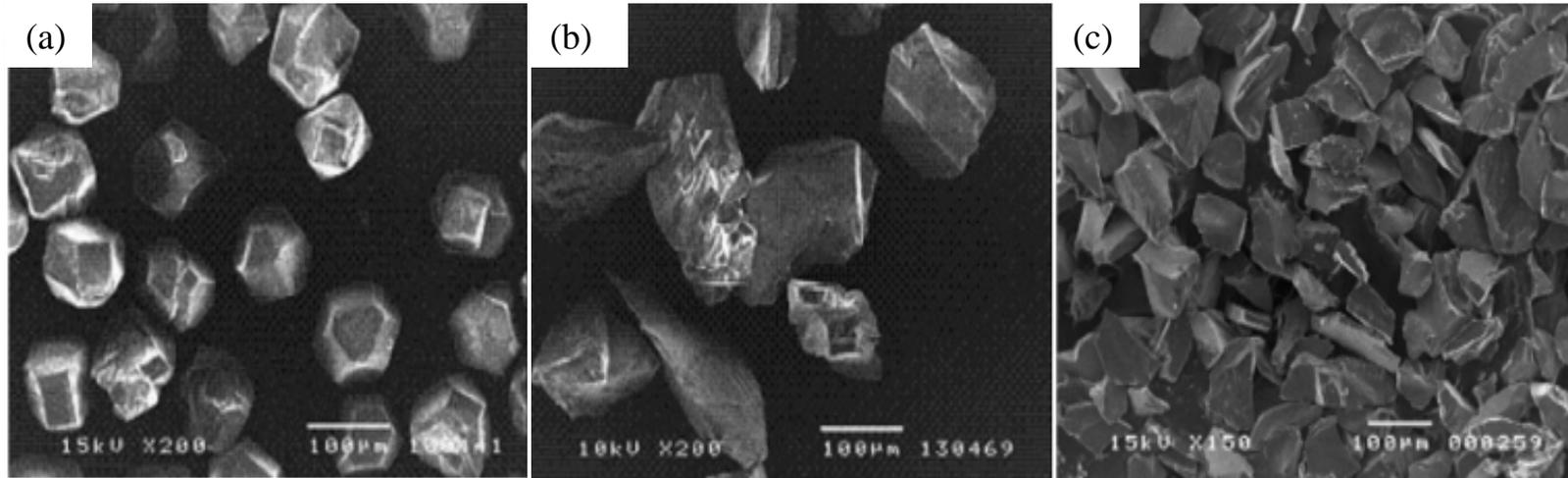
- Objectif : atteindre l'état de surface du cahier des charges avec des opérations sur CN



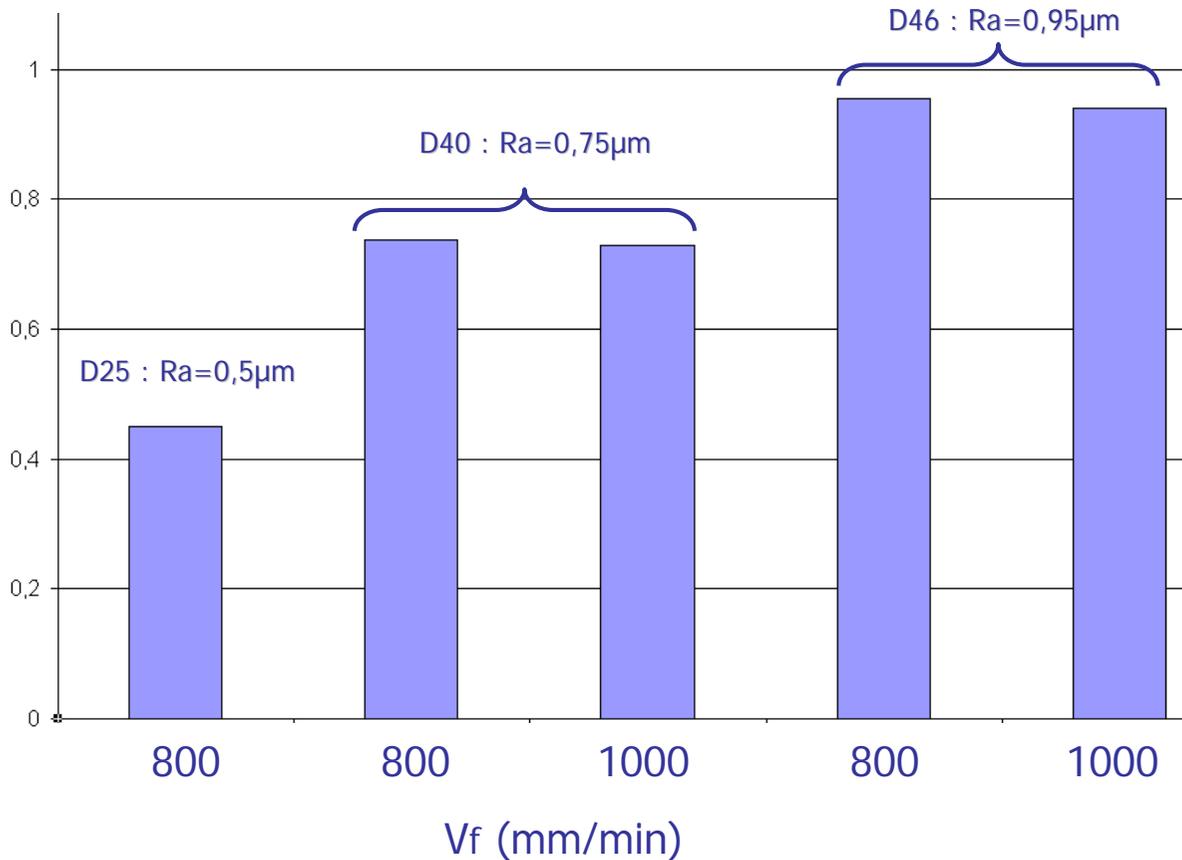
Têtes abrasives interchangeables avec 3 granulométries : 25, 40 et 46 μ m

