

# Optimisation des paramètres de coupe pour minimiser la température de coupe lors de l'usinage des tubes HDPE-100

N. HAMLAOUI <sup>a</sup>, K. CHAOUI <sup>b</sup>, S. AZZOUZ <sup>b</sup>,  
M.-A. YALLESE <sup>c</sup>, Z. AZARI <sup>d</sup>

a. LR3MI, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et de la Technologie,  
Université 8 Mai 1945, BP 401, Guelma 24000, Algérie. [hamlaoui.nacira@univ-guelma.dz](mailto:hamlaoui.nacira@univ-guelma.dz)

b. LR3MI, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Université  
Badji Mokhtar, BP 12, Annaba 23000, Algérie. [chaoui.kam23@gmail.com](mailto:chaoui.kam23@gmail.com)

c. LMS, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et de la Technologie,  
Université 8 Mai 1945, BP 401, Guelma 24000, Algérie.

d. LABPS – ENIM, Université de Lorraine, F-57045 Metz Cedex 01, France.

## Résumé :

*La production de tubes en polyéthylène de haute densité (HDPE) est habituellement assurée par le procédé d'extrusion. Cependant, des accessoires et des pièces de jonction ou d'essai doivent être fabriqués par d'autres procédés d'enlèvement de matière. Cette étude s'intéresse à l'usinabilité de la matière HDPE obtenue par extrusion en vue de la préparation d'éprouvettes standards pour le contrôle qualité et les protocoles de recherche. Elle considère l'influence des paramètres de coupe i.e. la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $ap$ ) sur la température de coupe ( $t^\circ$ ). Un modèle de second ordre est développé pour prédire la température de coupe en utilisant la méthodologie de surfaces de réponse (RSM) et le plan d'expériences, en vue de déterminer les meilleures conditions d'usinage. Les résultats trouvés indiquent que la température de coupe du HDPE est considérablement influencée par la vitesse de coupe.*

**Mots clefs : HDPE-100, Usinabilité, Température, RSM**

## Abstract :

*Manufacturing of High Density Polyethylene (HDPE) pipes is usually achieved by extrusion processes. However, various joining or fitted parts and mechanical testing samples are prepared by material removal methods. This study focuses on the machinability of the HDPE tough resin used for piping and fittings to make standard test specimens. The effect of the cutting parameters i.e. cutting speed ( $V_c$ ), feed ( $f$ ) and depth of cut ( $ap$ ) on the measured cutting temperature ( $t^\circ$ ) is evaluated. A second order model has been elaborated between the cutting parameters and cutting temperature by using the response surface methodology (RSM) and experimental design, in order to determine the best machining conditions. The results reveal that the cutting speed has a significant effect on the cutting temperature of the HDPE.*

**Keywords : HDPE-100, Machinability, Temperature, RSM**

# 1 Introduction

De nos jours, l'utilisation des tubes en polyéthylène haute densité (HDPE) domine considérablement les différents secteurs de transport de fluides par réseaux enterrés. Les tubes ainsi que les géomembranes en polyéthylène sont utilisés avec succès depuis plus d'un demi-siècle principalement dans les systèmes d'alimentation en gaz combustibles, en eau potable, dans le drainage des terres arables, pour l'étanchéité des bassins d'eau, des retenues collinaires et des barrières de rétention anti-pollution liquides (Centre d'Enfouissements Techniques). Ces applications ont connu plusieurs améliorations avec l'avènement de résines co-polymérisées suffisamment résistantes et durables [1-3]. Les tubes en HDPE offrent une très bonne adéquation entre la résistance et la durabilité à long terme et les exigences en termes de coûts d'acquisition et de techniques d'installation et de maintenance [4,5].

L'usinage des polymères n'est pas fréquent comparativement avec les métaux, l'optimisation du régime de coupe (vitesse de coupe ( $V_c$ ), avance ( $f$ ) et profondeur de passe ( $ap$ )), a une importance capitale. Un principal paramètre à limiter est la température qui ne doit pas dépasser 40 °C selon les normes ISO et en particulier pour les tubes sous pression. La comparaison des propriétés de dilatation thermique du PE avec l'acier ordinaire, les coefficients se situent dans les plages ( $30-40 \times 10^{-5}$  m/m K) et ( $3-7 \times 10^{-5}$  m/m K), respectivement. Une telle divergence dans les propriétés explique les difficultés rencontrées lors de la confection des pièces en PE, ou des composants en mode de frottement et la dégradation de la propriété structurelle qui en découle du fait de la génération importante de la chaleur.

