



**HAL**  
open science

# Pratique de la modélisation des processus de coupe avec assistance

Hélène Sydorova

► **To cite this version:**

Hélène Sydorova. Pratique de la modélisation des processus de coupe avec assistance. 2014. hal-00975360

**HAL Id: hal-00975360**

**<https://hal.science/hal-00975360>**

Preprint submitted on 8 Apr 2014

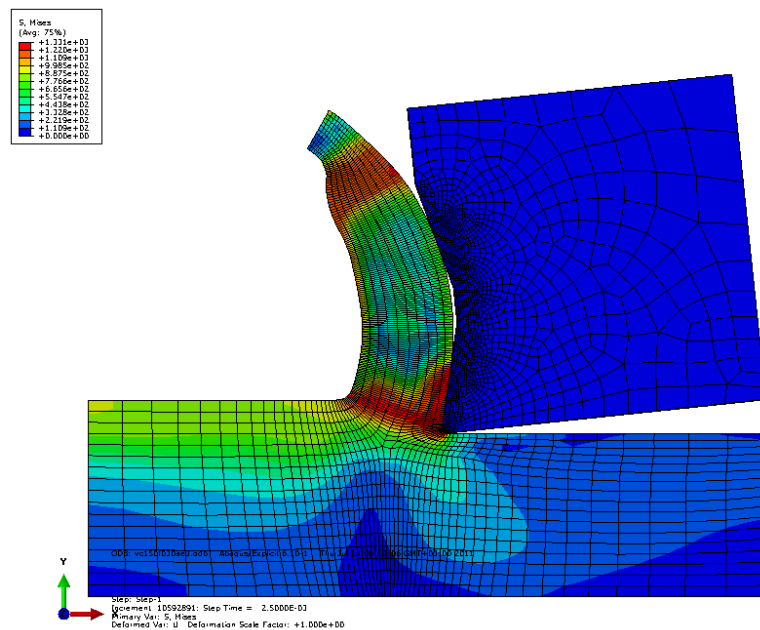
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Hélène SYDOROVA

# PRATIQUE

## DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE



# PRATIQUE

## DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

**Hélène SYDOROVA**

*Docteur ès Sciences Techniques, Maître de conférences à la chaire « Technologie de constructions mécaniques », Département de la Génie Mécanique et des Constructions Mécaniques, Département Français des Sciences et Techniques, Université nationale technique de Donetsk, UKRAINE*

sydorova@gmail.com

# Remerciements

*Ce travail a été réalisé sur la base théorique et expérimentale des travaux issus de ma thèse de doctorat « Intensification du processus de tournage à la base de l'approche fonctionnellement orientée par le choix du régime de coupe, PVD-revêtement et fluide de coupe » soutenue le 30 janvier 2013 à l'Université Nationale Technique de Donetsk (Donetsk, UKRAINE). J'ai eu la chance au cours de la réalisation de ces travaux de thèse de prendre contact avec des chercheurs et des professionnels du domaine de la coupe des métaux qui m'ont aidée aimablement à réaliser ces travaux.*

*Je remercie notamment mon directeur de thèse : M. le Professeur Alexandre MIKHAÏLOV pour l'organisation parfaite de mon travail.*

*Je remercie les professionnels du domaine de l'usinage des matériaux par enlèvement de matière (coupe) : M. le Professeur Piote MATUKHA et M. le Professeur Serguey KLIMENKO.*

*Je remercie tous les collaborateurs de la chaire « Technologie de constructions mécaniques » et « Systèmes mécatroniques d'équipement de construction mécanique » de l'Université Nationale Technique de Donetsk.*

*Je remercie le directeur de la société « Unikos » M. Pavel KOUZNETSOV pour l'intérêt qu'il a porté à ces travaux ainsi que pour la fourniture des matériaux pour ces recherches.*

*Je remercie pour les nouvelles connaissances, les opportunités offertes et le soutien à la réalisation du projet scientifique les collaborateurs du « Laboratoire Génie de Production » de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, et plus particulièrement M. le Professeur Olivier PANTALÉ et M. Vincent WAGNER.*

*Je remercie pour ses conseils judicieux, son aide et son soutien constants M. le Professeur Guennady KLIAGUINE.*

# SOMMAIRE

Introduction .....	6
1 MODÉLISATION .....	10
1.1 Définition de la problématique .....	10
1.1.1 Schématisation d'un processus de coupe .....	10
1.1.2 Matériau à usiner .....	10
1.1.3 Outil de coupe .....	12
1.1.4 Régime de coupe .....	13
1.1.5 Modèle CAO .....	13
1.2 Création du modèle géométrique .....	15
1.2.1 Création de la géométrie de l'outil .....	15
1.2.2 Création de la géométrie de la pièce .....	16
1.2.3 Partition de l'outil .....	17
1.2.4 Partition de la pièce .....	18
1.3 Propriétés des matériaux .....	20
1.3.1 Description des propriétés des matériaux .....	20
1.3.2 Création des sections .....	33
1.4 Assemblage .....	35
1.5 Paramètres du calcul .....	36
1.6 Contraintes prédéterminées .....	37
1.7 Interactions .....	38
1.7.1 Interactions de contact .....	38
1.7.2 Descriptions des actions d'assistance .....	42
1.7.3 Contraintes auxiliaires .....	44
1.8 Conditions limites .....	46
1.8.1 Choix de l'approche ALE .....	46
1.8.2 Conditions limites pour les matériaux .....	50

1.8.3 Conditions limites pour le maillage ALE .....	52
1.9 Maillage.....	55
1.10 Calcul .....	60
1.11 Code source pour le calcul du tournage de l'acier 42CrMo4 sur Abaqus Explicit 6.10 ....	63
2 ANALYSE.....	70
2.1 Récupération des résultats du calcul .....	70
2.2 Validation du modèle du processus de coupe .....	75
2.3 Principes d'analyse des sollicitations de l'outil de coupe.....	78
2.3.1 Détermination des macro-, méso- et microzones de l'outil de coupe.....	78
2.3.2 Résultats des simulations du processus de coupe .....	81
2.3.3 Étude de l'influence de la vitesse de coupe sur la sollicitation thermomécanique de l'outil de coupe.....	83
2.3.4 Estimation de la durée de vie et de la sollicitation de l'outil de coupe.....	91
2.4 Analyse de l'influence du liquide de coupe .....	97
Bibliographie .....	104

# Introduction

L'avancement des connaissances concernant le domaine de l'usinage est principalement lié avec la compréhension de la physique des processus au sein de la zone de coupe. Afin d'aider à cet apport de connaissances, des modèles théoriques ont été élaborés car la zone petite et confinée du contact entre l'outil de coupe et le matériau à usiner est source de difficultés pour la détermination des paramètres des modèles à partir des méthodes expérimentales. De plus, les nombreux essais nécessaires rendent de plus cette détermination coûteuse.

Actuellement il demeure tout de même impossible d'éviter complètement les expérimentations lors de la création d'un modèle de simulation de l'usinage. Néanmoins, l'utilisation de tels modèles de coupe, validés par l'expérience, permet de diminuer la quantité des essais nécessaires à des travaux de recherche ou d'optimisation du processus.

De nombreux travaux de recherche ont été publiés concernant ce problème, parmi lesquels, on peut citer par exemple : (Pantalé, 2005), (Криворучко, et al., 2009), (Ozel, et al., 2010), (Xie, 2004). Avant de se lancer dans la création de modèles numériques de la coupe des métaux, il est très fortement conseillé d'acquérir des connaissances concernant la théorie de la coupe des métaux, les principes de base concernant la fabrication par usinage, la mécanique théorique et la mécanique des milieux continus (et notamment en grandes transformations), la tribologie, la résistance des matériaux, la thermique, la métallurgie ainsi bien sûr que les fondements de la méthode des éléments finis.

Ce livre a été écrit afin de présenter les techniques générales permettant la création des modèles de simulation numérique de la coupe avec assistance en utilisant un logiciel de calcul ainsi que de montrer les principes d'analyse des résultats obtenus par ces simulations.

Parmi la liste des logiciels les plus répandus spécialisés dans la simulation thermomécanique en grandes transformations, le code de calcul commercial SIMULIA/Abaqus (Dassault Systèmes) attire l'attention, tant du point de vue de la précision des résultats obtenus, de la possibilité offerte par l'ouverture de certaines parties du code, de la possibilité de prendre en compte différentes lois de comportement des matériaux et de leur interaction.

Toutes les étapes nécessaires à la construction du modèle sont basées sur un exemple de modélisation du processus de tournage (sans et avec assistance) de l'acier 42CrMo4, de l'alliage Ti6Al4V et de l'acier X2CrNiMo18-14-3 par une plaquette en carbure revêtu TiAlN. Cet exemple est présenté en détail afin de faciliter et de diminuer le temps de familiarisation avec le logiciel.

L'ouvrage « Pratique de la modélisation des processus de coupe avec assistance » comprend deux chapitres principaux : « Modélisation » qui concerne la création des modèles de coupe et « Analyse » qui concerne l'analyse des résultats obtenus.

Dans le chapitre « Modélisation » on présente toutes les étapes permettant la réalisation du modèle de simulation numérique de la coupe qui passe par les étapes suivantes :

- La définition de la problématique à résoudre et les principales variables
- la création du modèle géométrique,
- la définition des propriétés des matériaux,
- la création de l'assemblage constitué de la pièce et de l'outil de coupe,
- la définition des paramètres du calcul et des contraintes prédéterminées,
- la description de l'interaction de contact et des actions d'assistance,
- l'application des chargements et des conditions aux limites,
- la définition du maillage et des paramètres associés,
- la création de la tâche du calcul et son lancement.

Le chapitre est basé sur l'utilisation du code de calcul Abaqus/Explicit v.6.10.



Dans le chapitre « Analyse » sont présentés les modes de la récupération des résultats du calcul, la validation du modèle, les principes d'analyse des sollicitations de l'outil de coupe ainsi que l'analyse de l'influence du liquide de coupe.

Une fois les modèles de coupe créés et mis au point, on peut alors optimiser les paramètres (géométrie et nuance de l'outil de coupe, régimes de coupe, paramètres liés aux différents types d'assistance, etc...) au travers de l'analyse des résultats du modèle vis-à-vis des sollicitations thermomécaniques afin d'augmenter la productivité, la durée de vie de l'outil de coupe ou la qualité des surfaces usinées.

# 1 MODÉLISATION

---

# 1.1 Définition de la problématique

## 1.1.1 Schématisation d'un processus de coupe

Afin d'illustrer le processus, on se réfère à la modélisation d'une opération de tournage longitudinal pour lequel on peut considérer que l'on est en configuration de coupe orthogonale si on considère la section 2D A-A (Figure 1). Ici la géométrie est alors définie par les variables suivantes :  $\gamma$  – angle de coupe,  $\alpha$  – angle de dépouille,  $\beta$  – rayon du bec d'outil ; le régime de coupe est défini par :  $v$  – vitesse de coupe,  $f$  – avance/tour,  $a_p$  – largeur de coupe ; et les efforts de coupe par les résultantes :  $F_x$  – effort axial,  $F_y$  – effort radial,  $F_z$  – effort tangentiel.

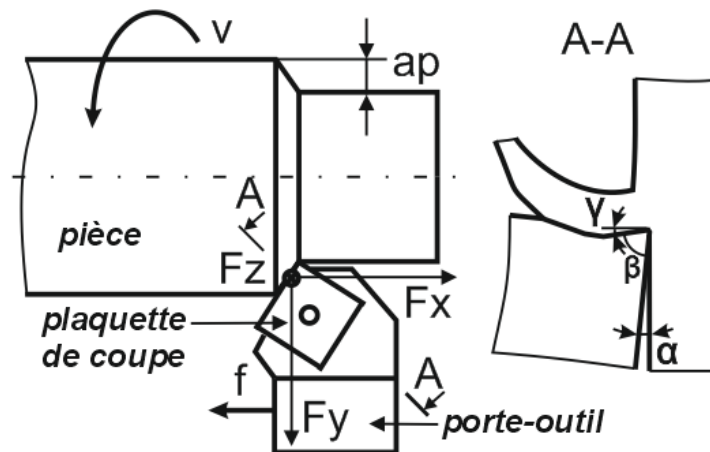


Figure 1 – Schématisation du processus de coupe

## 1.1.2 Matériau à usiner

L'acier allié 42CrMo4 ( $\sigma_b = 2500$  MPa, dureté 38 HRC, traitement thermique : trempe à l'huile après chauffage à  $850^\circ\text{C}$  pendant 180 minutes, revenu à  $600^\circ\text{C}$  pendant 240 minutes) est très employé pour des pièces soumises à de fortes charges, notamment per l'industrie automobile. Le domaine d'application concerne notamment les arbres de transmission, les essieux, les crémaillères, les vilebrequins, les bielles, les engrenages etc... Cet acier appartient à la catégorie des matériaux difficiles à usiner, de par ses

propriétés physiques : grande dureté, faible ductilité, pouvoir abrasif élevé engendrant une usure en cratère de l'outil de coupe. La composition chimique du 42CrMo4 est présentée dans le Tableau 1.

*Tableau 1 - Composition chimique de l'acier 42CrMo4*

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Fe
0.38-0.43	0.75-1.00	0.035 (max)	0.04 (max)	0.15-0.30	0.80-1.10	0.15-0.25	le reste

La composition chimique de l'alliage Ti6Al4V ( $\sigma_B = 1370$  MPa) est présentée dans le Tableau 2. Les problèmes principaux concernant l'usinage de cet alliage sont provoqués par sa haute dureté, sa basse conductibilité thermique et sa haute réactivité chimique.

*Tableau 2 - Composition chimique de l'alliage Ti6Al4V*

Al%	Fe% max	O% max	Ti%	V%
6	0.14	0.13	90	4

La composition chimique de l'acier inoxydable austénitique X2CrNiMo18-14-3 ( $\sigma_B = 2600$  MPa) est présentée dans le Tableau 3. Les principaux problèmes d'usinage de ce matériau sont liés avec sa basse conductibilité thermique qui provoque de hautes sollicitations thermiques sur l'outil de coupe et, en conséquence, une forte diffusion des éléments chimiques entre les deux surfaces en contact.


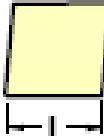
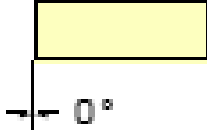
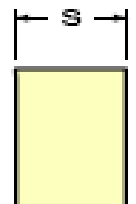
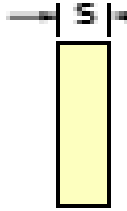
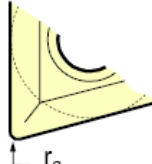


*Tableau 3 - Composition chimique de l'acier X2CrNiMo18-14-3*

C% max	Cr%	Ni% max	Mo%	Mn% max	Si% max	P% max	S% max	Fe
0.03	16-18.5	10-14	2-3	2	1	0.045	0.03	le reste

### 1.1.3 Outil de coupe

La géométrie de la plaquette ATI Stellram CNMG542A-4E SP0819 CNMG160608E-4E est présentée dans le Tableau 4 (le déchiffrage a été effectué selon les normes d'ISO).

Tableau 4 - Géométrie de la plaquette ATI Stellram CNMG542A-4E SP0819  
CNMG160608E-4E

C	 80°	16	
N	 0°	06	
M	 ±0,127	08	 $r_\epsilon$
G		E	 arête arrondie

La nuance SP0819 qui présente la combinaison d'un nouveau revêtement TiAlN (épaisseur – 5  $\mu\text{m}$ ) nano super dur avec un substrat en carbure micrograin de qualité aéronautique a permis d'augmenter notablement la résistance à la chaleur et à l'usure dans l'usinage des matériaux à haute température et d'obtenir ainsi une durée de vie d'outil plus longue et une productivité accrue.

La plaquette de coupe est fixée sur le porte-outil Sandvik Coromant DCLNR3232P-16 en présentant angle de  $6^\circ$  dans la direction de la force de coupe et de  $6^\circ$  dans la direction de la force axiale (Figure 2).

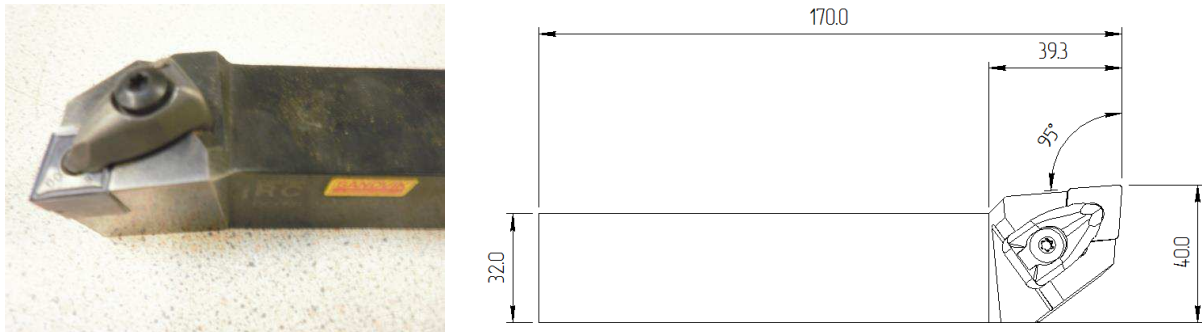


Figure 2 - Géométrie du porte-outil Sandvik Coromant DCLNR3232P-16

### 1.1.4 Régime de coupe

Les régimes de coupe sont choisis sur la base des recommandations du fabricant des plaquettes :  $v_c = 150$  m/min ;  $f = 0.3$  mm/tr ;  $a_p = 3$  mm.

### 1.1.5 Modèle CAO

Dans la modélisation numérique, concernant la plaquette, nous ne considérerons que la partie la plus sollicitée par l'opération de coupe lors de l'usinage comme indiqué sur la Figure 3.

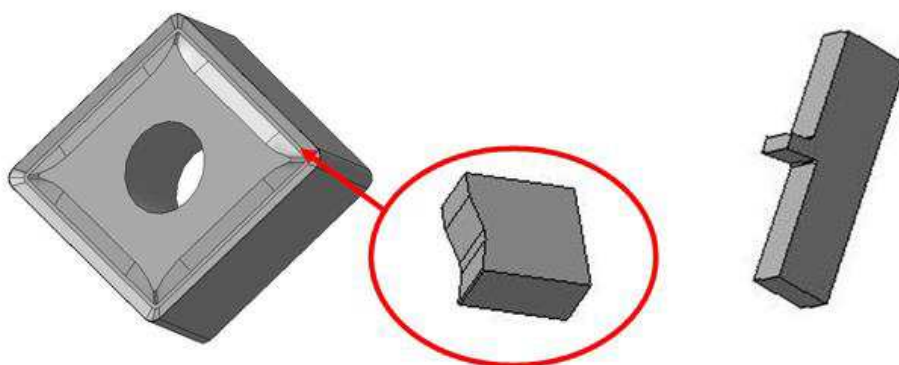


Figure 3 - Modèle CAO de l'outil de coupe et de la pièce à usiner

Les modèles CAO de l'outil de coupe et de la pièce usinée ont été élaborés. La pièce à usiner comporte 3 zones : la partie à usiner (le brut), la partie usinée après le passage de la plaquette de coupe et le copeau. L'outil de coupe se compose du substrat et de son revêtement. Les paramètres géométriques du modèle 2D sont présentés sur la Figure 4. C'est cette modélisation qui va servir de base à la réalisation du modèle numérique sur le code de calcul Abaqus.