Développement d'un outil avec Asahi Diamond Industrial Europe

- Objectif : atteindre l'état de surface du cahier des charges avec des opérations sur CN



Valider la faisabilité du meulage de composite sur CN :



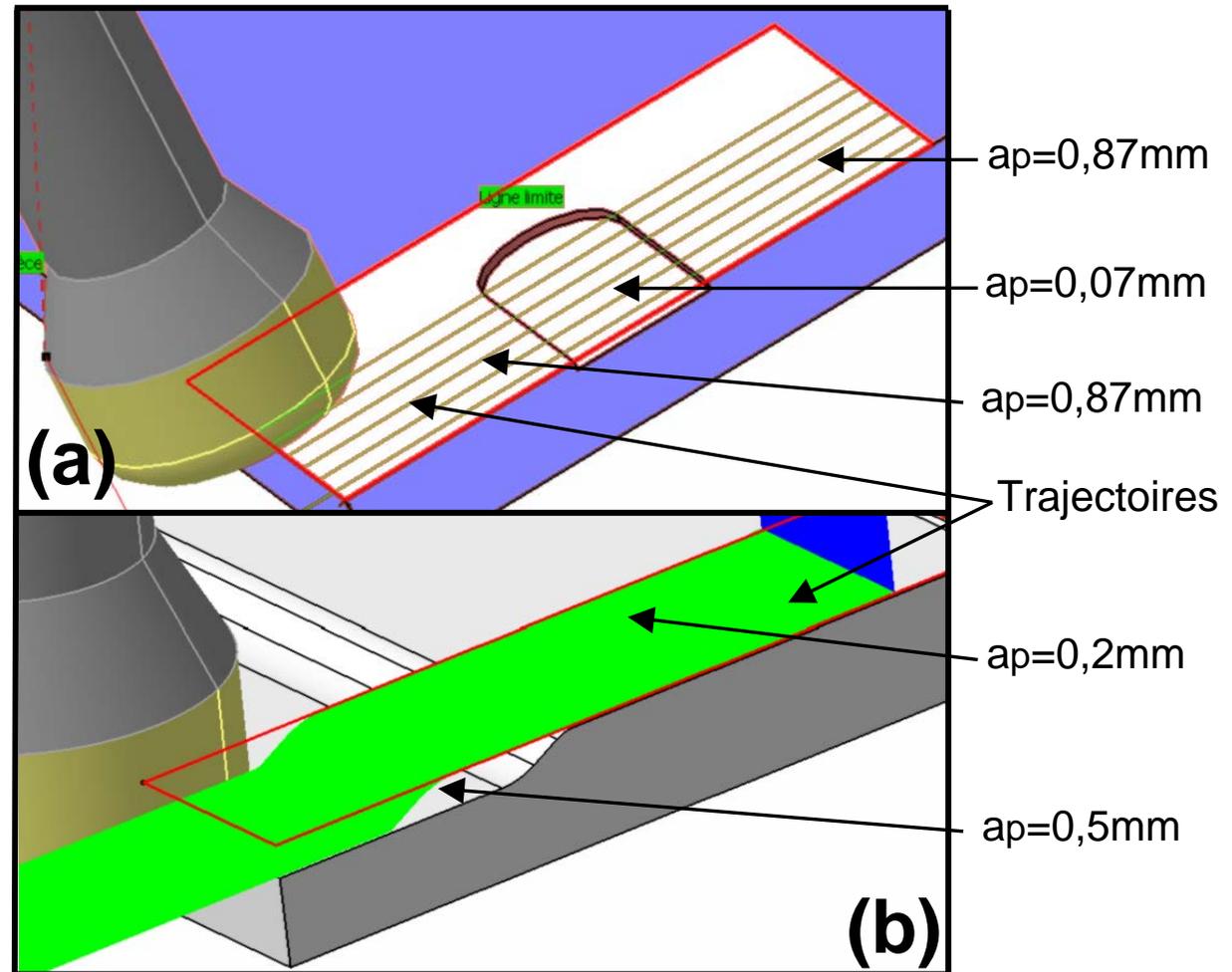
Vitesse d'avance plus faible qu'avec les outils PCD : problème endommagement et usure d'outil