En outre, les résines de PE sont de mauvais conducteurs de chaleur et ont une basse température de fusion. La concurrence entre ces deux conditions montre que la chaleur produite est généralement concentrée dans la zone de coupe où les contraintes thermiques sont amplifiées et entraînent par conséquent des risques de dégradation plus élevés [6,7].

En plus des effets des conditions de coupe, des outils émoussés ou bien des tranchants qui raclent plutôt qu'ils ne coupent provoquent un dégagement de chaleur excessif, ce qui peut générer des contraintes internes préjudiciables aux dimensions géométriques de la pièce finie.

La répartition de la chaleur dépend de différents facteurs: les propriétés physico-mécaniques de la matière, les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ), les paramètres géométriques de l'outil, le liquide d'arrosage, etc. Le dégagement de chaleur dû au frottement du copeau sur l'outil, à la déformation plastique du copeau et de la pièce se partage entre l'outil, le copeau et la pièce usinée. La chaleur, due à la déformation plastique dans le plan de cisaillement, s'écoule essentiellement dans le copeau, et le reste est dissipé par rayonnement et dans la pièce usinée par conduction thermique. Plusieurs études ont montré que la majorité de la chaleur générée est évacuée par le copeau [8-10]. Enfin, la méthodologie de surfaces de réponse (RSM) continue à être utilisée pour élaborer des modèles d'optimisation ou de prédiction concernant les paramètres de sorties telles que la rugosité de surface, la puissance de coupe, la durée de vie de l'outil et les paramètres de coupe [11].

L'objectif de cette étude est de trouver une corrélation entre les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ , et  $ap$ ) et la température de coupe du HDPE, en utilisant la méthode RSM. Le développement d'un modèle de second ordre est adopté pour prédire les valeurs de la température à travers la fonction de désirabilité. L'approche de l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour voir l'ordre de contribution des facteurs sur la température de coupe.

## 2 Etude expérimentale

### 2.1 Matériau et matériels utilisés

Le matériau considéré est un tube en HDPE-100 (diamètre extérieur :  $\varnothing = 200$  mm, épaisseur :  $t = 12$  mm). Il a été fabriqué par la Compagnie STPM CHIALI (SBA, Algérie). La masse volumique est de  $0,960$  kg/m<sup>3</sup>, l'indice de fluidité est de  $0,75$  g/10 min à 190 °C et la teneur en noir de carbone varie de  $2,0$  à  $2,6$  % [12].

Les opérations de tournage ont été réalisées sur un tour conventionnel à charioter et à fileter de la société Tchèque «TOS TENCIN» modèle SN 40 d'une puissance de  $6.6$  kW sur la broche, ayant une gamme de vitesse de  $45$  à  $2000$  tr/min et d'avance de  $0.08$  à  $6.4$  mm/tr. L'outil de coupe utilisé est en acier rapide HSS avec un angle de coupe et un angle de dépouille égaux ( $\gamma = \alpha = 15^\circ$ ).

Un thermomètre à infrarouge digital portable de type TT0986 est utilisé pour prélever la température de copeau sans contact.

Pour l'étude de l'impact des paramètres de coupe, un plan expérimental fondé sur une table orthogonale standard  $L_{27}(3^{13})$  de Taguchi a été adopté [13]. Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le **Tableau 1**. Les résultats de la température sont analysés par Minitab-16 en appliquant l'analyse de la surface des réponses [14].

**Tableau 1**: Paramètres de coupe et niveaux associés.

Facteur	Unité	Symbole	Niveau		
			1	2	3
Vitesse de coupe	m/min	Vc	55	110	220
Vitesse d'avance	mm/tr	f	0.12	0.2	0.28
Profondeur de passe	mm	ap	0.5	1	1.5

## 2.2 Méthodologie de surfaces de réponse

La méthodologie de surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques mathématiques et statistiques, qui sont utiles pour la modélisation et l'analyse des problèmes, dans lequel une réponse d'intérêt (à optimiser) est influencée par plusieurs variables [11,15]. Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante  $Y$ , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (ou facteurs),  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse.