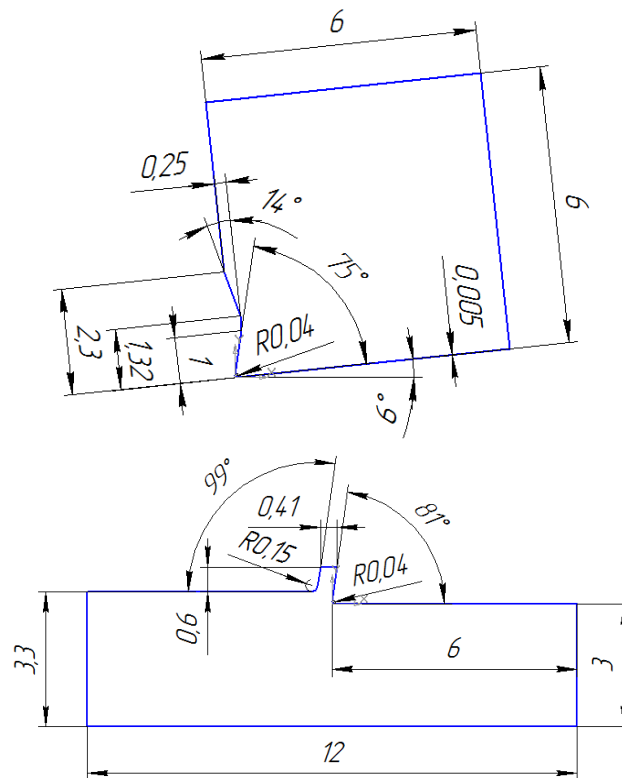


Figure 4 - Paramètres géométriques du modèle CAO 2D

# 1.2 Création du modèle géométrique

## 1.2.1 Création de la géométrie de l'outil

Après le lancement du logiciel Abaqus CAE (qui est l'interface graphique unifiée de pré et post-traitement du code de calcul Abaqus) et la création/enregistrement du fichier du modèle (dans notre cas « Tournage 42CrMo4.cae ») on peut commencer à créer la géométrie de l'outil en utilisant le module « Part ». La fenêtre principale de ce module permet alors de définir le nom de la « Part » (« Name »), la dimension de l'espace (« Modeling Space »), le type de pièce que l'on veut créer (« Type »), l'élément de base (« Base Feature ») et la dimension approximative (« Approximate size ») comme indiqué sur la Figure 5.

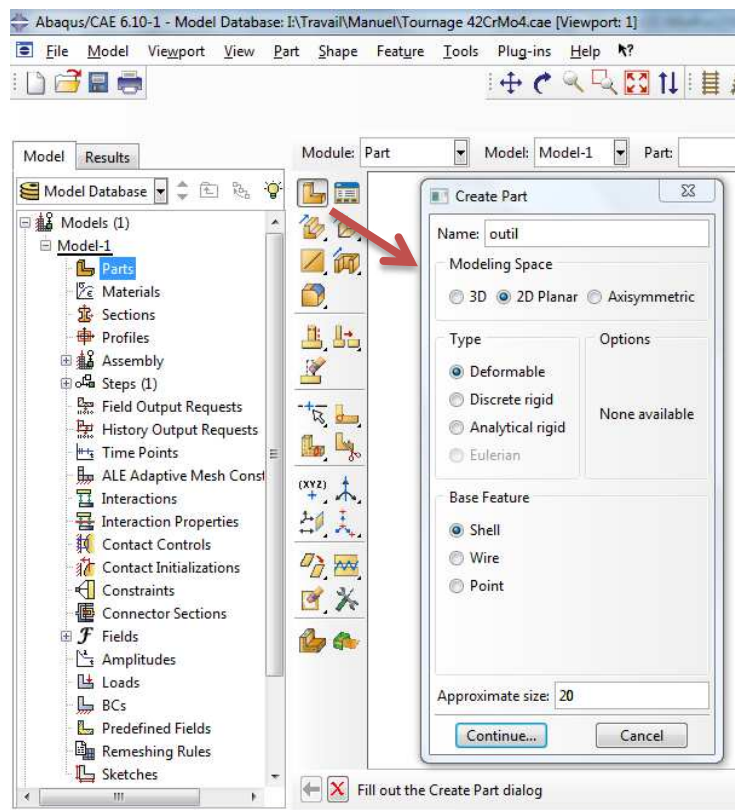


Figure 5 – Module « Part » pour créer la géométrie de l'outil



A la suite de cette définition, en utilisant les outils géométriques, le contour de l'outil peut être construit comme illustré sur la Figure 6.

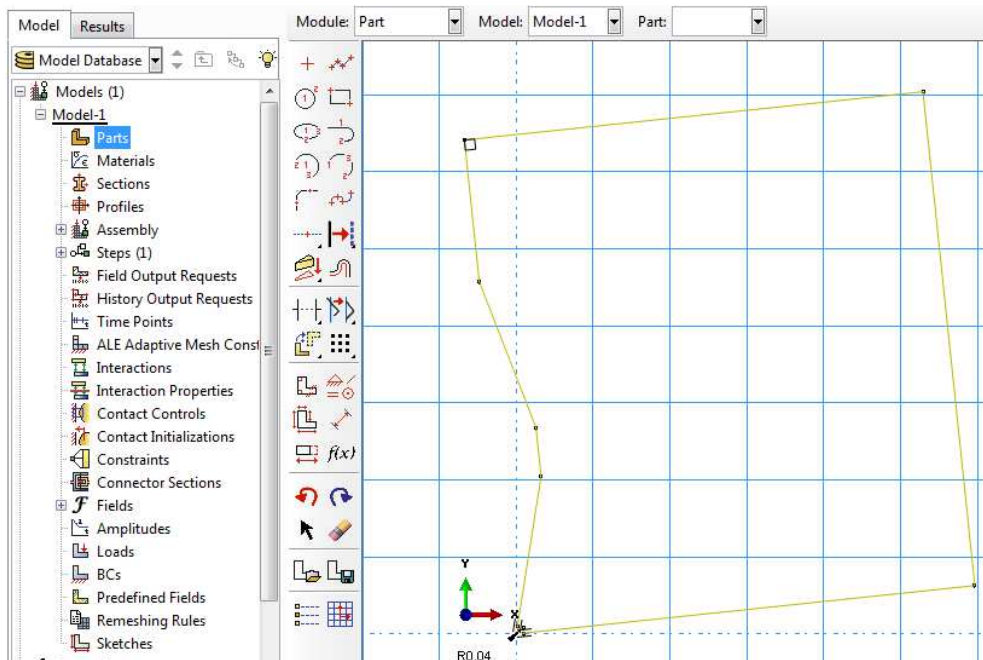


Figure 6 - Création de la géométrie de l'outil

## 1.2.2 Création de la géométrie de la pièce

Pour créer la géométrie de la pièce il faut utiliser la même procédure que celle définie lors du § 1.2.1 (Figure 7 et Figure 8).

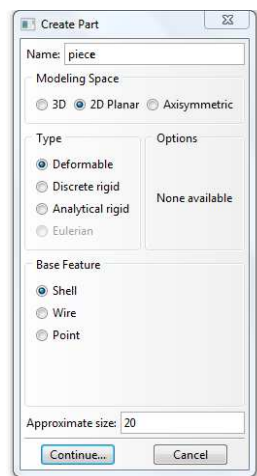


Figure 7 - Module « Part » pour créer la géométrie de la pièce

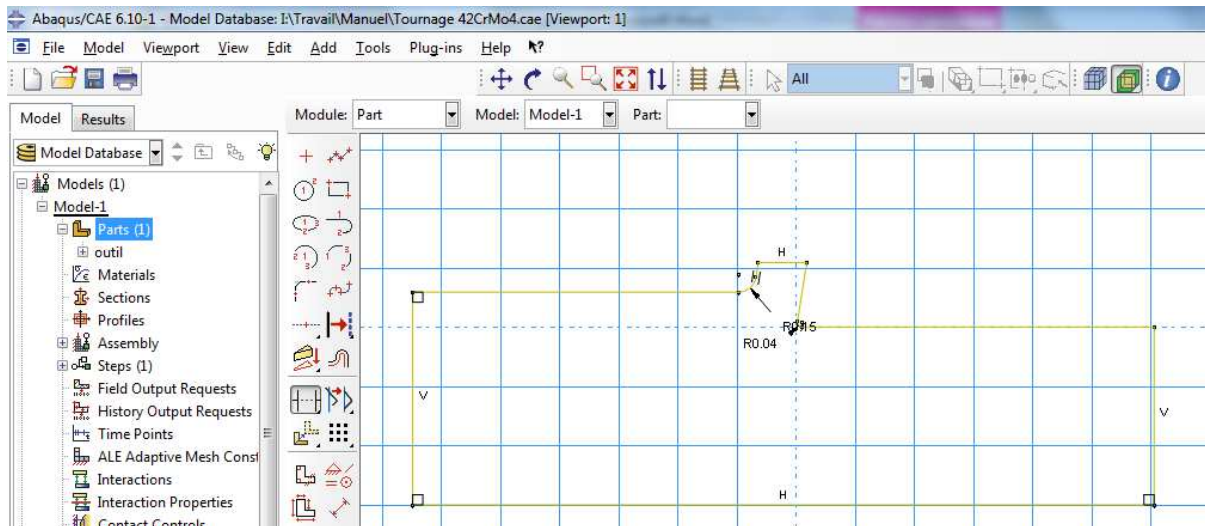


Figure 8 - Création de la géométrie de la pièce

### 1.2.3 Partition de l'outil

On réalise alors une partition de l'outil afin d'ajouter le revêtement et d'avoir la possibilité de réaliser un maillage structuré de ce revêtement. Pour cela dans un des modules « Part » ou « Property » il faut choisir l'opération « Partition Face Sketch » (Figure 9).

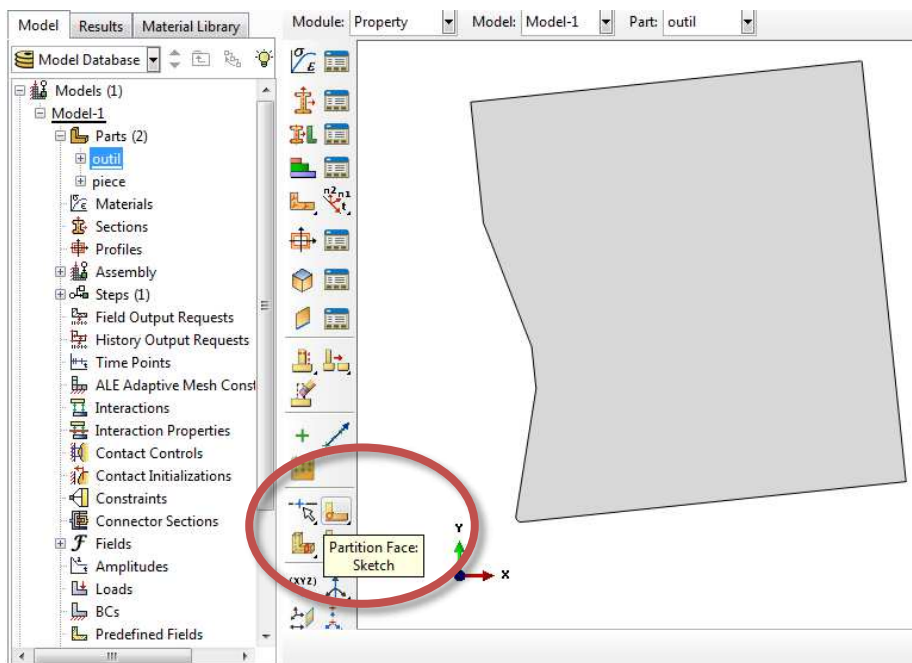


Figure 9 - Module "Partition Face Sketch" pour l'outil

En utilisant les outils géométriques de création, le revêtement de l'outil peut alors être créé sur les parties rectangulaires (Figure 10).

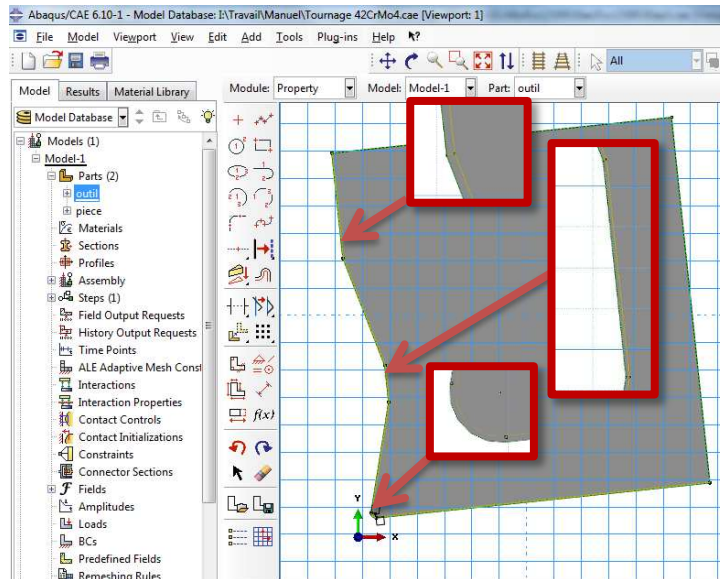


Figure 10 - Partition de l'outil

## 1.2.4 Partition de la pièce

Pour créer la partition de la pièce il faut utiliser la même procédure que dans § 1.2.3 (Figure 11).

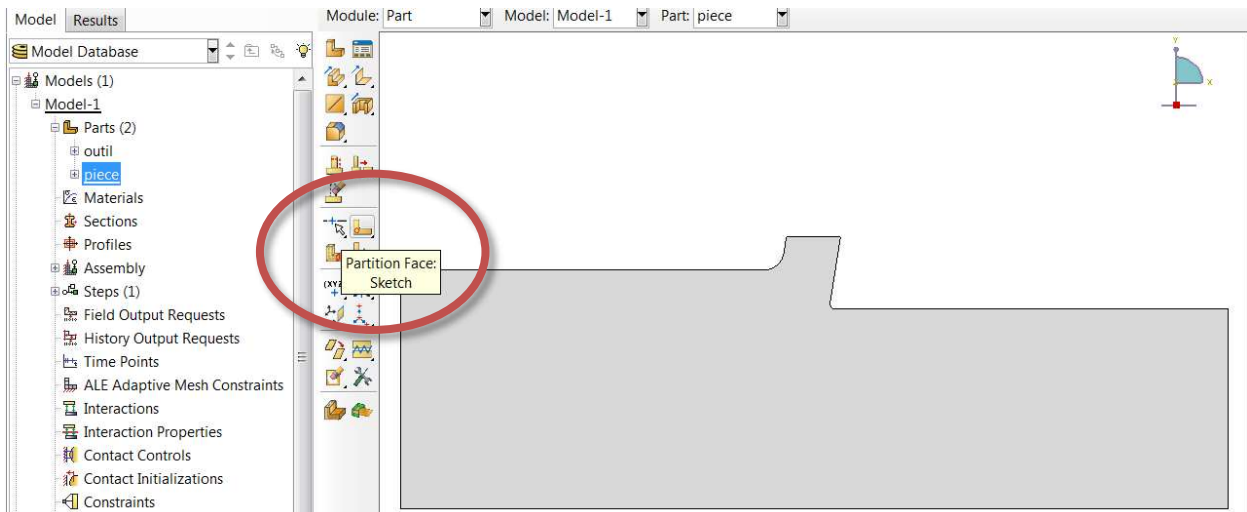


Figure 11 - Module "Partition Face Sketch" pour la pièce

Afin d'éviter la distorsion du maillage au cours du calcul lors des grandes déformations du matériau celui-ci doit être de type structuré. Afin de réaliser ce maillage, il est alors nécessaire de partitionner la pièce comme indiqué sur la figure Figure 12.

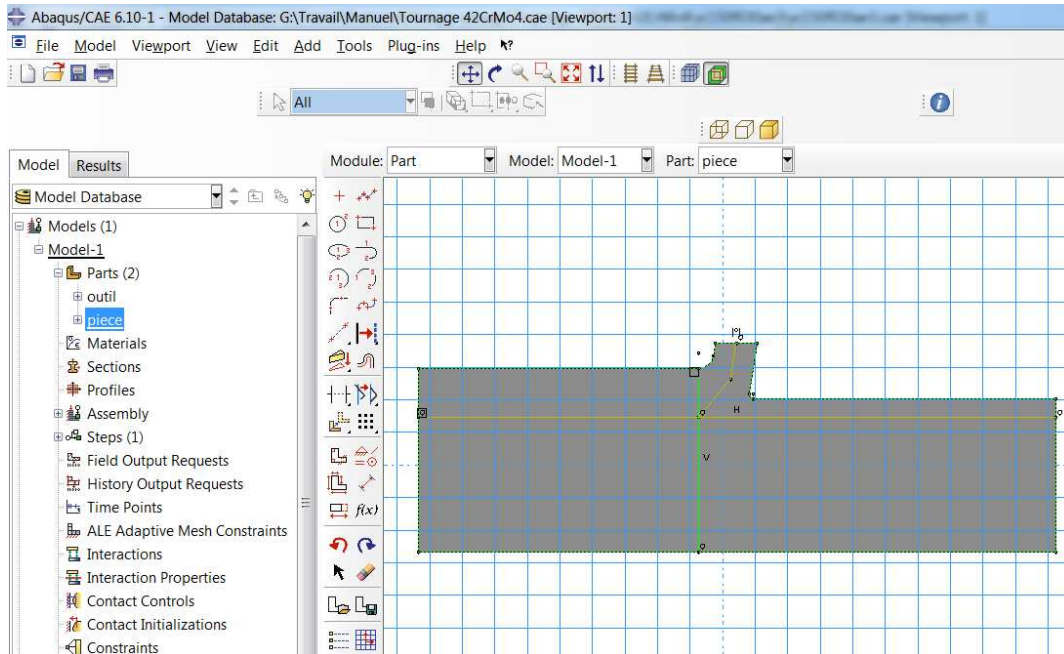


Figure 12 - Partition de la pièce

# 1.3 Propriétés des matériaux

## 1.3.1 Description des propriétés des matériaux

Le module « Proprety » sert à décrire les propriétés des matériaux de l'outil et de la pièce. Pour créer un nouveau matériau et éditer ses propriétés, il faut cliquer sur le bouton « Edit Material » (Figure 13).