Rugosités obtenues suivant les granulométries de meule et les vitesses d'avance employées

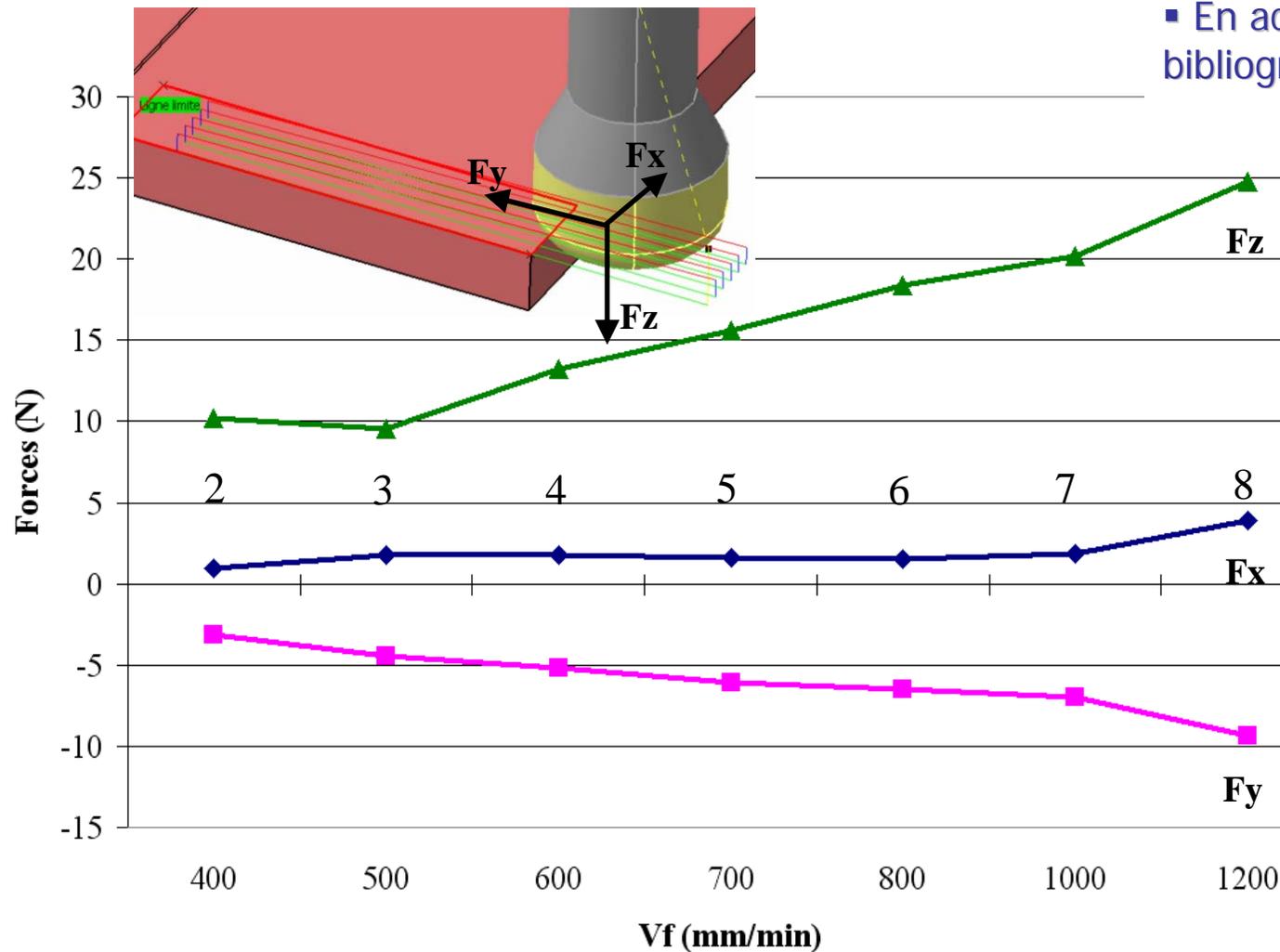
Capacité de l'outil sur une géométrie de moule industriel : variation des surépaisseurs de finition