Dans la présente étude, la relation entre les paramètres d'entrée ( $V_c, f$ , et  $a_p$ ) et la température de coupe est donnée par l'équation (1) :

$$Y = f(V_c, f, a_p) + e_{ij} \quad (1)$$

où  $e_{ij}$  représente l'erreur observée dans la réponse  $Y$ . Il est possible aussi d'écrire le modèle mathématique du second ordre, fondé sur la *RSM* pour une réponse donnée ( $Y$ ) sous la forme suivante (Eq 2) :

$$Y = \lambda_0 + \sum_{i=1}^3 \lambda_i X_i + \sum_{i=1}^3 \lambda_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 \lambda_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

où  $Y$  est la réponse observée (critères de rugosité),  $\lambda_0, \lambda_i, \lambda_{ij}, \lambda_{ii}$  représentent respectivement les termes constants, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Les  $X_i$  représentent les variables indépendantes, qui correspondent à des paramètres de coupe étudiés.

## 2.3 Analyse de variance ANOVA

L'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la température de coupe. Pour qualifier les modèles, plusieurs coefficients d'ajustement doivent être préalablement définis [16].

La somme des carrés ( $SS_i$ ) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale :

$$SS_i = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

où  $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$  : la moyenne des réponses,  $\bar{y}_i$  : la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur  $f$  prend son niveau  $i^{\text{ème}}$ ,  $N$  : le nombre total d'expérience et  $N_{nf}$  : le niveau de chaque facteur.

La moyenne des carrés ( $MC$ ) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté :

$$MC_i = \frac{SS_i}{d_{f_i}} \quad (4)$$

L'indice  $F$  est le rapport entre la moyenne des carrés du modèle de régression et les carrés moyens des erreurs expérimentales:

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (5)$$

avec :  $MC_e$  les carrés moyens des erreurs.

Dans la méthode ANOVA, une colonne est dédiée au calcul de la contribution des facteurs (PC en %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat :

$$Cont. \% = \frac{SS_i}{SS_T} \times 100 \quad (6)$$

### 3 Résultats et Discussions

Les résultats expérimentaux présentés dans le [Tableau 2](#) correspondants à la température de coupe ont été obtenus suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe, vitesse de coupe ( $V_c$ ), avance par tour ( $f$ ) et profondeur de passe ( $ap$ ), lors de l'usinage de polyéthylène de haute densité. Les valeurs obtenues de la température sont dans l'intervalle de 23 – 38 °C.

#### 3.1 Analyse de variance (ANOVA)

Le [Tableau 3](#) montre l'ANOVA pour la température de coupe pour un niveau de signification de 5%. Puisque P-value calculée pour le modèle est inférieure à 0.05 ([Tableau 3](#)), cela implique que le modèle est adéquat et que les termes du modèle ont un effet significatif sur la réponse.

L'analyse présentée dans le [Tableau 3](#) montre que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ), la profondeur de passe ( $ap$ ) et le produit ( $V_c \times V_c$ ) ont des effets statistiquement significatifs sur la température de coupe pour un niveau de confiance de 95%. Les contributions calculées sont 61.54, 4.25, 23.89, et 8.49% respectivement, alors que les produits ( $f^2$ ,  $ap^2$ ) et les interactions ( $V_c \times f$ ,  $V_c \times ap$  et  $f \times ap$ ) n'ont pas d'intensité significative.

La plus grande partie de l'énergie libérée est dépensée à la fois pour couper et déformer plastiquement les copeaux. Une partie de cette énergie est transformée en chaleur par frottement aux deux interfaces (outil-copeau et outil-pièce). La génération de chaleur pendant l'usinage entraîne une augmentation de la température dans la zone de processus et il s'avère que la vitesse de coupe est le facteur le plus important dans la température de coupe.

Tableau 2: Mesures de la température de coupe en fonction du plan d'expériences.

N° Essai	Valeurs réelles			Résultats expérimentaux
	Vc(m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	t° (°C)
1	55	0.12	0.5	23
2	55	0.12	1	25
3	55	0.12	1.5	29
4	55	0.20	0.5	24
5	55	0.20	1	26
6	55	0.20	1.5	28
7	55	0.28	0.5	24
8	55	0.28	1	27
9	55	0.28	1.5	31
10	110	0.12	0.5	28
11	110	0.12	1	30
12	110	0.12	1.5	33
13	110	0.2	0.5	30
14	110	0.2	1	31
15	110	0.2	1.5	34
16	110	0.28	0.5	31
17	110	0.28	1	33
18	110	0.28	1.5	36
19	220	0.12	0.5	32
20	220	0.12	1	34
21	220	0.12	1.5	36
22	220	0.2	0.5	32
23	220	0.2	1	35
24	220	0.2	1.5	37
25	220	0.28	0.5	33
26	220	0.28	1	36
27	220	0.28	1.5	38