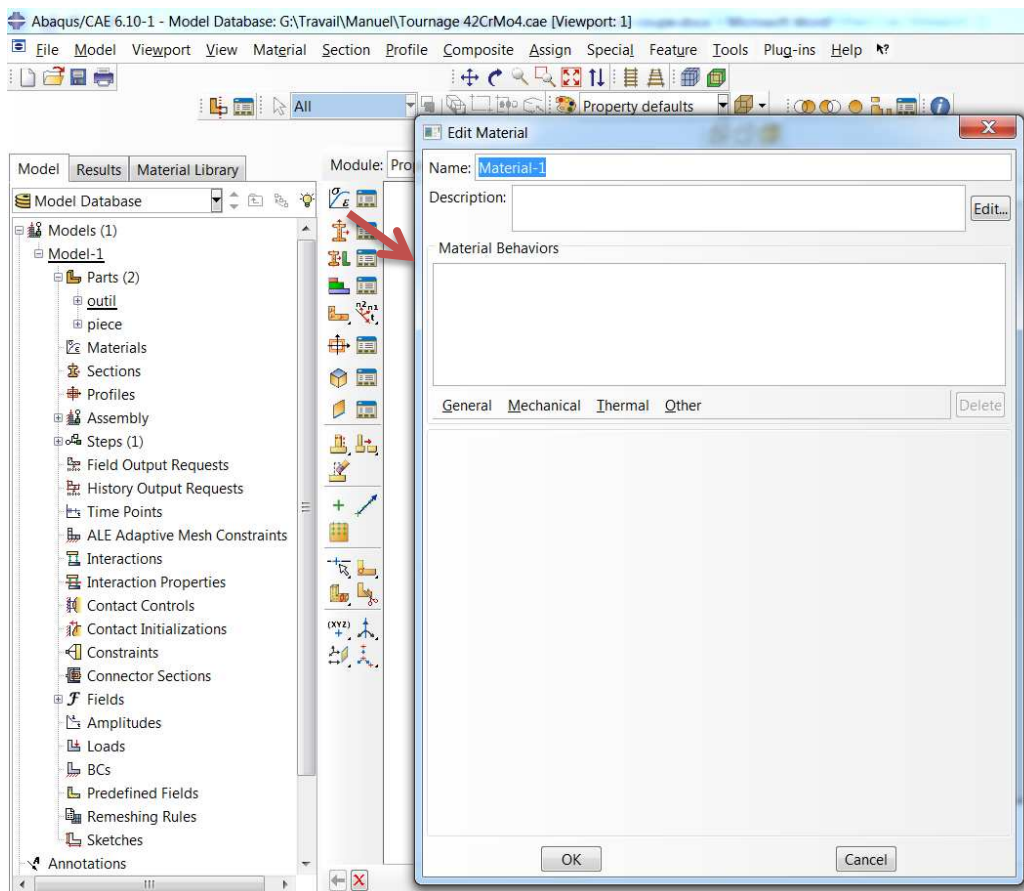


Figure 13 - Création de la nouvelle description des propriétés du matériau

Les propriétés du substrat WCCo et du revêtement TiAlN de l'outil de coupe sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5 - Propriétés du matériau de l'outil (Jianxin, et al., 2008), (Gökkaya, et al., 2009), (Ozel, et al., 2010), (Okamoto, et al., 2005), (Staia, et al., 2006), (Kamnis, et al., 2008)

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Valeur	
				substrat WCCo	revêtement TiAlN
Générale (« General »)	Densité (« Density »)	-	Masse volumique (« Mass Density »), t/mm <sup>3</sup>	1.48E-008	7.4E-009
Mécanique (« Mechanical »)	Elasticité (« Elastic »)	Isotropique (« Isotropic »)	Module de Young (« Young's Modulus »), MPa	560000	600000
			Coefficient de Poisson (« Poisson's Ratio »)	0.23	0.2
	Expansion (« Expansion »)	Isotropique (« Isotropic »)	Coefficient de dilatation thermique (« Expansion Coeff alpha »), mm·mm <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	4.5E-006	9.4E-006
Thermique (« Thermal »)	Conductibilité (« Conductivity »)	Isotropique (« Isotropic »)	Conductibilité (« Conductivity »), mW mm <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	55	22
	Chaleur massique (« Specific Heat »)	Volume constant (« Constant Volume »)	Chaleur massique (« Specific Heat »), mJ t <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	295000000	480000000

Les propriétés du matériau à usiner 42CrMo4, Ti6Al4V, X2CrNiMo18-14-3 sont présentés dans les Tableau 6, Tableau 8 respectivement.

Tableau 6 - Propriétés de l'acier 42CrMo4 (Germain, 2006) (OTUA)

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Acier 42CrMo4	
				Valeur	Température
Générale (« General »)	Densité (« Density »)	-	Masse volumique (« Mass Density »), t/mm <sup>3</sup>	7.857E-009	0
				7.85E-009	50
				7.843E-009	100
				7.829E-009	150
				7.814E-009	200
				7.8E-009	250
				7.786E-009	300
				7.771E-009	350
				7.75E-009	400
				7.729E-009	450
				7.714E-009	500
				7.693E-009	550
				7.671E-009	600
				7.65E-009	650
				7.629E-009	700
				7.614E-009	750
				7.629E-009	800
				7.643E-009	850
				7.614E-009	900
				7.586E-009	950
7.557E-009	1000				
7.536E-009	1050				
7.507E-009	1100				
7.486E-009	1150				
Mécanique (« Mechanical »)	Elasticité (« Elastic »)	Isotropique (« Isotropic »)	Module de Young (« Young's Modulus »), MPa	211000	20
				205000	100
				200000	200
				193000	300
				185000	400
				175000	500
				161000	600
			Coefficient de Poisson (« Poisson's Ratio »)	0.28	20
				0.29	100
				0.29	200
				0.3	300
				0.3	400
				0.3	500
				0.31	600

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Acier 42CrMo4	
				Valeur	Température
Mécanique (« Mechanical »)	Plastique (« Plastic »)	Écrouissage : Johnson-Cook (« Hardening : Johnson-Cook »)	A, MPa	595	-
			B, MPa	580	
			n	0.133	
			m	13	
			Température de fusion (« Melting Temp »), °C	1520	
			Température de transition (« Transition Temp »), °C	20	
	Dépendant de la vitesse (« Rate Dependent »)	Écrouissage : Johnson-Cook (« Hardening : Johnson-Cook »)	C	0.023	
			Vitesse de déformation de référence (« Epsilon dot zero »)	1000	
	Expansion (« Expansion »)	Isotropique (« Isotropic »)	Coefficient de dilatation thermique (« Expansion Coeff alpha »), mm·mm <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.15E-005	20
				1.28E-005	100
				1.41E-005	200
				1.51E-005	300
				1.59E-005	400
				1.67E-005	500
				1.73E-005	600
				1.15E-005	20
				1.28E-005	100
				1.41E-005	200
				1.51E-005	300
1.59E-005				400	
1.67E-005	500				
1.73E-005	600				
Thermique (« Thermal »)	Conductibilité (« Conductivity »)	Isotropique (« Isotropic »)	Conductibilité (« Conductivity »), mW mm <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	52	0
				51	50
				51	100
				50	150
				48	200
				47	250
				46	300
				44	350
				42	400
				40	450
				38	500
36	550				



PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Acier 42CrMo4	
				Valeur	Température
Thermique (« Thermal »)	Conductibilité (« Conductivity »)	Isotropique (« Isotropic »)	Conductibilité (« Conductivity »), mW mm <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	34	600
				32	650
				30	700
				27	750
				25	800
				25	850
				25	900
				26	950
				27	1000
				28	1050
				28	1100
				29	1150
				Chaleur massique (« Specific Heat »)	Volume constant (« Constant Volume »)
	480000000	50			
	500000000	100			
	520000000	150			
	541000000	200			
	561000000	250			
	581000000	300			
	601000000	350			
	622000000	400			
	642000000	450			
	662000000	500			
	682000000	550			
	703000000	600			
	730000000	650			
	784000000	700			
	1595000000	750			
	622000000	800			
	486000000	850			
	541000000	900			
	622000000	950			
	635000000	1000			
649000000	1050				
662000000	1100				
676000000	1150				
Fraction de chaleur inélastique (« Inelastic Heat Fraction »)	-	Fraction de chaleur inélastique (« Inelastic Heat Fraction »)	0.9	-	

Tableau 7 - Propriétés de l'alliage Ti6Al4V (Ozel, et al., 2010), (Chinmaya, et al., 2010), (Braham Bouchnak, 2010)

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Alliage Ti6Al4V	
				Valeur	Température
Générale (« General »)	Densité (« Density »)	-	Masse volumique (« Mass Density »), t/mm <sup>3</sup>	4.42E-009	-
Mécanique (« Mechanical »)	Elasticité (« Elastic »)	Isotropique (« Isotropic »)	Module de Young (« Young's Modulus »), MPa	113390	20
				113405	40
				113419	60
				113434	80
				113449	100
				113464	120
				113479	140
				113494	160
				113508	180
				113523	200
				113538	220
				113553	240
				113568	260
				113583	280
				113597	300
				113612	320
				113627	340
				113642	360
				113657	380
				113671	400
				113686	420
				113701	440
				113716	460
113731	480				
113746	500				
113760	520				
113775	540				
113790	560				
113805	580				
113820	600				
113835	620				
113849	640				
113864	660				
113879	680				
113894	700				

PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Alliage Ti6Al4V	
				Valeur	Température
Mécanique (« Mechanical »)	Elasticité (« Elastic »)	Isotropique (« Isotropic »)	Module de Young (« Young's Modulus »), MPa	113909	720
				113923	740
				113938	760
				113953	780
				113968	800
				113983	820
				113998	840
				114012	860
				114027	880
				114042	900
				114057	920
				114072	940
				114087	960
				114101	980
				114116	1000
				114131	1020
				114146	1040
				114161	1060
				114175	1080
				114190	1100
				114205	1120
				114220	1140
				114235	1160
				114250	1180
				114264	1200
				114279	1220
				114294	1240
				114309	1260
				114324	1280
				114339	1300
114353	1320				
114368	1340				
114383	1360				
114398	1380				
114413	1400				
114428	1420				
114442	1440				
114457	1460				
114472	1480				
114487	1500				

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Alliage Ti6Al4V	
				Valeur	Température
Mécanique (« Mechanical »)	Elasticité (« Elastic »)	Isotropique (« Isotropic »)	Coefficient de Poisson (« Poisson's Ratio »)	0.342	-
	Plastique (« Plastic »)	Écrouissage : Johnson-Cook (« Hardening : Johnson-Cook »)	A, MPa	1098	-
			B, MPa	1092	
			n	0.93	
			m	1.1	
			Température de fusion (« Melting Temp »), °C	1630	
			Température de transition (« Transition Temp »), °C	20	
	Dépendant de la vitesse (« Rate Dependent »)	Écrouissage : Johnson-Cook (« Hardening : Johnson-Cook »)	C	0.014	-
			Vitesse de déformation de référence (« Epsilon dot zero »)	1000	
	Expansion (« Expansion »)	Isotropique (« Isotropic »)	Coefficient de dilatation thermique (« Expansion Coeff alpha »), mm·mm <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	7.06E-006	20
				7.12E-006	40
				7.18E-006	60
				7.24E-006	80
				7.3E-006	100
				7.36E-006	120
				7.42E-006	140
				7.48E-006	160
				7.54E-006	180
				7.6E-006	200
				7.66E-006	220
7.72E-006				240	
7.78E-006				260	
7.84E-006				280	
7.9E-006				300	
7.96E-006				320	
8.02E-006				340	
8.08E-006				360	
8.14E-006	380				
8.2E-006	400				
8.26E-006	420				
8.32E-006	440				
8.38E-006	460				

PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Alliage Ti6Al4V	
				Valeur	Température
Mécanique (« Mechanical »)	Expansion (« Expansion »)	Isotropique (« Isotropic »)	Coefficient de dilatation thermique (« Expansion Coeff alpha »), mm·mm <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	8.44E-006	480
				8.5E-006	500
				8.56E-006	520
				8.62E-006	540
				8.68E-006	560
				8.74E-006	580
				8.8E-006	600
				8.86E-006	620
				8.92E-006	640
				8.98E-006	660
				9.04E-006	680
				9.1E-006	700
				9.16E-006	720
				9.22E-006	740
				9.28E-006	760
				9.34E-006	780
				9.4E-006	800
				9.46E-006	820
				9.52E-006	840
				9.58E-006	860
				9.64E-006	880
				9.7E-006	900
				9.76E-006	920
				9.82E-006	940
				9.88E-006	960
				9.94E-006	980
				1E-005	1000
				1.006E-005	1020
				1.012E-005	1040
				1.018E-005	1060
1.024E-005	1080				
1.03E-005	1100				
1.036E-005	1120				
1.042E-005	1140				
1.048E-005	1160				
1.054E-005	1180				
1.06E-005	1200				
1.066E-005	1220				
1.072E-005	1240				
1.078E-005	1260				
1.084E-005	1280				
1.09E-005	1300				

PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Alliage Ti6Al4V	
				Valeur	Température
Mécanique (« Mechanical »)	Expansion (« Expansion »)	Isotropique (« Isotropic »)	Coefficient de dilatation thermique (« Expansion Coeff alpha »), $\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	1.096E-005	1320
				1.102E-005	1340
				1.108E-005	1360
				1.114E-005	1380
				1.12E-005	1400
				1.126E-005	1420
				1.132E-005	1440
				1.138E-005	1460
				1.144E-005	1480
				1.15E-005	1500
Thermique (« Thermal »)	Conductibilité (« Conductivity »)	Isotropique (« Isotropic »)	Conductibilité (« Conductivity »), $\text{mW}\text{ mm}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	7.196	20
				7.356	40
				7.519	60
				7.687	80
				7.857	100
				8.032	120
				8.211	140
				8.394	160
				8.58	180
				8.771	200
				8.966	220
				9.166	240
				9.37	260
				9.578	280
				9.791	300
				10.009	320
				10.231	340
				10.459	360
				10.692	380
				10.93	400
				11.173	420
				11.421	440
				11.675	460
				11.935	480
12.2	500				
12.472	520				
12.749	540				
13.033	560				
13.323	580				
13.619	600				
13.922	620				
14.232	640				

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Alliage Ti6Al4V	
				Valeur	Température
Thermique (« Thermal »)	Conductibilité (« Conductivity »)	Isotropique (« Isotropic »)	Conductibilité (« Conductivity »), mW mm <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	14.548	660
				14.872	680
				15.203	700
				15.541	720
				15.886	740
				16.24	760
				16.601	780
				16.97	800
				17.348	820
				17.734	840
				18.128	860
				18.531	880
				18.944	900
				19.365	920
				19.796	940
				20.236	960
				20.686	980
				21.146	1000
				21.617	1020
				22.098	1040
				22.589	1060
				23.092	1080
				23.605	1100
				24.13	1120
				24.667	1140
				25.216	1160
				25.777	1180
				26.35	1200
				26.936	1220
				27.535	1240
28.148	1260				
28.774	1280				
29.414	1300				
30.068	1320				
30.737	1340				
31.421	1360				
32.12	1380				
32.834	1400				
33.564	1420				
34.311	1440				
35.074	1460				
35.854	1480				

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Alliage Ti6Al4V	
				Valeur	Température
Thermique (« Thermal »)	Conductibilité (« Conductivity »)	Isotropique (« Isotropic »)	Conductibilité (« Conductivity »), mW mm <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	36.652	1500
	Chaleur massique (« Specific Heat »)	Volume constant (« Constant Volume »)	Chaleur massique (« Specific Heat »), mJ t <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	545000000	20
				562000000	100
				583000000	200
				604000000	300
				625000000	400
				646000000	500
				667000000	600
				688000000	700
				709000000	800
				730000000	900
	649000000	1000			
	667000000	1100			
685000000	1200				
703000000	1300				
Fraction de chaleur inélastique (« Inelastic Heat Fraction »)	-	Fraction de chaleur inélastique (« Inelastic Heat Fraction »)	0.9	-	

Tableau 8 - Propriétés de l'acier X2CrNiMo18-14-3 (Valiorgue, 2008), (AZoM)

Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Acier X2CrNiMo18-14-3	
				Valeur	Température
Générale (« General »)	Densité (« Density »)	-	Masse volumique (« Mass Density »), t/mm <sup>3</sup>	8E-009	20
				7.89E-009	300
				7.8E-009	500
				7.66E-009	800
				7.51E-009	1100
Mécanique (« Mechanical »)	Elasticité (« Elastic »)	Isotropique (« Isotropic »)	Module de Young (« Young' Modulus »), MPa	197000	20
				184000	200
				168000	400
				151500	600
				130000	800
				108000	900
			Coefficient de Poisson (« Poisson's Ratio »)	0.3	-



Mode de la propriété	Propriété	Type	Paramètre	Acier X2CrNiMo18-14-3	
				Valeur	Température
Mécanique (« Mechanical »)	Plastique (« Plastic »)	Écrouissage : Johnson-Cook (« Hardening : Johnson-Cook »)	A, MPa	514	-
			B, MPa	514	
			n	0.508	
			m	0.533	
			Température de fusion (« Melting Temp »), °C	1450	
			Température de transition (« Transition Temp »), °C	20	
	Dépendant de la vitesse (« Rate Dependent »)	Écrouissage : Johnson-Cook (« Hardening : Johnson-Cook »)	C	0.042	-
			Vitesse de déformation de référence (« Epsilon dot zero »)	0.001	
	Expansion (« Expansion »)	Isotropique (« Isotropic »)	Coefficient de dilatation thermique (« Expansion Coeff alpha »), mm·mm <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.59E-005	20
				1.62E-005	315
1.75E-005				538	
Thermique (« Thermal »)	Conductibilité (« Conductivity »)	Isotropique (« Isotropic »)	Conductibilité (« Conductivity »), mW mm <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	14	20
				18	300
				21	500
				24	800
				29	1100
	Chaleur massique (« Specific Heat »)	Volume constant (« Constant Volume »)	Chaleur massique (« Specific Heat »), mJ t <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	450000000	20
				545000000	300
				570000000	500
				625000000	800
	Fraction de chaleur inélastique (« Inelastic Heat Fraction »)	-	Fraction de chaleur inélastique (« Inelastic Heat Fraction »)	0.9	-

## 1.3.2 Création des sections

Pour associer les matériaux et les géométries, il faut définir des sections. On utilise la fonction « Create Section » du module « Property ». Ici le nom de la section (« Name »), la catégorie (« Category ») et le type (« Type ») du corps sont indiqués. Dans notre cas tous les corps sont solides (« Solid ») et homogènes (« Homogeneous »). Pour tenir compte la largeur de coupe de 3 mm, l'épaisseur de la section (« Plane stress/strain thickness ») doit être définie (Figure 14).