- Prise de passe axiale a_p variant de 0,07 à 0,9mm
- R_a moyen obtenu de $0,5\mu\text{m}$: pas d'influence pour la plage testée
- Moins tolérant que les outils PCD pour les variations de surépaisseur
- Nécessite une opération de semi-finition plus élaborée



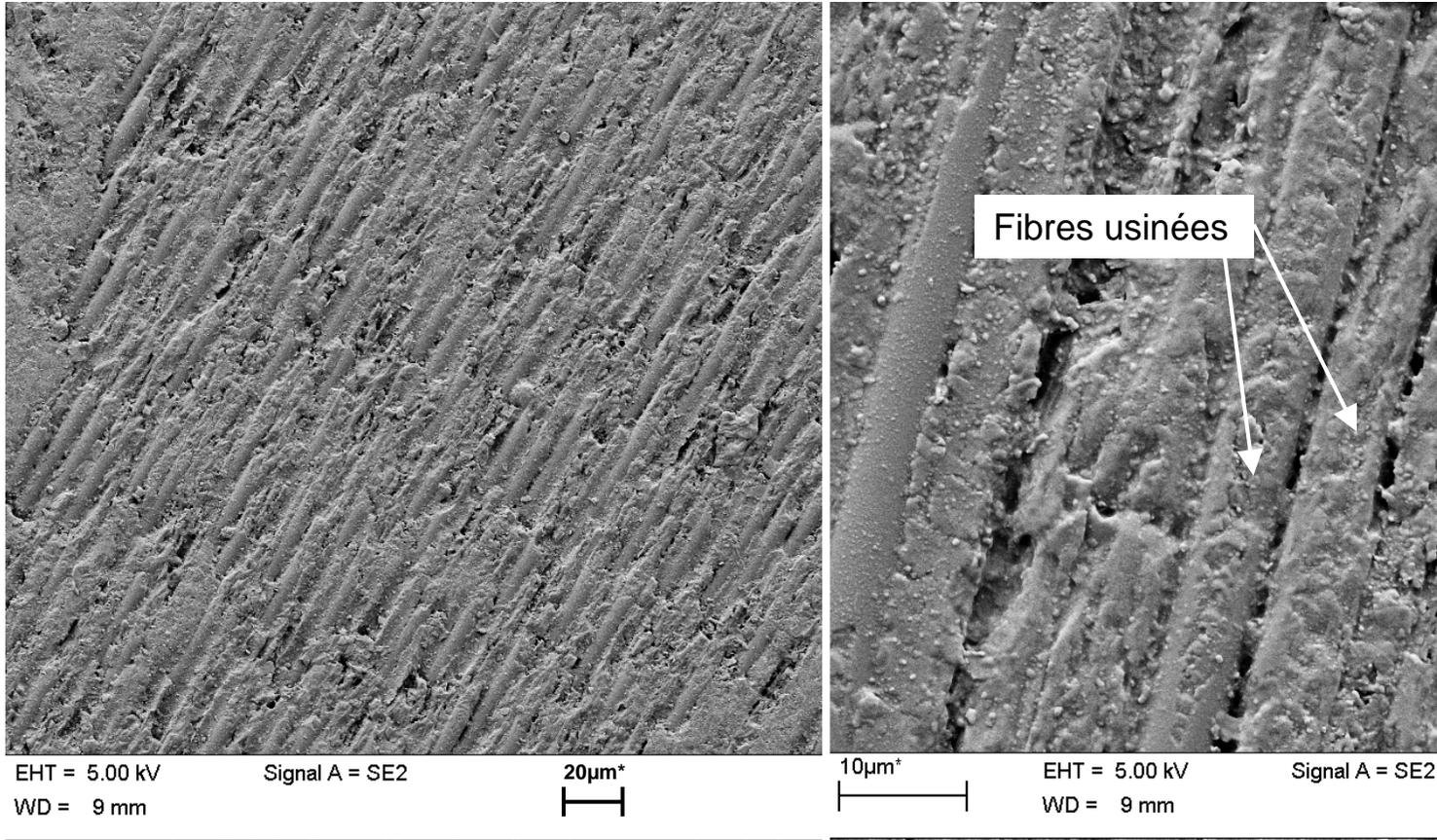
Efforts de coupe et arrachements :