Tableau 3: ANOVA pour t°

Source	d <sub>f</sub>	SS	Adj MC	F	P value	Cont. (%)	Observation
<i>Régression</i>	9	464.302	51.589	131.66	0.000	98.58	<i>Signifiant</i>
<i>Vc</i>	1	289.844	320.889	818.92	0.000	61.54	<i>Signifiant</i>
<i>f</i>	1	20.056	19.409	49.53	0.000	4.25	<i>Signifiant</i>
<i>ap</i>	1	112.500	108.431	276.72	0.000	23.89	<i>Signifiant</i>
<i>Vc * Vc</i>	1	40.008	40.008	102.10	0.000	8.49	<i>Signifiant</i>
<i>f * f</i>	1	0.463	0.463	1.18	0.292	0.098	<i>Non signifiant</i>
<i>ap * ap</i>	1	0.463	0.463	1.18	0.292	0.098	<i>Non signifiant</i>
<i>Vc * f</i>	1	0.063	0.063	0.16	0.692	0.013	<i>Non signifiant</i>
<i>Vc * ap</i>	1	0.571	0.571	0.244	1.46	0.121	<i>Non signifiant</i>
<i>f * ap</i>	1	0.333	0.33	0.85	0.369	0.070	<i>Non signifiant</i>
<i>Error</i>	17	6.661	0.392				
<i>Total</i>	26	470.963					

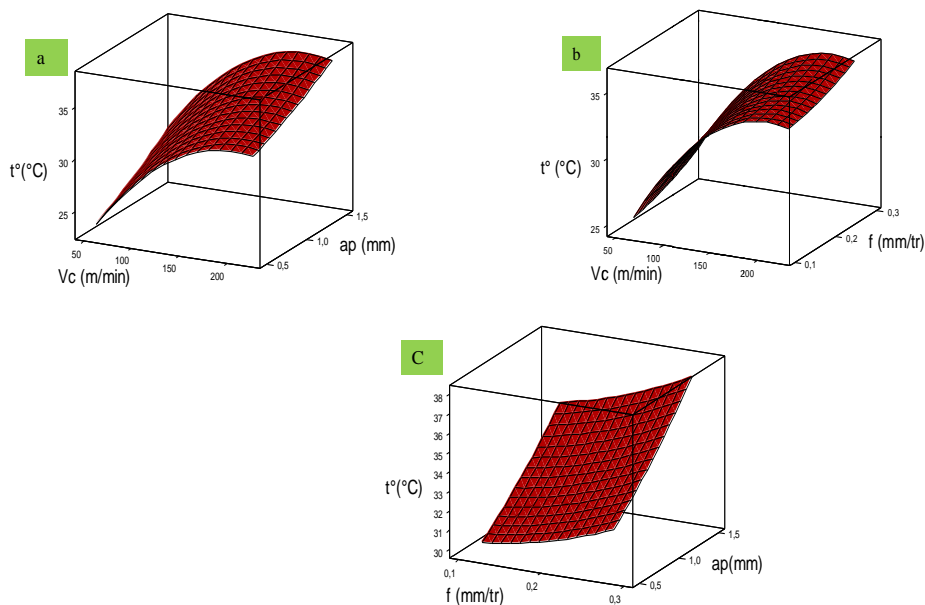
### 3.2 Modèle de prédiction

La relation entre les entrées (*facteurs*) et la sortie (*température de coupe*) a été modélisée par l'équation quadratique de régression. L'équation de régression obtenue est la suivante (Eq 7) :

$$\begin{aligned}
 t^{\circ} = & 12.986 + 0.1178 V_c - 6.944 f + 2.611 ap - 43.46 \times 10^{-5} V_c^2 - 43.40 f^2 + 1.11 ap^2 \\
 & - 10.82 \times 10^{-3} V_c \times f - 51.95 V_c \times ap + 4.16 f \times ap \quad (7) \\
 & (R^2 = 98.6\%, R^2_{adj} = 97.8\%)
 \end{aligned}$$

Le coefficient de détermination  $R^2$  est utilisé pour juger l'adéquation du modèle de régression développé. Il est de 98.6% ce qui montre une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et prédites.