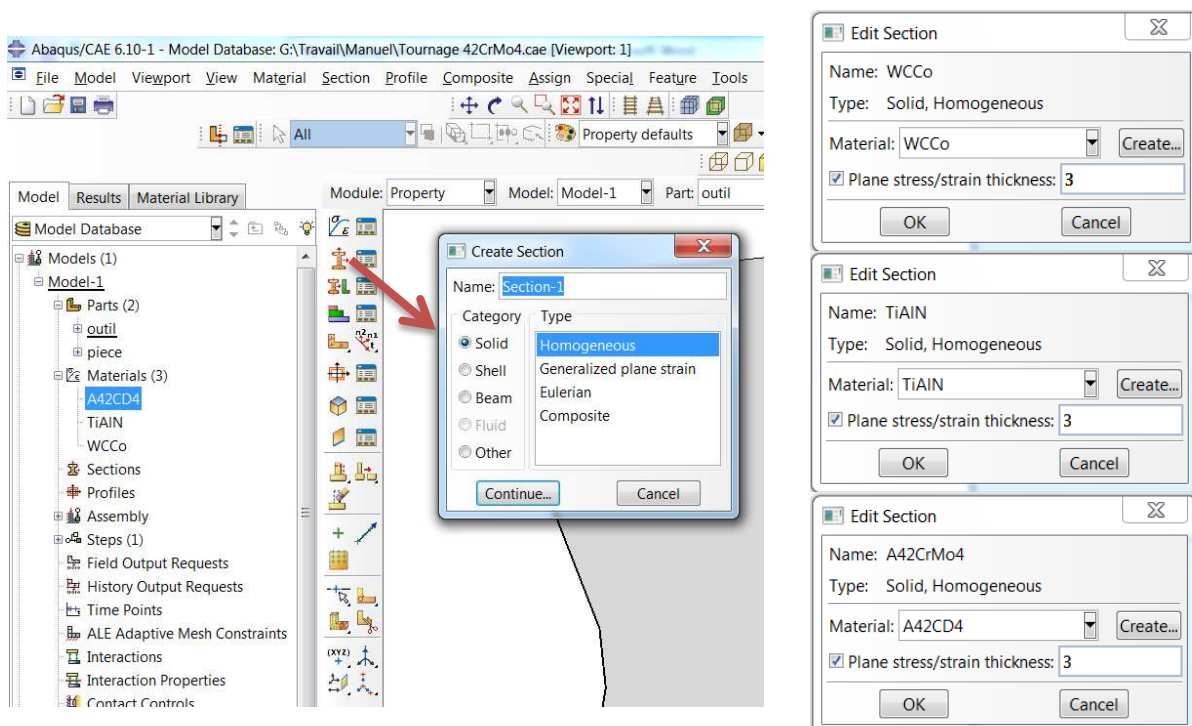


Figure 14 - Création des sections

Pour lier les sections aux modèles géométriques il faut utiliser la fonction « Assign Section » du module « Property » (Figure 15).

## PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

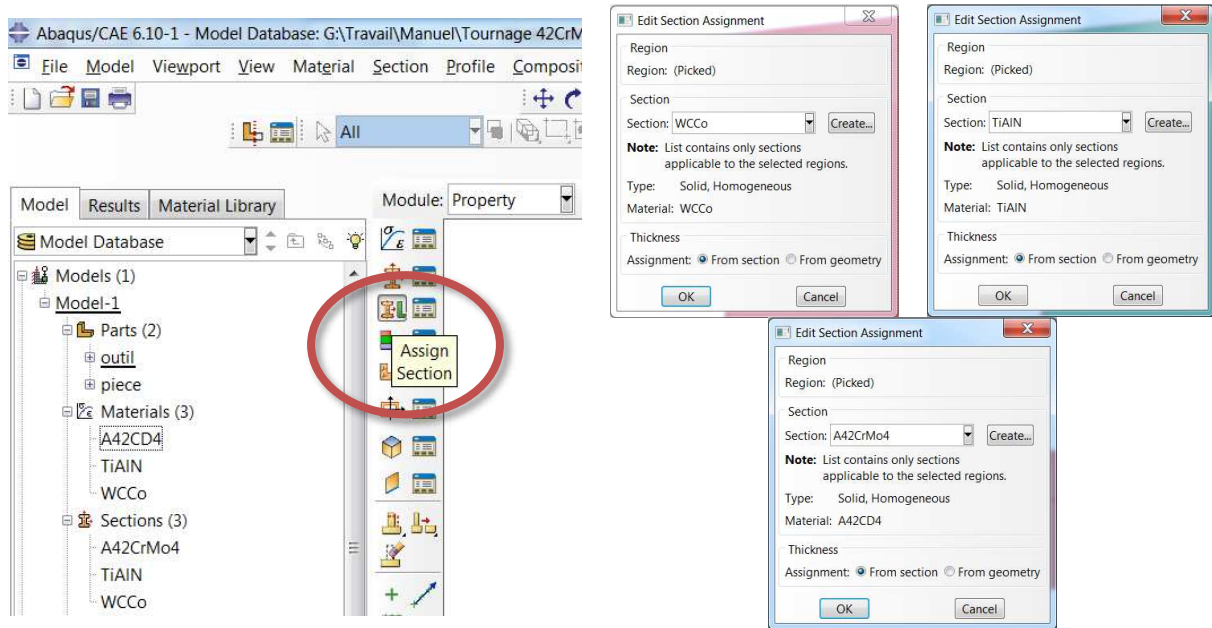


Figure 15 - Fonction « Assign Section »

# 1.4 Assemblage

La phase d'assemblage permet de positionner les différents modèles géométriques les uns par rapport aux autres. Pour créer cet assemblage il est nécessaire de passer dans le module « Assembly » et de choisir « Create Instance ». Ici les deux modèles de l'outil et de la pièce sont sélectionnés et définis comme indépendants (« Independent ») (Figure 16). La position relative des deux pièces peut alors être ajustée en utilisant les outils de translation et de rotation des instances.

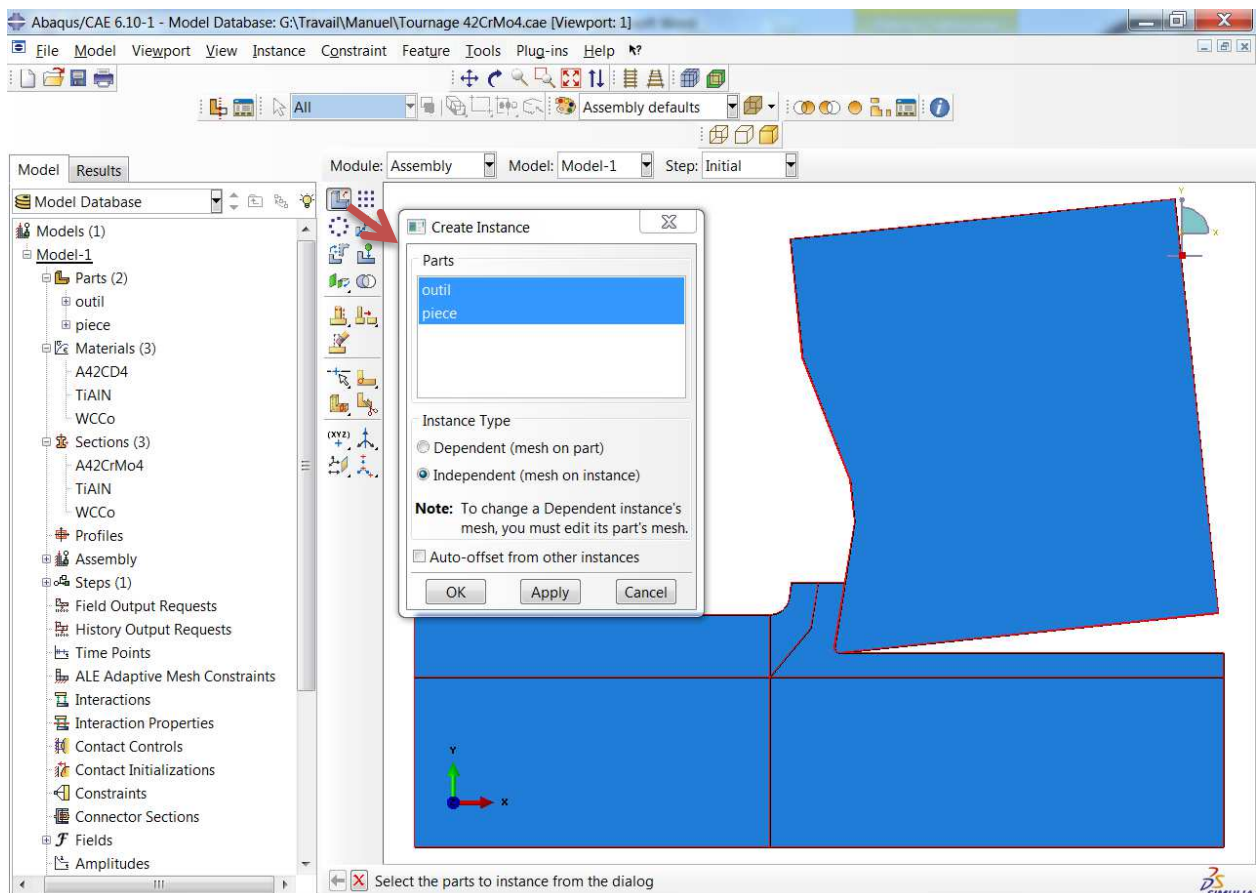


Figure 16 - Création de l'assemblage

# 1.5 Paramètres du calcul

Les paramètres du calcul sont déterminés par rapport aux besoins de la simulation dans le module « Step » par la fonction « Create Step ». Si l'objectif est l'analyse dynamique et thermique il faut sélectionner « Dynamic, Temps-disp, Explicit ». Dans la fenêtre suivante, le temps de simulation (« Time period ») est à définir (Figure 17).

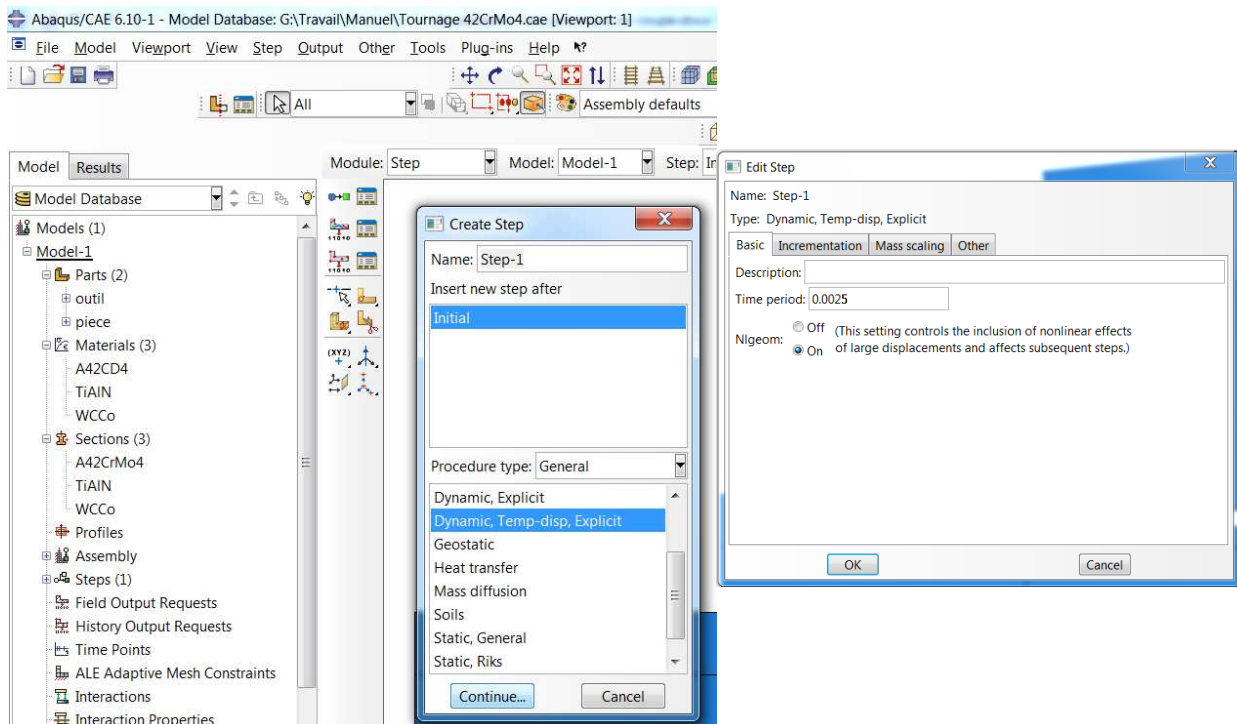


Figure 17 - Paramètres du calcul

# 1.6 Contraintes prédéterminées

Toutes les contraintes initiales liées au modèle avant le lancement du calcul peuvent être décrites dans le module « Load » par la fonction « Create Predefined Field ». Dans notre cas c'est la température initiale de 20°C de l'outil et de la pièce (Figure 18) que l'on définit par ce moyen.

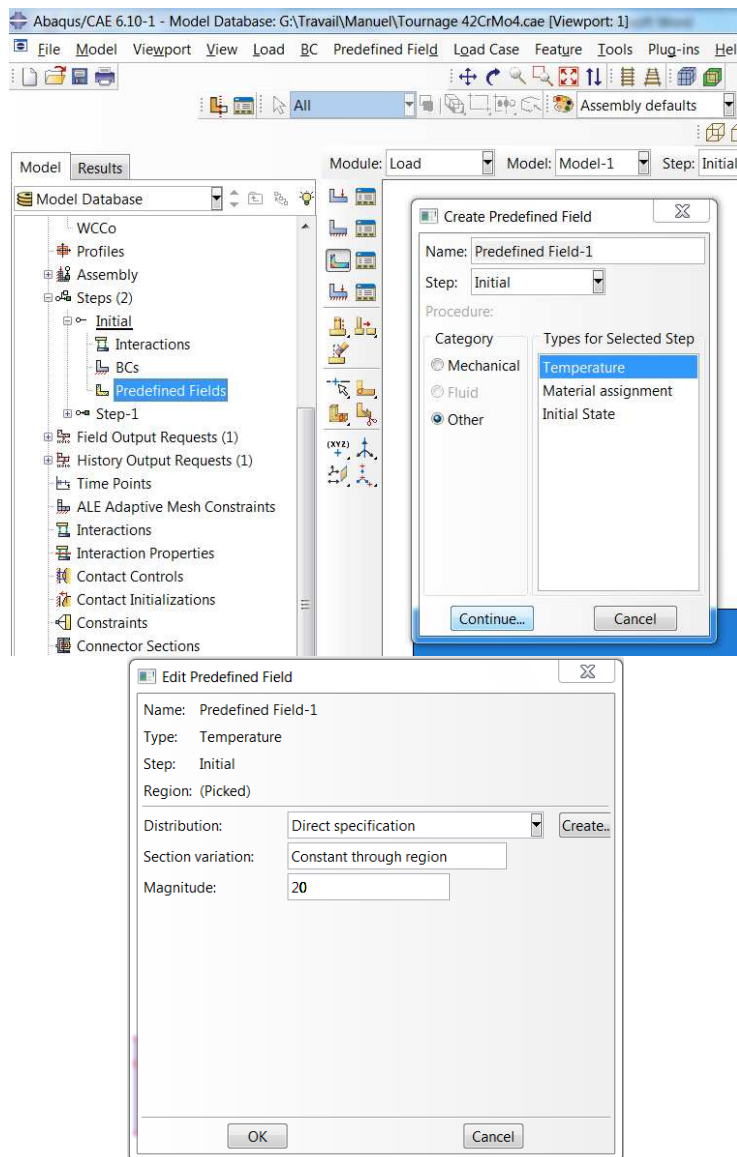


Figure 18 - Contraintes prédéterminées

# 1.7 Interactions

## 1.7.1 Interactions de contact

La loi de contact est identifiée avec l'ensemble des phénomènes mécaniques et thermiques. Les phénomènes mécaniques sont décrits par la définition du modèle de frottement. Dans notre cas on utilise le modèle du Coulomb isotrope :

$$|\sigma_t| \geq \mu \cdot |\sigma_n| ;$$

$$|\sigma_t| < \mu \cdot |\sigma_n|.$$

où  $\sigma_t$ ,  $\sigma_n$  sont les composantes du vecteur tension de contact,  $\mu$  est le coefficient de frottement (« Tangential Behavior »). Les coefficients de frottement sont donnés ci-après pour les couples de matériaux : 42CrMo4/TiAlN – 0.32 (Pantalé, 2005); Ti6Al4V/TiAlN – 0.47 (Chinmaya, et al., 2010); X2CrNiMo18-14-3/TiAlN – 0.4 (Kone, et al., 2011).

Les phénomènes thermiques sont traduits par la définition du coefficient de partage du flux généré par frottement (« Heat Generation »). Dans le cas d'un contact dynamique, le problème est compliqué par le fait que l'interface de contact se comporte comme une source de flux de chaleur. Si l'on suppose alors que l'épaisseur du contact est négligeable, il n'y a pas d'accumulation de chaleur au niveau du contact, et la totalité du flux généré par frottement  $\Phi_g$  est partagée entre les deux solides. On introduit alors la notion de coefficient de partage  $\alpha$  définissant la fraction du flux généré par frottement  $\Phi_{g \rightarrow 1}$  entrant dans le solide 1. Dans notre cas le solide 1 est l'outil de coupe et le solide 2 est le matériau à usiner (Pantalé, 1996) :

$$\Phi_{g \rightarrow 1} = \alpha \cdot \Phi_g ;$$

$$\Phi_{g \rightarrow 2} = (1 - \alpha) \cdot \Phi_g.$$

Dans le cas simplifié où les deux solides sont en contact parfait, la relation de Vernotte conduisant à l'expression du coefficient de partage  $\alpha$  peut s'écrire en fonction du rapport des effusivités des deux matériaux (Pantalé, 1996)

$$\frac{\Phi_{g \rightarrow 1}}{\Phi_{g \rightarrow 2}} = \frac{\alpha}{\alpha - 1} = \frac{\sqrt{\lambda_1 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1}}}{\sqrt{\lambda_2 \cdot \rho_2 \cdot C_{p2}'}}$$

où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont les conductibilités thermiques,  $\rho_1$  et  $\rho_2$  les densités,  $C_{p1}$  et  $C_{p2}$  les chaleurs spécifiques de l'outil de coupe et du matériau à usiner respectivement.

Les relations de Vernotte et les coefficients de partage pour les couples des matériaux à étudier sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9 - Relation de Vernotte et coefficient de partage

Couple	Relation de Vernotte	Coefficient de partage
42CrMo4/TiAlN	0.65	61%
Ti6Al4V/TiAlN	2.12	32%
X2CrNiMo18-14-3/TiAlN	1.55	39%

On prend également en compte le coefficient de conductibilité thermique pour le couple du matériau à usiner et la nuance de coupe (« Conductance »). Il est égal à  $10^8 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$  selon (Ozel, et al., 2010). On prend la distance minimale de l'action de ce coefficient égale à  $1 \mu\text{m}$  (« Clearance »).

Les propriétés de l'interaction sont créées dans le module « Interaction » par la fonction « Create Interaction Property ». Après avoir choisi le nom (« Name ») et le type (« Type ») de l'interaction dans la fenêtre qui s'ouvre alors, on définit les propriétés mécaniques (« Tangential Behavior ») et thermiques (« Thermal Conductance » et « Heat Generation ») du contact (Figure 19).



## PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

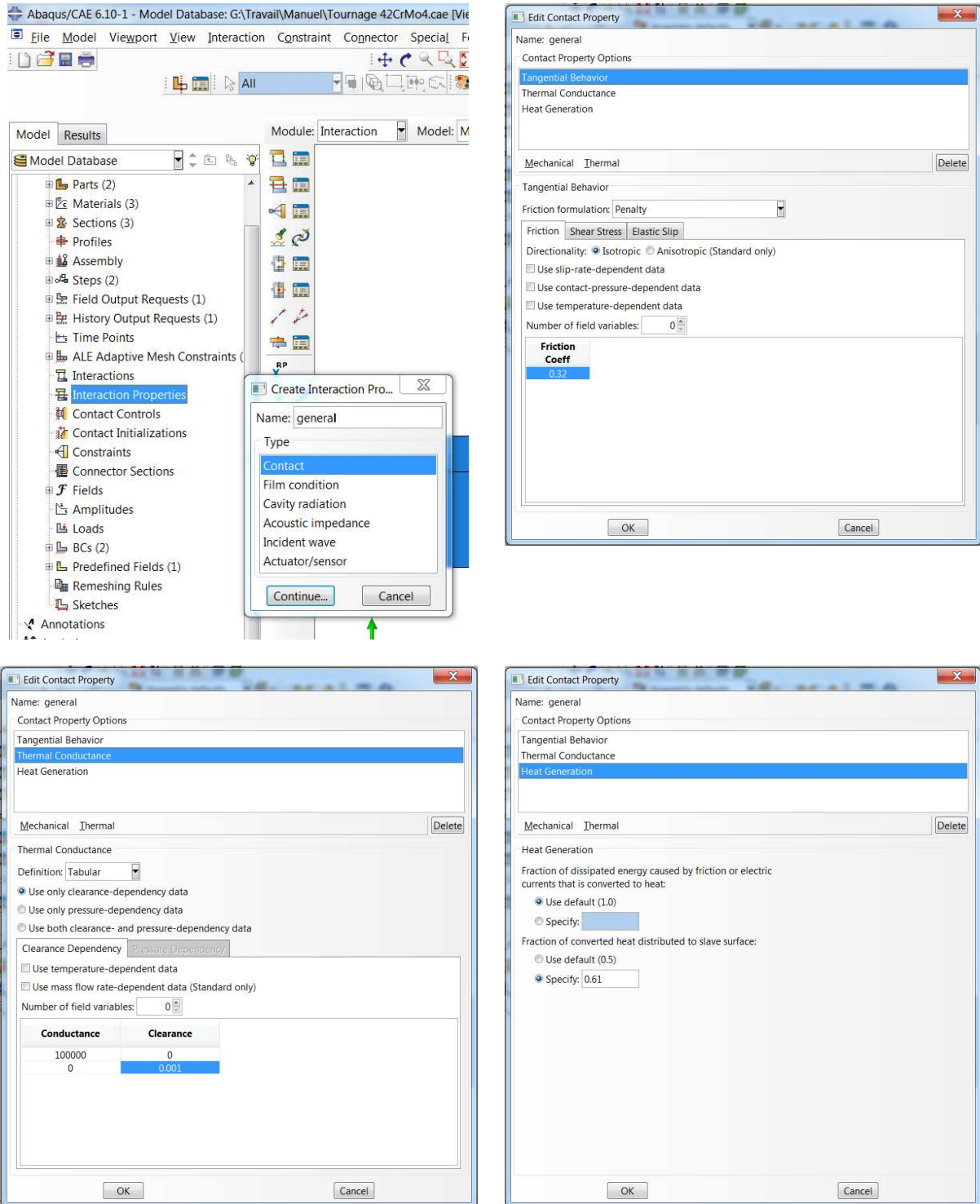


Figure 19 - Propriétés de l'interaction de contact

Pour appliquer les propriétés de l'interaction à la zone de contact il faut cliquer sur le bouton « Create Interaction » dans le module « Interaction ». Ce sont les surfaces de l'outil et de la pièce qui sont en interaction, c'est pourquoi le type de l'interaction est

« Surface-to-surface contact ». La formulation retenue pour la définition de la contrainte de contact est cinématique (« Kinematic contact method »). Puis il faut sélectionner les surfaces maitresses (« First surface ») de l'outil et esclave (« Second surface ») de la pièce (Figure 20).

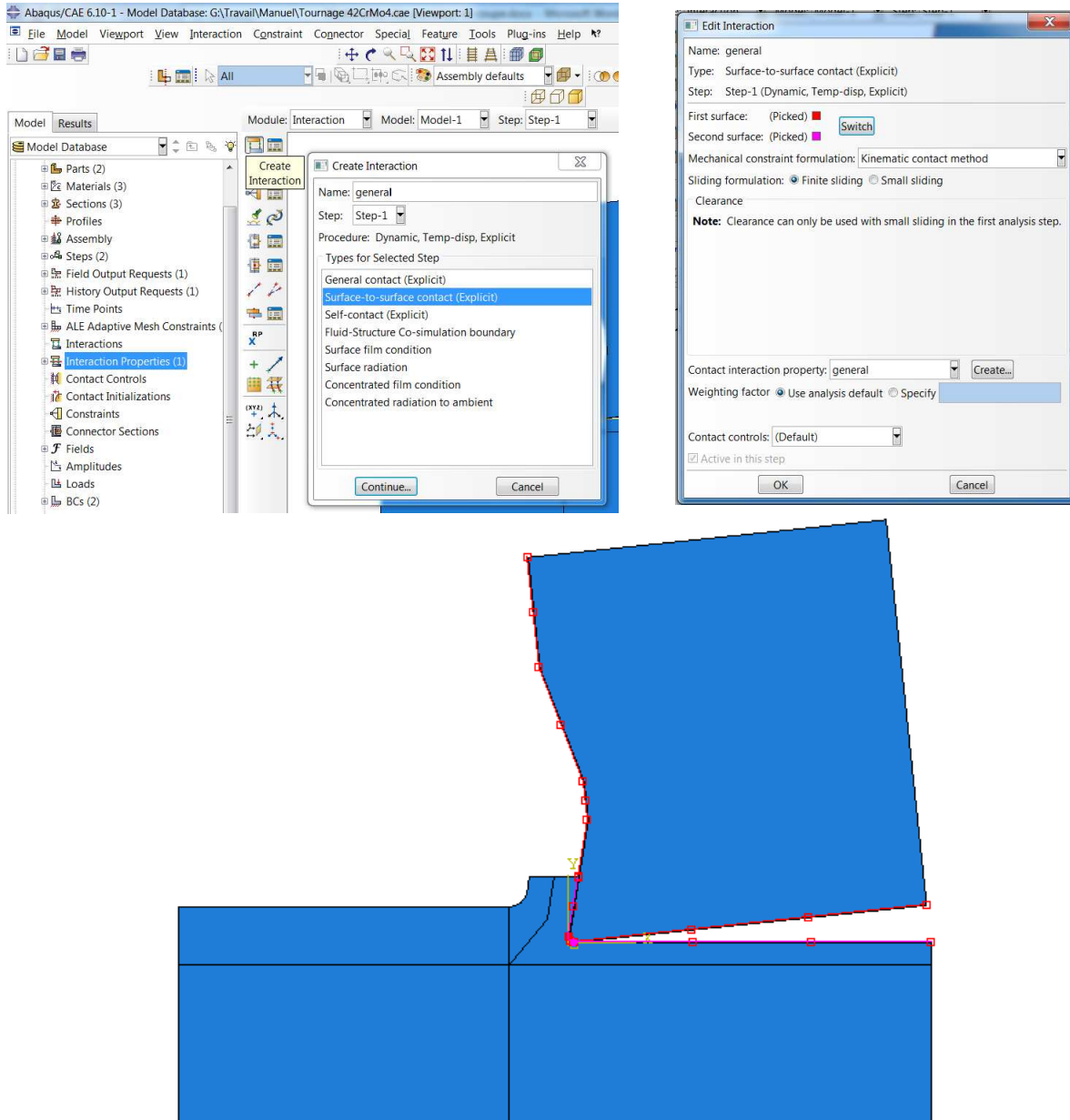


Figure 20 - Création de l'interaction de contact

## 1.7.2 Descriptions des actions d'assistance

Via l'utilisation de différentes méthodes d'assistance lors de l'usinage on peut réguler la température, le frottement et d'autres paramètres dans la zone de coupe. Il faut donc tenir compte ces paramètres dans le modèle numérique de simulation du processus de coupe. Afin d'illustrer l'approche, le cas de l'application d'un liquide de coupe a été considéré. Pour estimer l'action réfrigérante du liquide de coupe, on applique un flux thermique spécifique au niveau des zones d'action du liquide de coupe (Энтелис, et al., 1995)

$$q = \alpha \cdot (T_s - T_l),$$

où  $\alpha$  est le coefficient de conductibilité thermique,  $T_s$  est la température du solide et  $T_l$  est la température du liquide. Le coefficient de conductibilité thermique est donné par l'équation suivante:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{\acute{e}q}},$$

où  $Nu$  est le nombre de Nusselt,  $\lambda$  est la conductibilité et  $D_{\acute{e}q}$  est le diamètre équivalent.

Ce diamètre équivalent est donné par la relation :

$$D_{\acute{e}q} = \frac{4 \cdot S}{U},$$

où  $S$  est la surface du solide sur laquelle agit le liquide de coupe et  $U$  est le périmètre de la surface du solide sur laquelle agit le liquide de coupe.

Le nombre de Nusselt est donné en fonction du nombre de Reynolds par :

$$\text{pour } 8 < Re < 10^3 : Nu = 0,5 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,38} \cdot (Pr/Pr_{\text{п.с.}})^{0,25};$$

$$\text{pour } 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5 : Nu = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38} \cdot (Pr/Pr_{\text{п.с.}})^{0,25},$$

où  $Re$  est le nombre de Reynolds,  $Pr$  est le nombre de Prandtl et  $Pr_{c.f}$  est le nombre de Prandtl dans la couche limite. Le nombre de Reynolds est défini par la relation suivante :

$$Re = \frac{w \cdot D_{\text{eq}}}{\nu}$$

où  $w$  est la vitesse moyenne du flux du liquide et  $\nu$  est la viscosité cinématique.

Le nombre de Prandtl est défini par la relation suivante :

$$Pr = \frac{v \cdot \rho}{c_p}$$

où  $\rho$  est la densité et  $c_p$  est la chaleur spécifique.

Pour tenir compte de cette influence sur la valeur du coefficient de conductibilité thermique calculé il faut l'indiquer lors de la création de l'interaction « Surface film condition » (Figure 21). Les zones de contact avec le liquide de coupe doivent être définies. Les paramètres du liquide sont saisis dans la fenêtre de définition : le coefficient de conductibilité thermique « Film coefficient » et la température initiale du liquide « Sink temperature » (Figure 22 et Figure 22).

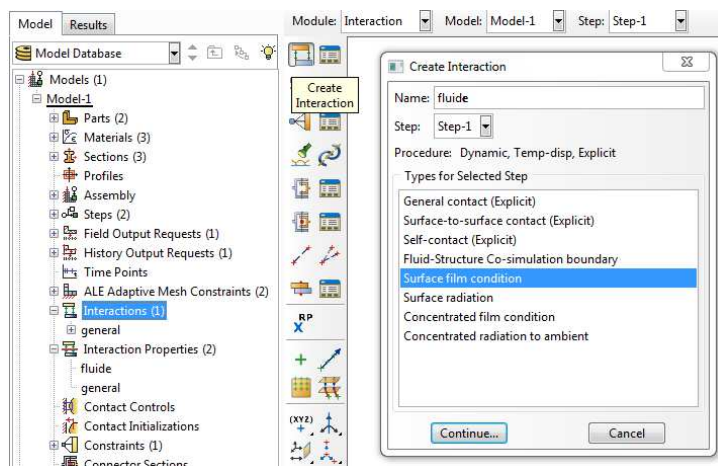


Figure 21 - Création de l'interaction avec le liquide de coupe

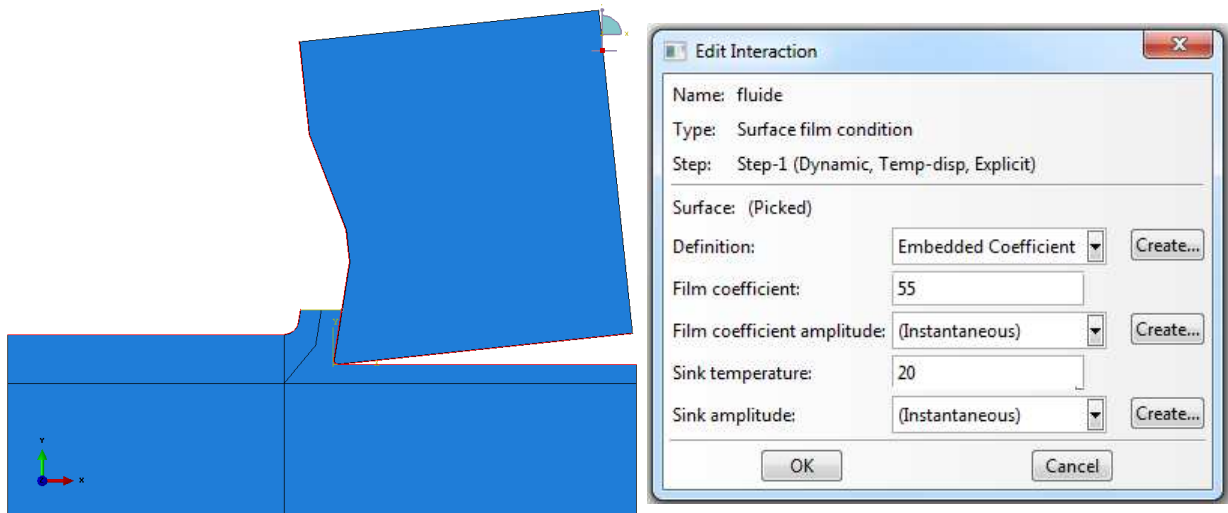


Figure 22 - Identification des zones et des paramètres de l'interaction avec le liquide de coupe

L'action lubrifiante du liquide de coupe peut être traduite par une diminution du coefficient de frottement tel qu'il a déjà été introduit dans le modèle antérieurement.

### 1.7.3 Contraintes auxiliaires

Pour éviter les phénomènes de distorsion du maillage lors de la simulation il faut définir des conditions sur le maillage au moyen des contraintes auxiliaires. C'est zone située au niveau de la surface du copeau proche de la pointe de l'outil qui subit ce phénomène. Dans le module « Interaction », la fonction « Create Constraint »-« Coupling » permet de définir une contrainte qui conserve la distance constante entre le point de contrôle (« Control point ») et la surface (« Surface ») (Figure 23).

## PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

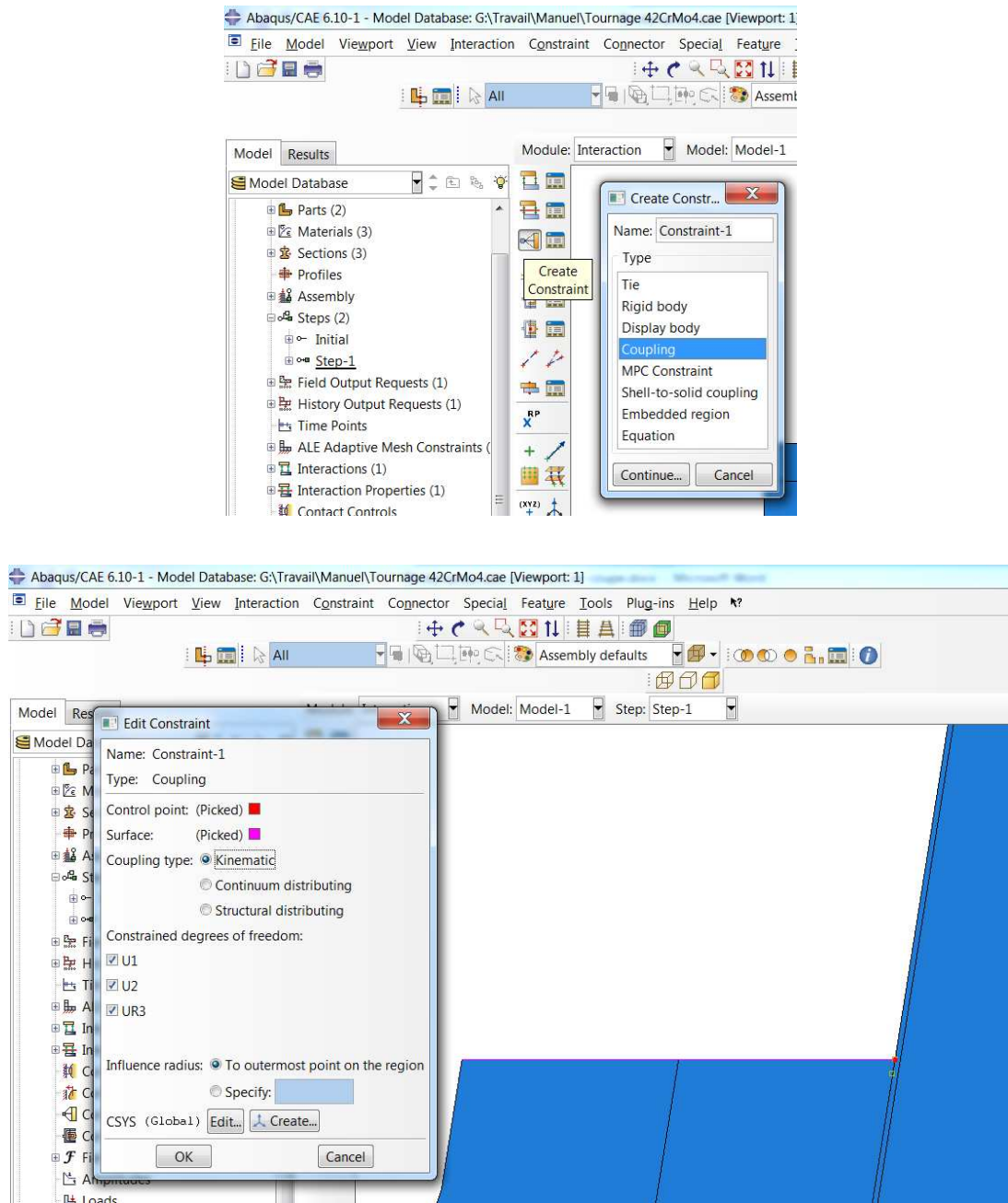


Figure 23 - Contraintes auxiliaires

# 1.8 Conditions limites

## 1.8.1 Choix de l'approche ALE

La modélisation de la coupe des métaux par une simulation éléments finis peut être réalisée à l'aide de trois approches : Eulérienne, Lagrangienne et Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE). On présente chaque approche succinctement afin de déterminer les avantages et inconvénients de chacune.