- Efforts de coupe faibles
- En accord avec la bibliographie [Hu 04]



$V_c = 1000 \text{ m/min}$
 $a_p = 0,5 \text{ mm}$
 $a_e = 2,7 \text{ mm}$

Explication des faibles valeurs de rugosité :



- Efforts de coupe faibles
- Arrachements limités

Finition avec outil coupant :

- Mise en évidence d'un seuil de rugosité lors de l'usinage par balayage de matériaux composites
- Ce phénomène s'explique par les arrachements lors de la coupe et dépend donc du couple outil/matière utilisé
- La valeur de distance entre passes radiale où le seuil apparaît offre le meilleur ratio qualité surfacique/temps d'usinage.

Finition avec outil abrasif :

- Faisabilité d'une opération de meulage sur CN avec des rugosités jusqu'à $0,5\mu\text{m} (< 0,8\mu\text{m})$
- Bonne tolérance aux variations de surépaisseurs
- Productivité : avance jusqu'à 1200mm/min
- Reste à valider la tenue à l'usure

- Grande diversité de matériaux et de procédés primaires
- Usinage indispensable pour perçage et ébavurage des pièces
- Nombreux problèmes liés à la coupe : arrachement, délaminage, usure d'outil, élévation de température...
- Difficulté à modéliser la coupe (diversité des matériaux, identification des paramètres, hétérogénéité...)
- Niveau d'expertise plus faible que pour les métaux
- Des solutions d'outil performantes existent pour le perçage et le détournage
- Usinage de forme moins répandu mais difficulté à obtenir un bon état de surface
- Mise en évidence d'un seuil de rugosité
- Bonnes aptitudes des outils abrasifs

[Arola97] : D. Arola, M. Ramulu, Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites : a finite element analysis, International journal of mechanical sciences, vol. 39, p. 597-613, 1997.

[Bhatnagar94] : N. Bhatnagar, N. Ramakrishnan, N.K. Naik, R. Komanduri, On the machining of fibre reinforced plastic (FRP) composite laminate, International journal of machine tools and manufacture, vol. 35, p.701-716, 1994.

[Bouzakis03] : K.D. Bouzakis, P. Aichouch, K. Efstathiou, Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools, International Journal of machine tools and manufacture, vol. 43, p. 499-514, 2003.

[Chang06] : Chung-Shin Chang, Turning of glass-fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools, Journal of materials processing technology, vol. 180, p. 117-129, 2006.

[Davim05] : J. P. Davim, P. Reis, Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments, Journal of materials processing technology, vol. 160, p. 160-167, 2005.

[Dessarthe96] : A. Dessarthe, Usinage des matières plastiques, matériaux composites et élastomères, publications du CETIM, ISBN 2-85400-835-3, 1996.

[Gaitonde 08] : V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, J.C. Rubio, A.E. Correia, A.M. Abrao, J.P. Davim, Analysis of parametric influence on delamination in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, Journal of Materials Processing Technology, vol. 29, p. 1768-1776, 2008.

[Grzesik96] : W. Grzesik, A revised model for predicting surface roughness in turning, Wear, vol. 194, p. 143-148, 1996.

[Hu04] : N.S. Hu, L.C. Zhang, Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics, Journal of materials processing technology, vol. 152, p. 333-338, 2004.

[Lee06] : H.S. Lee, M.S. Park, M.T. Kim, C.N. Chu, Systematic finishing of dies and molds, Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, p. 1027-1034, 2006.

[Lin96] : R.S. Lin, Y. Koren, Efficient tool-path planning for machining free-form surface, Transactions of ASME, vol. 118, p. 20-28, 1996.

[Quinsat08] : Y. Quinsat, L. Sabourin, C. Lartigue, Surface topography in ball end milling process : description of a 3D surface roughness parameter, Journal of materials processing technology, vol. 195, p. 135-143, 2008.

[Rao07] : G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar, Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites-cutting forces analysis, Composites science and technology, vol. 67, p. 579-593, 2006.

[Teti02] : R. Teti, Machining of composites materials, University of Naples Federico II, 2002.

[Tournier05] : C. Tournier, E. Duc, Iso-scallop tool path generation in 5-axis milling, International Journal of Advanced Technology, vol. 25, p. 867-875, 2005.

[Vogler04] : M.P. Vogler, R.E. Devor, S.G. Kapoor, On the modelling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part 1 : surface generation, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 126, p. 685-694, 2004.