Pour visualiser l'influence des paramètres de coupe sur la température ( $t^{\circ}$ ), les surfaces de réponse (3D) sont présentées dans la *Figure 1*. L'évolution de la température est présentée en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe pour une avance égale à 0.2 mm/tr (*Figure 1a*). La tendance observée indique une augmentation de la température tandis que l'influence de  $ap$  reste assez inférieure à celui de  $V_c$ . La *Figure 1b* montre l'influence de la vitesse coupe et de l'avance sur la température de coupe à profondeur de passe constante. Comme prévu, la température de coupe augmente avec la vitesse de coupe et une légère augmentation avec la vitesse d'avance. L'effet simultané de la profondeur de passe et de l'avance sur la température de coupe à vitesse constante de 137.5 m/min (*Figure 1c*).



**Fig 1:** Surfaces de réponse 3D pour  $t^{\circ}$  en fonction de  $V_c$ ,  $ap$  et  $f$ .

### 3.3 Test de normalité de la distribution des résidus

L'analyse de la distribution des résidus est basée sur le test d'Anderson-Darling, qui est un test puissant pour la détection de la non-normalité. Le tracé de probabilité normale est présenté dans la *Figure 2* il est clair que les résidus se trouvent proches de la ligne de référence, ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement.

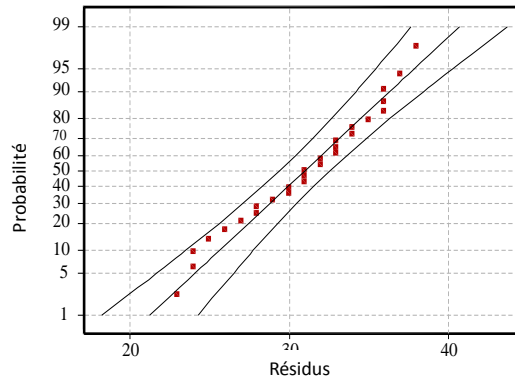


Fig. 2: Test de normalité de la distribution des résidus.

### 3.4 Optimisation

Selon des études antérieures menées sur l’usinage des matériaux métalliques, l’optimisation des réponses par la méthodologie de surfaces de réponse (RSM) permet d’identifier la combinaison des paramètres des variables d’entrée que ce soit en considérant une ou plusieurs réponses [14,17]. Dans le cas d’usinage du polyéthylène de haute densité (PEHD), une approche similaire est choisie bien que ce dernier matériau soit beaucoup moins dur comparé aux aciers.

La désirabilité implique de transformer chaque réponse anticipée,  $Y_i$ , en une valeur adimensionnelle bornée entre 0 et 1. Une valeur plus élevée indique que la valeur de réponse  $Y_i$  est plus souhaitable, tandis qu’une valeur nulle indique que la réponse est totalement indésirable.

Le Tableau 4 et la Figure 3 illustrent les résultats d’optimisation par RSM pour la température de coupe

Tableau 4: Réponse d’optimisation de la température de coupe

Réponses	objectifs	Solution globale			Valeur inf	Cible	Valeur sup	Réponses prédites	Désirabilité
		Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)					
t° (°C)	Minimum	55	0.12	0.5	23	23	38	22.87	1
t° (°C)	Ciblé	131.667	0.12	0.5	23	30	38	30	0.998

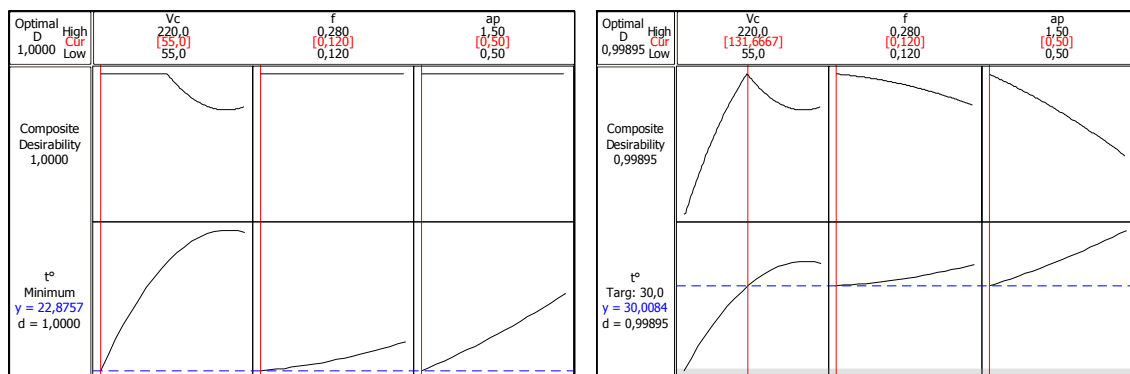


Fig. 3: Diagrammes d’optimisation de réponses.