### Approche Eulérienne

La description Eulérienne (Figure 24) est une description spatiale de l'écoulement. Le maillage Eulérien est constitué d'une grille fixe. Tous les points de la discrétisation restent par conséquent fixes dans l'espace au fur et à mesure de l'avancée de la résolution du problème. Les grandeurs physiques (vitesse, pression...) sont donc calculées en des points déterminés de l'espace. La masse, la quantité de mouvement et l'énergie transitent d'une maille à ses voisines. Les diverses grandeurs sont écrites en fonction de la position  $x_i$  et du temps. La dérivée particulaire d'une telle fonction, en suivant la particule dans son mouvement, requiert la prise en compte de l'instationnarité et de la convection. Numériquement, le calcul des dérivées par rapport au temps est donc coûteux.

Dans le cadre de la modélisation de la coupe, cette description simplifiée de manière importante la mise en œuvre. Pour ces raisons, les premiers modèles par éléments finis de la coupe ont été développés en description Eulérienne. En effet, cette description évite les problèmes numériques liés à la déformation importante des mailles. Le problème de la représentation de la séparation du copeau est aussi écarté. En contrepartie, il est nécessaire de connaître a priori la géométrie du copeau et seuls les cas de coupe stationnaires (copeaux continus) peuvent être modélisés. Le caractère prédictif de ce type de modèles est donc très limité (Limido, 2008).

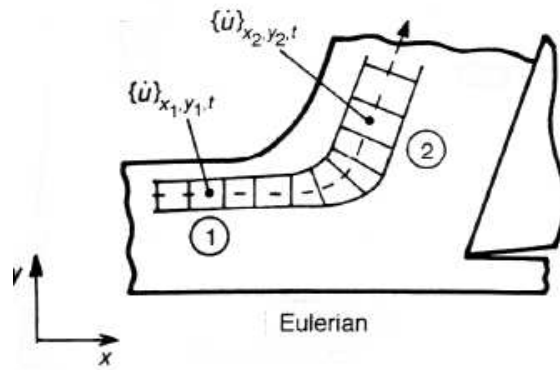


Figure 24 - Approche Eulérienne (Nouari, 2010)

### Approche Lagrangienne

La description Lagrangienne (

Figure 25) est une description matérielle, c'est à dire liée à la matière. Les points de la grille de discrétisation sont liés au mouvement de la matière et se déplacent à la vitesse matérielle. Les grandeurs de l'écoulement (vitesse, pression ...) sont calculées de la même façon, en chaque point, au fur et à mesure de l'avancée du processus.

Cette description a certaines qualités pour l'application au problème de la coupe. Le traitement des conditions aux limites des surfaces libres est simple. Il est possible de suivre une grandeur attachée à une particule lors de l'écoulement. Les deux principales difficultés associées à cette approche sont d'une part le traitement des grandes déformations et d'autre part, la gestion de la séparation du copeau. Les grandes déformations localisées génèrent des distorsions de mailles importantes et implique l'utilisation d'une technique de remaillage ou de maillage pré-distordu. La séparation du copeau nécessite une gestion spécifique car il y a création de nouveaux bords libres. Malgré ces difficultés, l'approche Lagrangienne permet de réaliser des modélisations complètes de cas de coupes stationnaires (copeaux continus) et instationnaires (copeaux discontinus) (Limido, 2008).



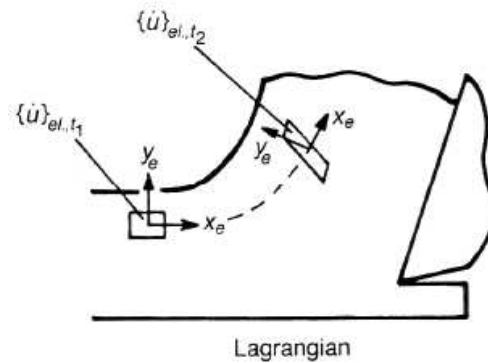


Figure 25 - Approche Lagrangienne (Nouari, 2010)

### Approche Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

Dans les années 90, R. Rakotomalala, P. Joyot et O. Pantalé combinent des formalismes Lagrangiens et Eulériens pour résoudre les problèmes de réactualisation des surfaces libres et des surfaces de contact associés aux modèles Eulériens. La formulation ALE en relocalisant les nœuds ne permet pas d'éviter un remaillage si les déformations sont trop importantes (Germain, 2006).

La description Arbitraire Lagrangienne Eulérienne est une extension de deux approches classiques : Lagrangienne et Eulérienne. Les points de grille ne sont pas contraints à rester fixes dans l'espace (comme dans la description Eulérienne) ou à se déplacer avec les points matériels (comme dans la description Lagrangienne), ils ont leurs propres équations du mouvement. Dans une telle description, les points matériels sont représentés par un ensemble de coordonnées Lagrangiennes  $\vec{X}$ , les points spatiaux par un ensemble de coordonnées Eulériennes  $\vec{x}$  et les points de référence (points de grille) avec un ensemble de coordonnées arbitraires  $\vec{\xi}$  (Figure 26) (Pantalé, et al., 2004).

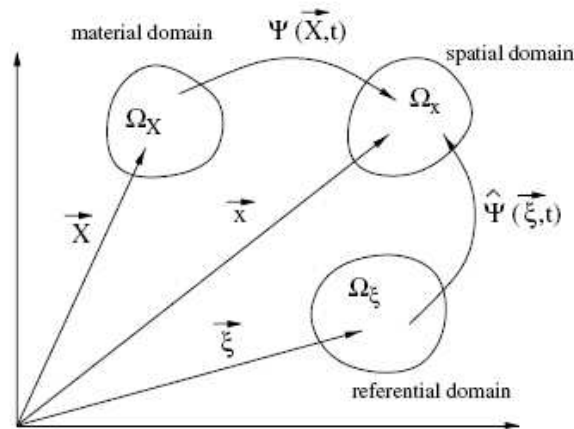


Figure 26 - Description du mouvement dans ALE (Pantalé, et al., 2004)

À l'instant  $t$ , un point  $\vec{x}$  de l'espace est à la fois l'image d'un point matériel  $\vec{X}$  par le mouvement matériel  $\vec{x} = \Psi(\vec{X}, t)$  et l'image d'un point de référence  $\vec{\xi}$  par le mouvement de grille  $\vec{x} = \hat{\Psi}(\vec{\xi}, t)$ .

La vitesse matérielle  $\vec{v}$  des particules est obtenue en utilisant une dérivée matérielle classique ( $\dot{\quad}$ ), tandis que la vitesse de grille  $\vec{\hat{v}}$  est obtenue après l'introduction d'une dérivée mixte ( $^{\circ}$ ) qui doit être interprétée comme « le temps » de la variation d'une grandeur physique pour un point de grille (Pantalé, et al., 2004)

$$\vec{v} = \dot{\vec{x}} = \left. \frac{\partial \vec{x}}{\partial t} \right|_{\vec{X}=cte} \quad \text{et} \quad \vec{\hat{v}} = \dot{\vec{x}} = \left. \frac{\partial \vec{x}}{\partial t} \right|_{\vec{\xi}=cte}$$

Toutes les grandeurs physiques sont calculées aux points de l'espace  $\vec{x}$  au temps  $t$ . Toutes les lois de conservation sont exprimées en prenant en compte le mouvement de la grille lors de la simulation (Pantalé, et al., 2004).

On utilise les lois de conservation dans une forme presque identique à celle de la description Eulérienne. Selon la relation suivante  $(\dot{\quad}) = (^{\circ}) + \vec{c} \nabla (\quad)$  où  $\vec{c} = \vec{v} - \vec{\hat{v}}$  est la vitesse que l'on appelle convective et  $\nabla$  est l'opérateur gradient, toutes les lois de conservation Eulériennes (la masse, le mouvement et l'énergie) peut être ré-écrites selon la description ALE comme suit (Pantalé, et al., 2004) :

$$\begin{aligned}\dot{\rho} + \bar{c}\nabla\rho + \rho \operatorname{div} \vec{v} &= 0, \\ \rho\dot{\vec{v}} + \rho\bar{c}\nabla\vec{v} &= \vec{f} + \operatorname{div} \sigma, \\ \rho\dot{e} + \rho\bar{c}\nabla e &= \sigma : \mathbf{D} - \operatorname{div} \vec{q} + r,\end{aligned}$$

où  $\rho$  est la densité,  $\vec{f}$  sont les forces de volume,  $\sigma$  est le tenseur des contraintes de Cauchy,  $e$  est l'énergie spécifique interne,  $\mathbf{D}$  est le tenseur vitesse de déformation,  $r$  est la production de chaleur du corps et  $\vec{q}$  est le vecteur du flux de chaleur. Dans une telle description, l'approche ALE peut être considérée comme une méthode automatique et continue de remaillage.

Pour passer d'une formulation Lagrangienne à une formulation Eulérienne, il faut définir une zone d'entrée et deux zones de sorties Eulériennes de matière, qui fixent les nœuds dans l'espace, mais autorisent un écoulement au travers de la surface limite. Dans le cas de la sortie du copeau, le déplacement vertical des nœuds n'est pas autorisé, le déplacement horizontal, quant à lui, doit être possible, pour permettre la libre prise de courbure du copeau lorsqu'il se décolle de la face de coupe. La vitesse de coupe est affectée aux nœuds de la zone d'entrée Eulérienne, afin d'imposer une vitesse d'écoulement uniforme (Valiorgue, 2008).

Compte tenu des avantages on choisit l'approche ALE pour cette modélisation.

## 1.8.2 Conditions limites pour les matériaux

L'outil est fixé dans l'espace et privé de ses 6 degrés de liberté. Pour respecter cela il faut choisir la fonction « Create Boundary Condition » dans le module « Load » et sélectionner « Mechanical » - « Symmetry/Antisymmetry/Encastre » et puis « ENCASTRE » (Figure 27).

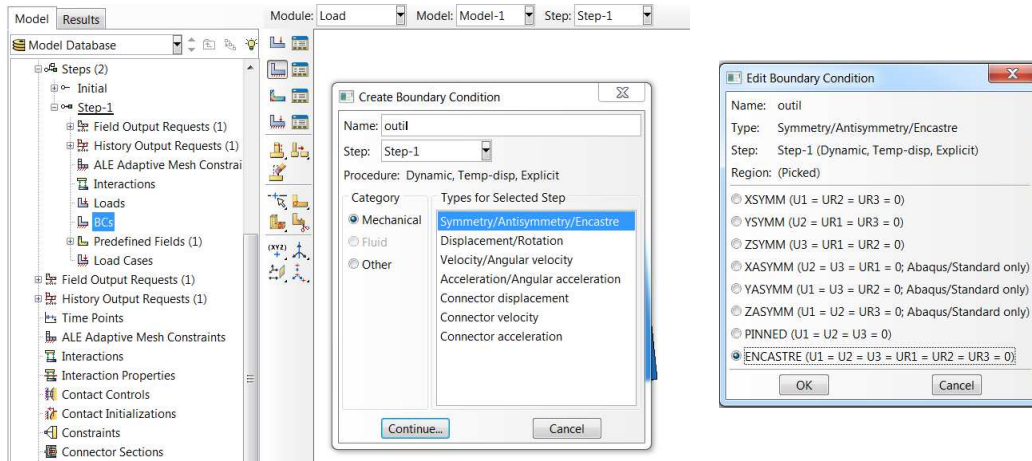


Figure 27 - Conditions limites du matériau de l'outil

Selon l'approche ALE le matériau « entre » et « sort » du modèle géométrique de la pièce c'est pourquoi il faut appliquer au niveau des zones correspondantes la vitesse de coupe (150 m/min = 2500 mm/s). C'est possible à l'aide du paramètre « Velocity/Angular velocity » dans le module « Create Bondary Condition ». Pour éviter le décollement du matériau il faut le priver d'un degré de liberté en translation verticale (Figure 28).

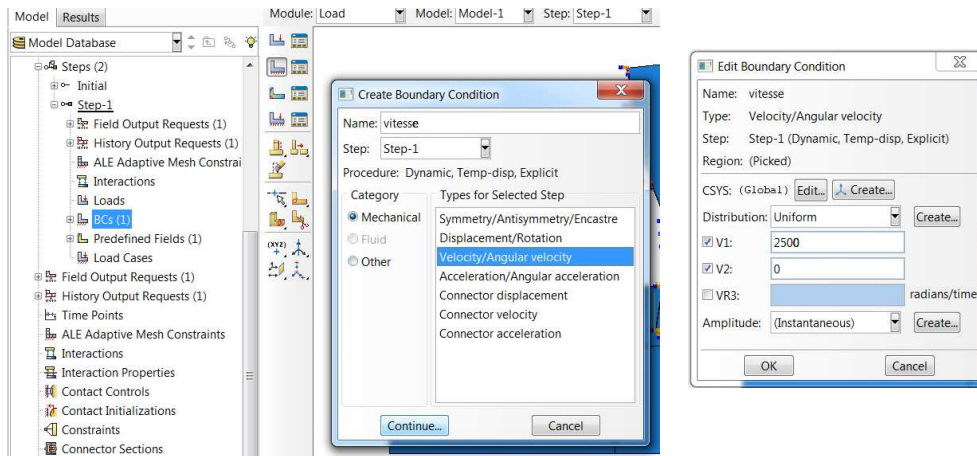


Figure 28 - Conditions limites du matériau de la pièce

Les conditions limites pour les matériaux sont visualisées sur la Figure 29.

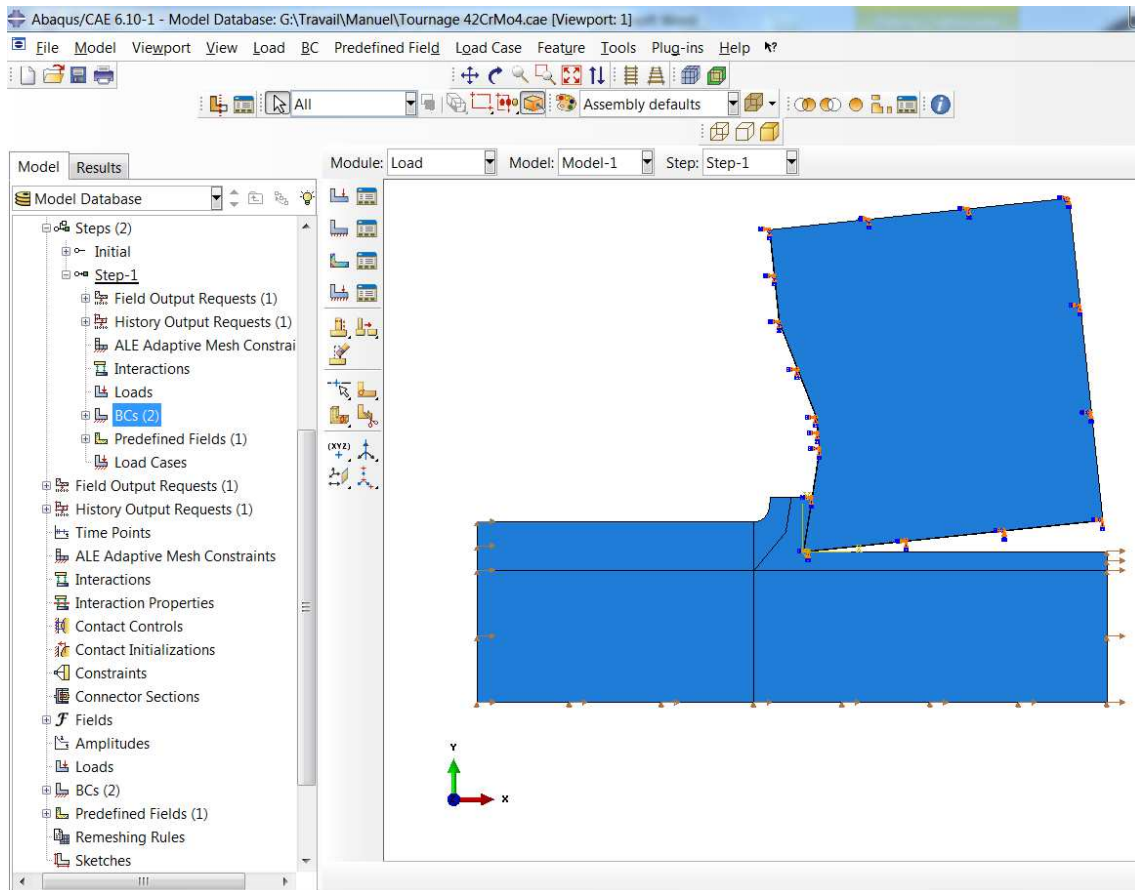


Figure 29 - Conditions limites pour les matériaux

### 1.8.3 Conditions limites pour le maillage ALE

Les conditions limites pour le maillage ALE sont appliquées au modèle de la pièce. Le maillage sur la base de la pièce ne doit pas se déplacer en direction Y et sur les zones de l'entrée et de la sortie du matériau – en direction X. Cela se définit dans le module « Step » et au moyen de la fonction « Displacement/Rotation » (Figure 30).

Les paramètres de contrôle du maillage adaptif ALE sont présentés sur la Figure 31.

## PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

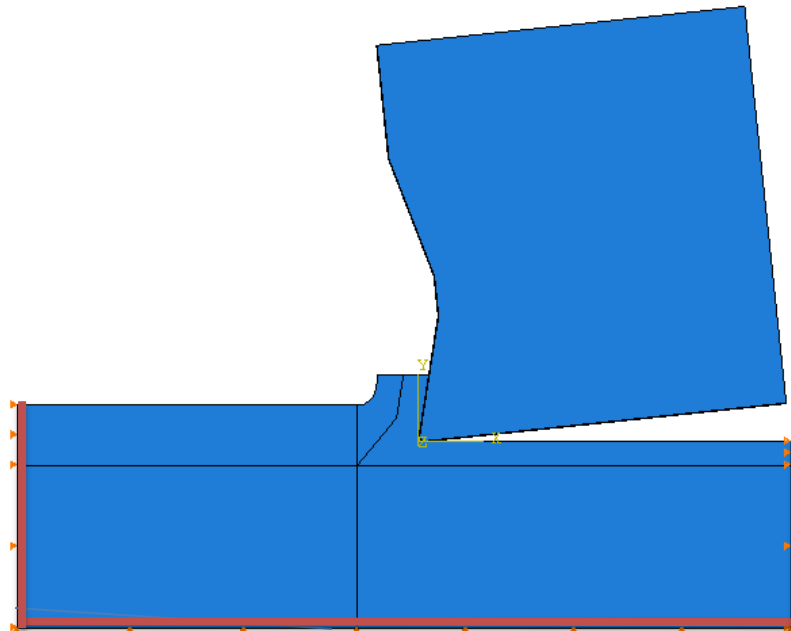
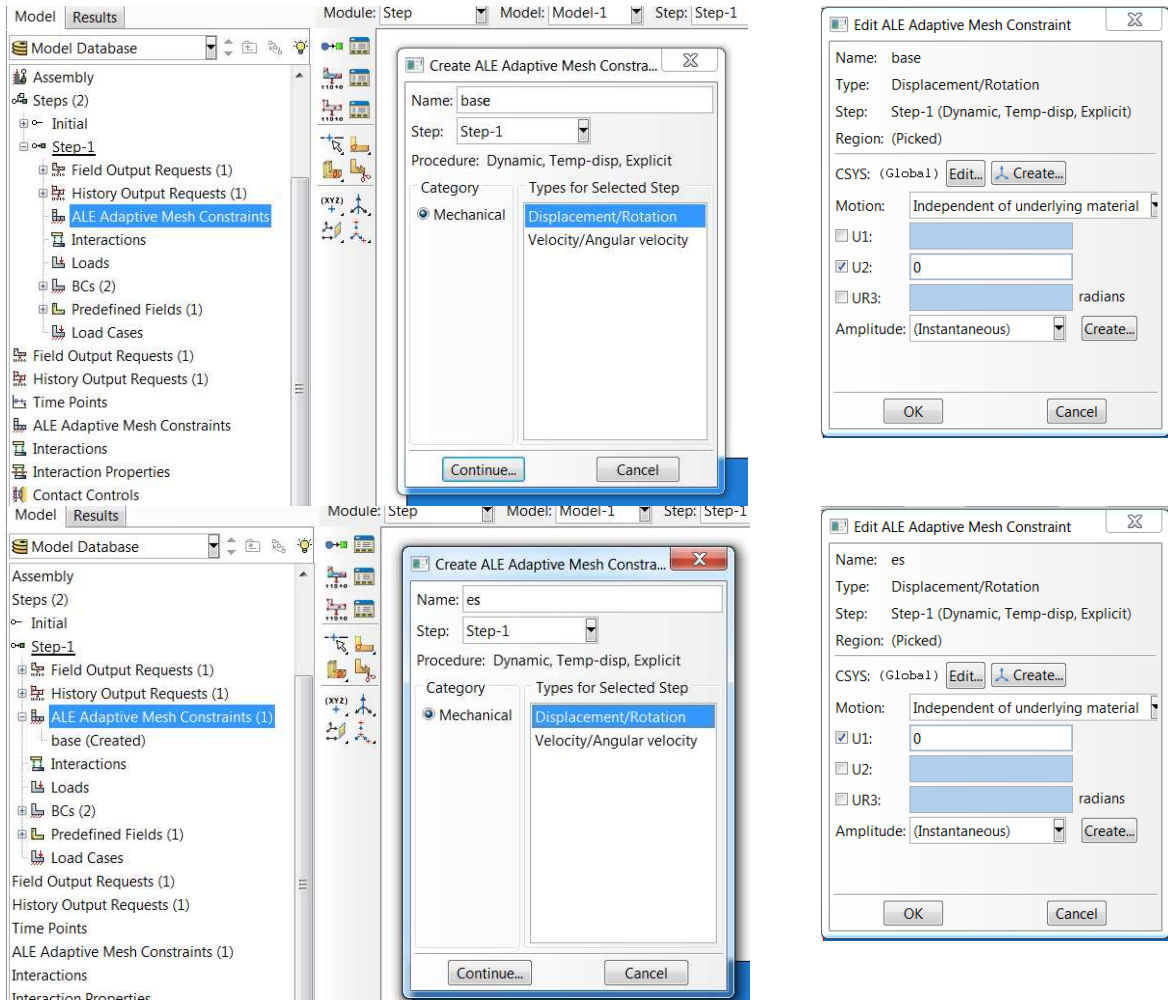


Figure 30 - Conditions limites pour le maillage ALE

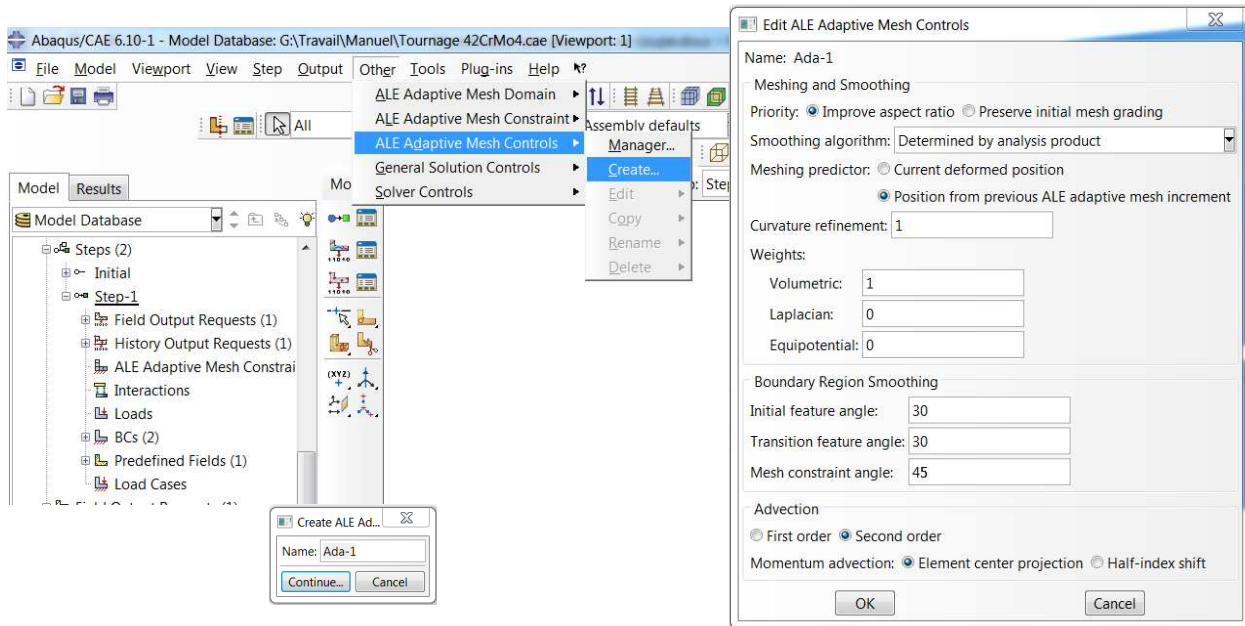


Figure 31 - Paramètres de contrôle du maillage adaptif ALE

Ces paramètres sont appliqués par la fonction « ALE Adaptive Mesh Domain »-« Edit »-« Step-1 » où il faut sélectionner le domaine de l’ALE, la fréquence (« Frequency ») et le remaillage par incrément (« Remeshing sweeps per increment ») (Figure 32).

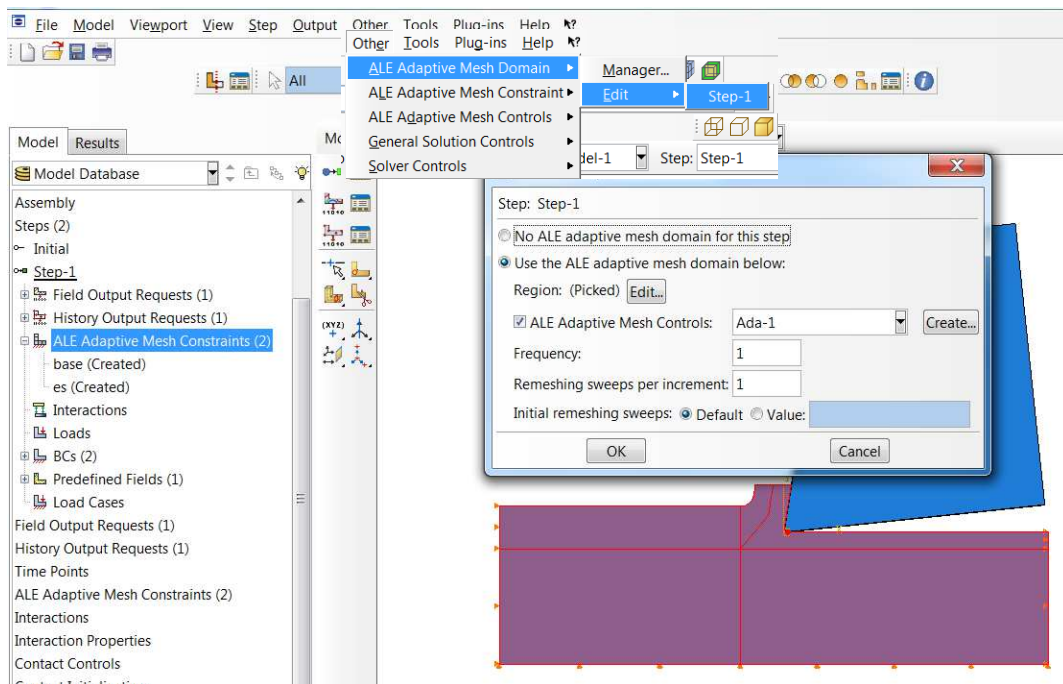


Figure 32 - Fonction « ALE Adaptive Mesh Domain »

# 1.9 Maillage

Dans le cas de l'approche ALE on choisit comme élément de base des quadrilatères structurés (« Quads-Structured ») pour la pièce. Dans l'outil de coupe le revêtement se base sur des quadrilatères structurés, le substrat sur des quadrilatères libres (« Quads-Free »). Pour cela il faut passer dans le module « Mesh » et cliquer sur le bouton « Mesh controls » (Figure 33 et Figure 34).

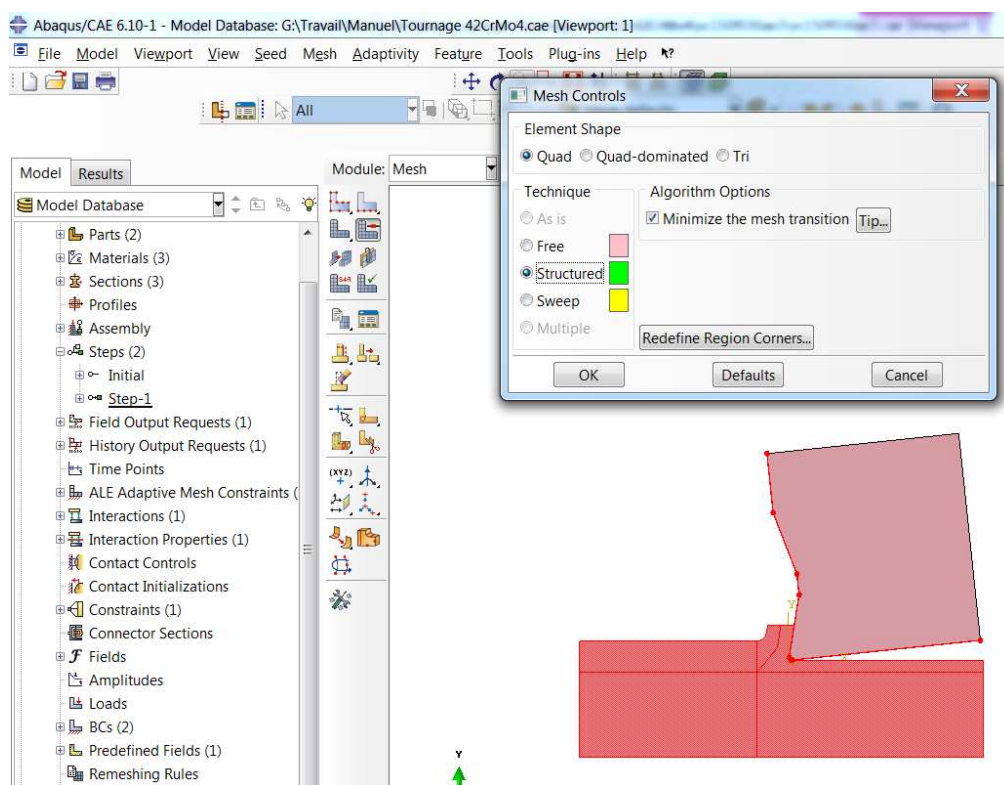


Figure 33 - Application du maillage quadrilatère libre



## PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

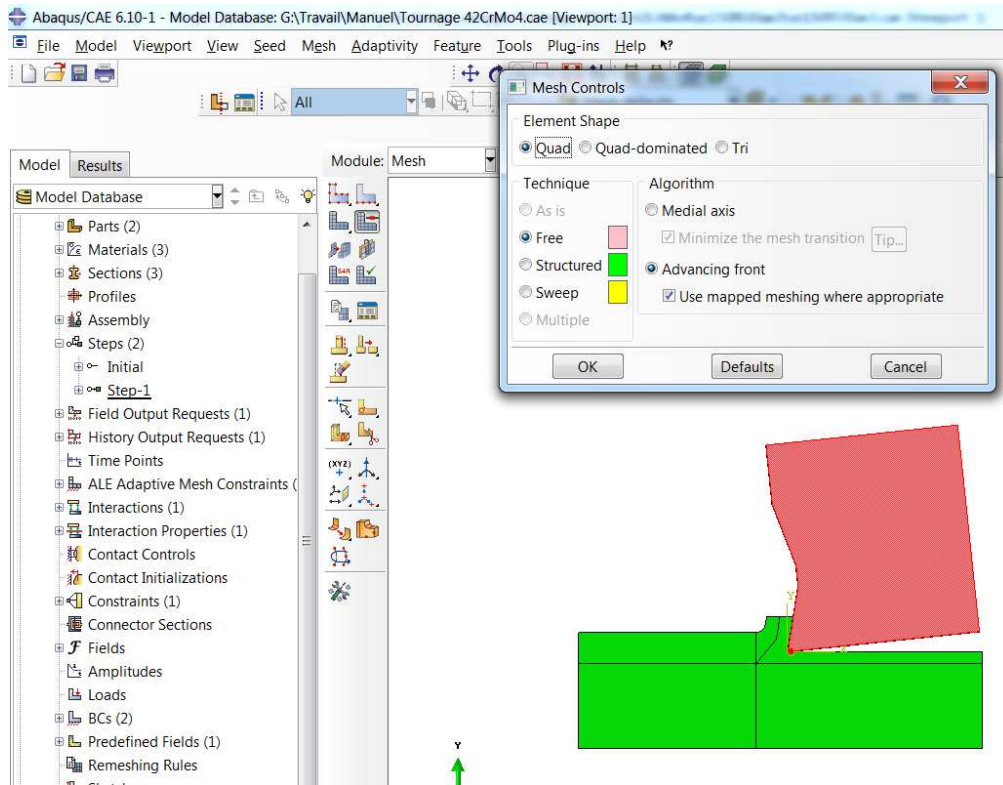


Figure 34 - Application du maillage quadrilatère structuré

Le choix du nombre d'éléments pour le maillage est effectué aussi dans le module « Mesh » mais à l'aide la fonction « Local seeds » d'une manière présentée sur les Figure 35-Figure 37.

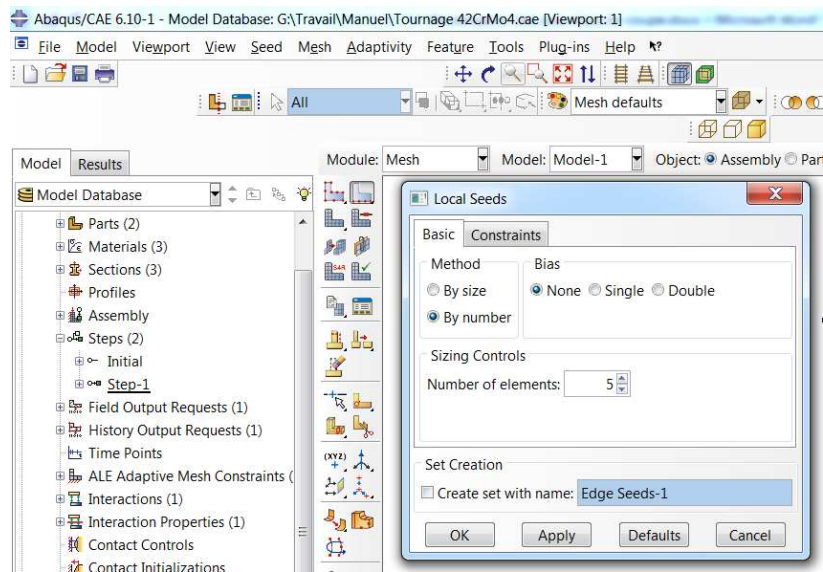


Figure 35 – définition du nombre des éléments d'un côté

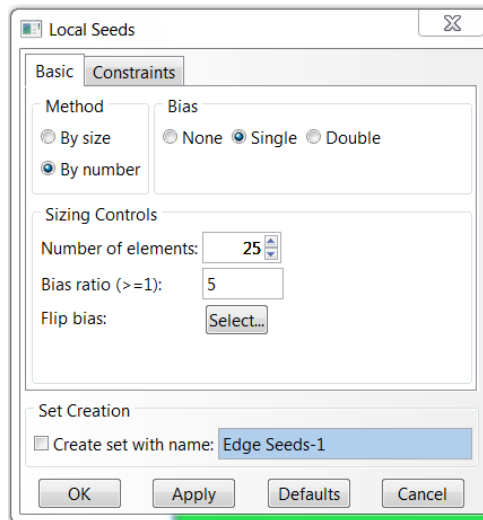


Figure 36 - Mise en place du raffinement des éléments le long d'un côté

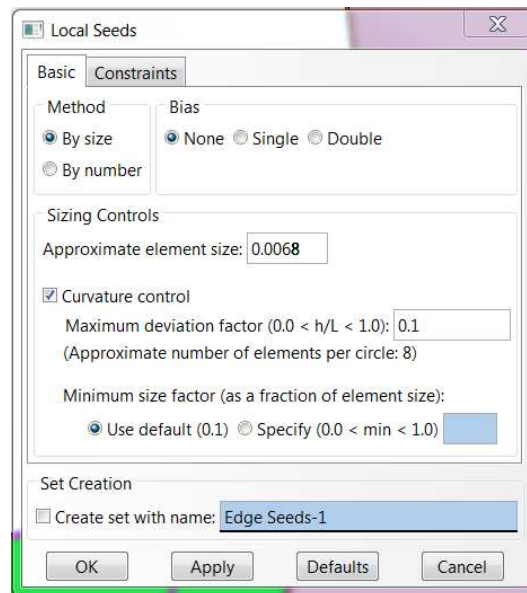


Figure 37 - Mise en place de la dimension de l'élément

La disposition des éléments du maillage de la pièce est présentée sur la Figure 38 et celle du maillage de l'outil sur la Figure 39.