## 4 Conclusion

Cette étude a permis d'orienter les idées sur des conditions à adopter pour l'usinage du polyéthylène de haute densité (HDPE) en vue de préparer des éprouvettes d'essais mécaniques. Vu la structure et la résistance mécanique du HDPE, un outil en acier rapide HSS est suffisant pour les opérations de la coupe. La vitesse de coupe s'est avérée être le facteur le plus important lors de l'étude de la température de coupe pour le polyéthylène haute densité (HDPE-100). Le modèle mathématique trouvé représente un intérêt important pour la sélection des paramètres de coupe.

## Références

- [1] S. Wu, K. Sehanobish, N. Jivraj, Defect Analysis and High Density Polyethylene Pipe Durabilit, *Plastics Failure Analysis & Prevention*: (2001) 281– 287.
- [2] W. Mueller, I. Jakob, Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes, *Polymer Degradation and Stability*, 79 (1) : (2003) 161–172.
- [3] R.K. Rowe, H.P Sangam, Durability of HDPE geomembranes, *Geotext Geomember*, 20 (2): (2002) 77– 95.
- [4] A. Frank, G. Pinter, R. W. Lang, Prediction of the remaining lifetime of polyethylene pipes after up 30 years in use, *Polymer Testing*, 28 : (2009) 737 – 745.
- [5] K. Chaoui, R. Khelif, N. Zeghib, A. Chateaneuf, Failure Analysis of Polyethylene Gas Pipe, in: *Safety, Reliability & Risks Associated with Water, Oil & Gas Pipelines*; G. Pluvinae, M.H. Elwany, Eds., NATO Science for Peace and Security Series; Springer Netherlands: Dordrecht, The Netherlands : (2008) 131–163.
- [6] ISO 2818, Plastiques—Préparation des éprouvettes par usinage, 1994.  
<http://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:2818>: ed-3:v1:fr
- [7] A.K. Kobayashi, *Machining of plastics*. McGraw-Hill, New York, 1967.
- [8] S. Neseli, S. Yaldiz, E. Türkes, Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology, *Measurement*, 44 : (2011) 580 – 587.
- [9] L. Bouzid, M.A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki, L. Boulanouar, Mathematical modelling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology, *Proc IMechE Part B: Journal Engineering Manufacture*, 229 (1) : (2015) 45 – 61.
- [10] V. Krishnaraj, A. Prabukarthi, A. Ramanathan , N. Elanghovan , M. Senthil Kumar, R. Zitoune , J.P. Davim, Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, *Composites Part B Engineering*, 43(4) : (2012) 1791–1799.
- [11] A.J. Makadia, J.I. Nanavati, Optimization of machining parameters for turning operations based on response surface methodology, *Measurement*, 46(4) : (2013) 1521 – 1529.
- [12] [http://www.groupe-chiali.com/images/documentations/catalogues/cat\\_pe\\_2012.pdf](http://www.groupe-chiali.com/images/documentations/catalogues/cat_pe_2012.pdf) (cons. 28.01.2016).
- [13] P.J. Ross, *Taguchi Techniques for quality engineering loss function orthogonal experiments parameter and tolerance design*, Second ed., McGraw-Hill, NY, 1996.
- [14] Z. Hessainia, M-A. Yallese, L. Bouzid, T. Mabrouki, On the application of response surface methodology for predicting and optimizing surface roughness and cutting forces in hard turning by PVC coated insert, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6 : (2015) 267– 284.
- [15] S. Neseli, S. Yaldiz, E. Türkes, Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology, *Measurement*, 44 : (2011) 580 – 587.
- [16] L. Bouzid, M-A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki, L. Boulanouar, Mathematical modelling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology, *Proc IMechE Part B: Journal Engineering Manufacture*, 29 : (2012) 45–61.
- [17] K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi, Multi-response optimization of CO<sub>2</sub> laser welding process of austenitic stainless steel, *Optics & Laser Technology*, 40 : (2008) 76–87.