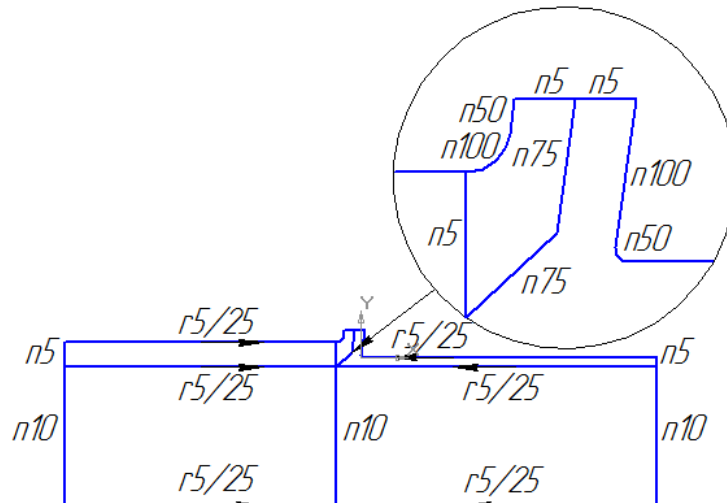


Figure 38 - Nombre d'éléments pour le maillage de la pièce ( $n$  – nombre des éléments d'un côté ;  $r$  – raffinement des éléments le long d'un côté, numérateur – coefficient d'augmentation du nombre des éléments, dénominateur – nombre des éléments)

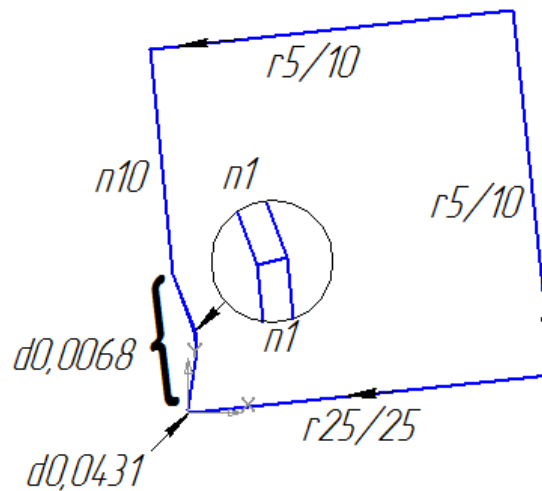


Figure 39 - Nombre d'éléments pour le maillage de l'outil ( $n$  – nombre des éléments le coté ;  $r$  – raffinement des éléments le long d'un côté, numérateur – coefficient d'augmentation du nombre des éléments, dénominateur – nombre des éléments ;  $d$  – dimension de l'élément)

Le maillage s'effectue par la fonction « Mesh Part Instance » (Figure 40). La Figure 41 présente le type des éléments utilisés dans la modélisation.

## PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

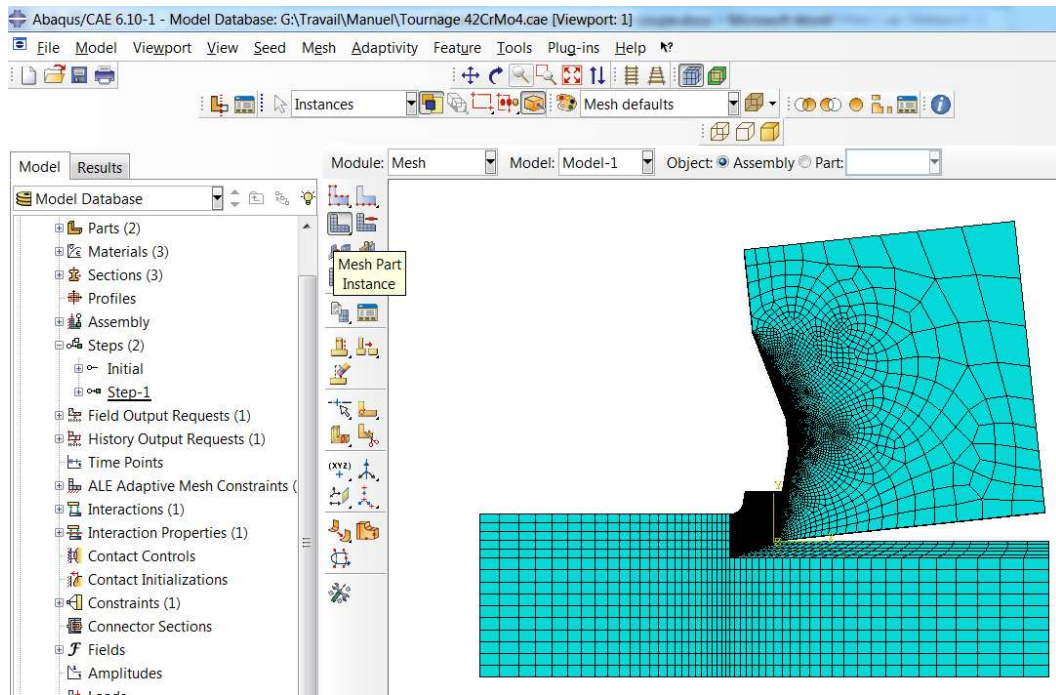


Figure 40 – Maillage des entités

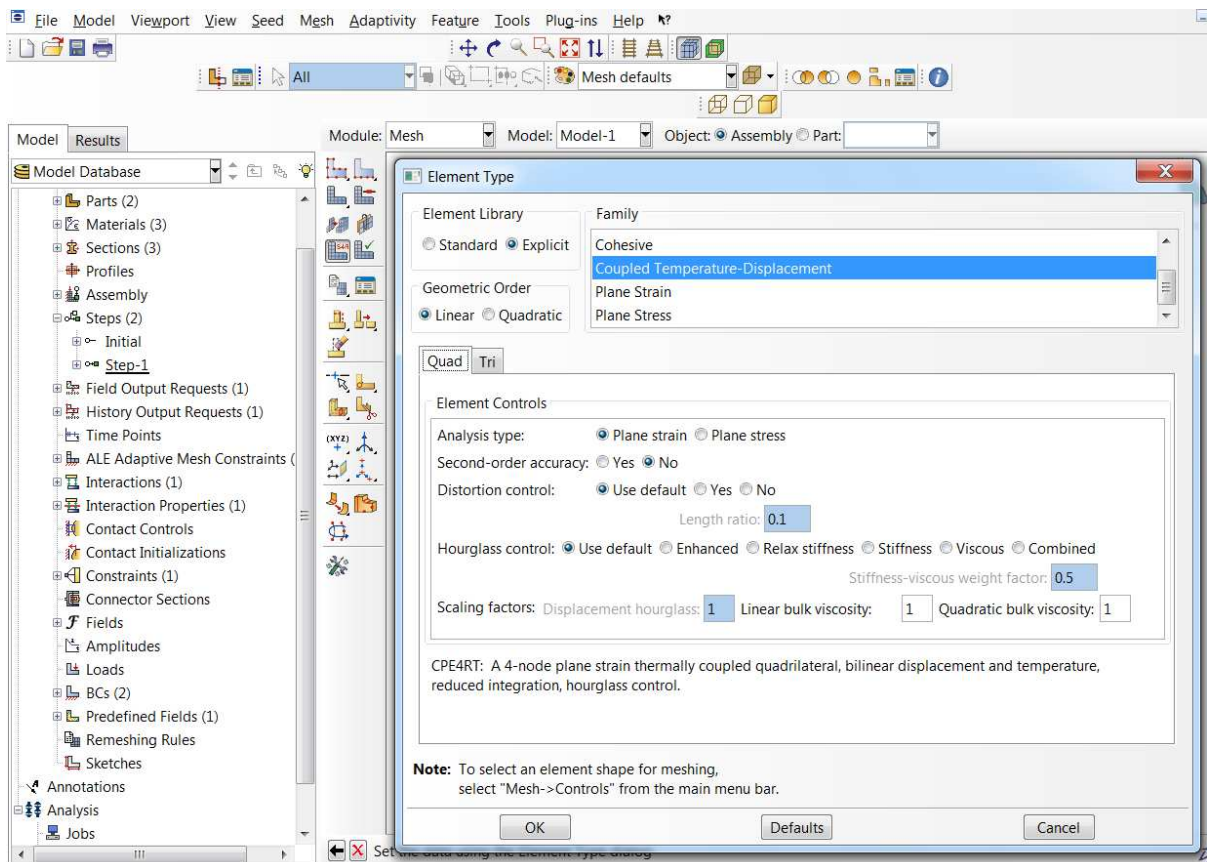


Figure 41 - Type des éléments

# 1.10 Calcul

Pour créer la tâche de calcul il faut passer dans le module « Job » au niveau de la fonction « Job Manager » et cliquer sur le bouton « Create » (Figure 42).

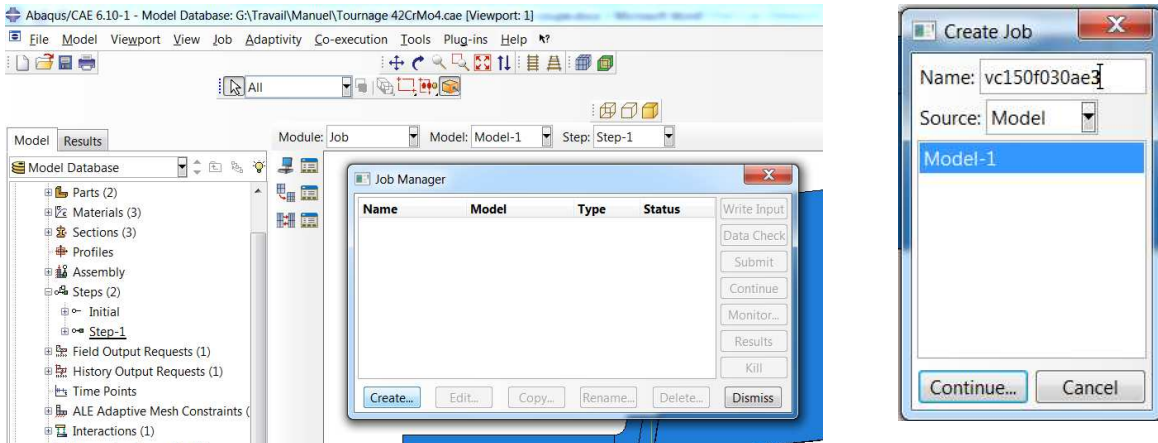


Figure 42 - Tâche de calcul

Puis il faut générer le fichier de calcul en format .inp en cliquant sur le bouton « Write Input » (Figure 43).

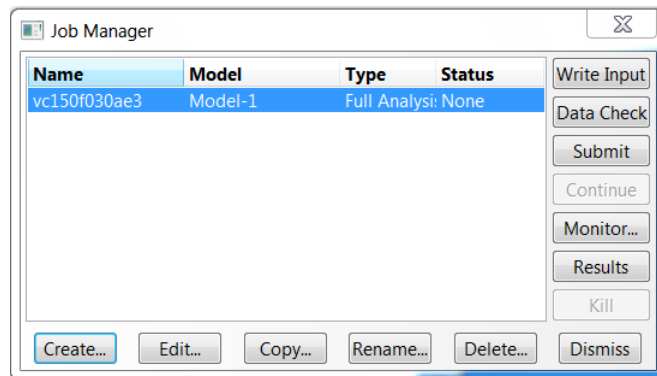


Figure 43 - Génération du fichier au format .inp

Il faut ouvrir le fichier en format .inp par le rédacteur de texte afin de déterminer la région Eulérienne dans les conditions limites du matériau à usiner. Pour cela après le code « region type=EULERIAN » il convient d'ajouter « \*Boundary, type=VELOCITY » (Figure 44).

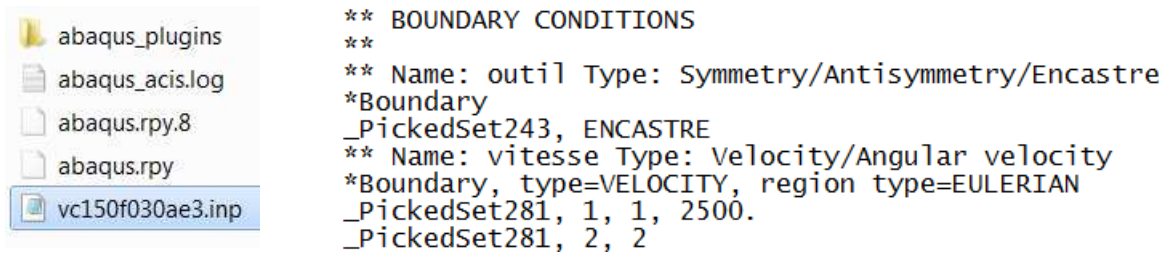


Figure 44 – Modification locale du code généré « region type=EULERIAN »

Pour créer la tâche de calcul avec le fichier corrigé il faut cliquer sur le bouton « Create », choisir la source « Input file ». À la fenêtre ultérieure on peut préciser les paramètres du calcul concernant les moyens à disposition (nombre de processeurs, etc...) (Figure 45).

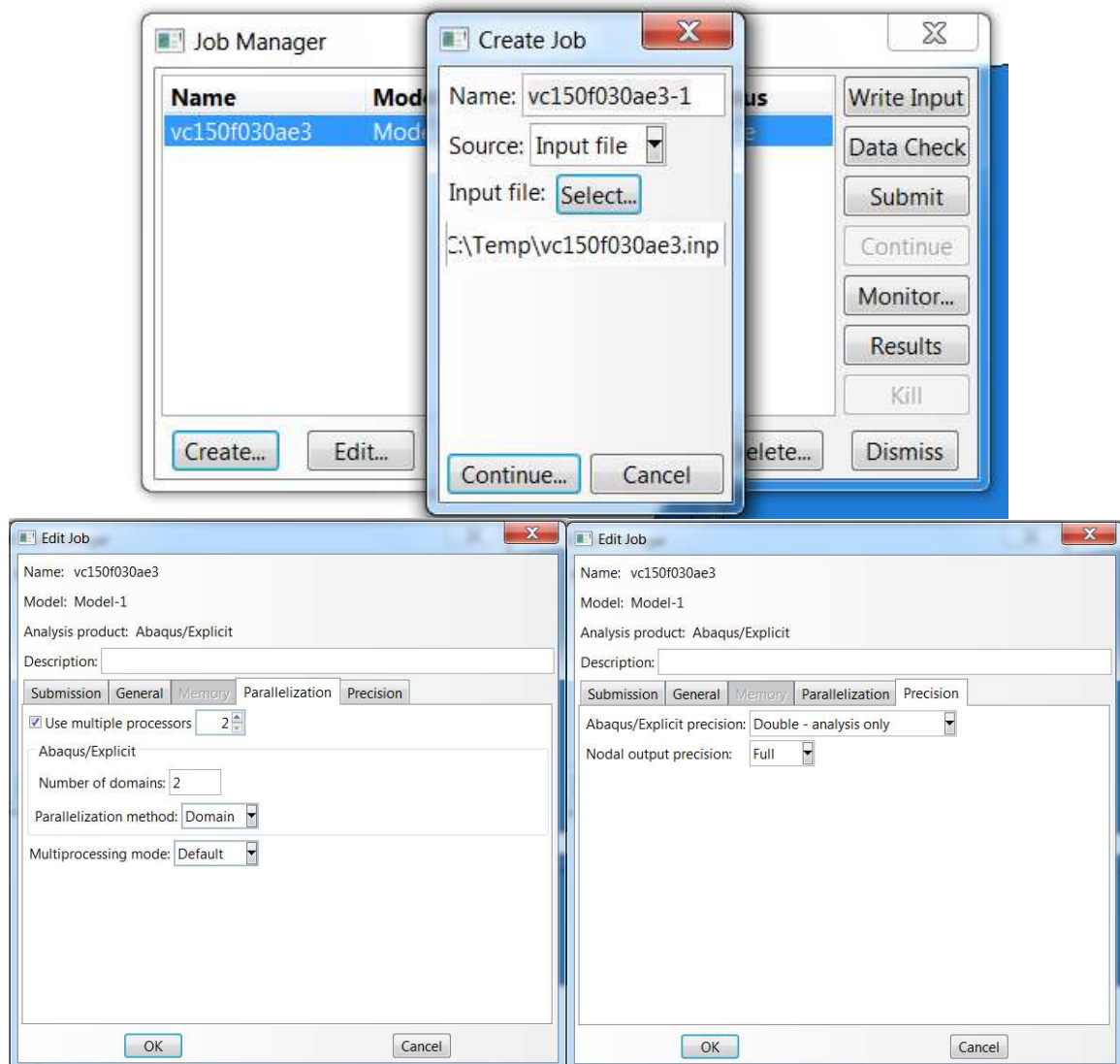
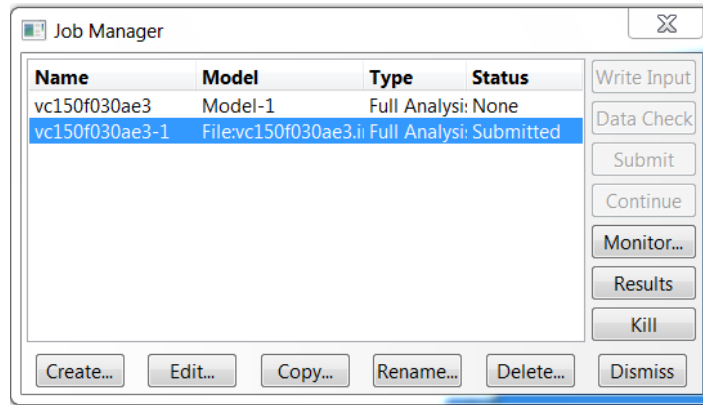


Figure 45 - Création de la tâche de calcul avec le fichier corrigé

Pour lancer le calcul il faut cliquer sur le bouton « Submit ». Les informations données au niveau des lignes de commentaires « Analysis Input File Processor completed successfully » et « Abaqus/Explicit Packager completes succefully » prouvent que le calcul a lancé avec le succès (Figure 46).



```
The job "vc150f030ae3-1" has been created.
The job input file "vc150f030ae3-1.inp" has been submitted for analysis.
Job vc150f030ae3-1: Analysis Input File Processor completed successfully.
Job vc150f030ae3-1: Abaqus/Explicit Packager completed successfully.
```

Figure 46 - Lancement du calcul

Sur la Figure 47 on présente les fichiers générés au cours du calcul. Le fichier avec l'extension « .odb » est le fichier contenant les résultats du calcul.

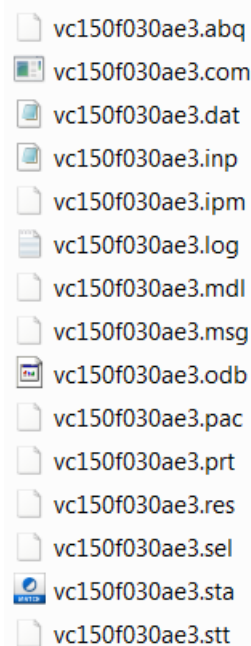


Figure 47 - Fichiers résultants du lancement du calcul

# 1.11 Code source pour le calcul du tournage de l'acier 42CrMo4 sur Abaqus Explicit 6.10

```

*Heading                **                [...]

** Job name: 1 Model name: *Instance,      name=outil-1,      1919, 1920, 1921, 1922,
Model-1                  part=outil                1923, 1924, 1925, 1926,
                                                                1927

**      Generated      by: *Node
Abaqus/CAE 6.9-2
                                                                1,      0.000362306164,
*Preprint,              echo=NO,      0.0456276163
model=NO,               history=NO,
contact=NO
                                                                2,      0.00531320134,
                                                                0.0449285917
**
                                                                [...]

** PARTS
                                                                1927,      0.330866009,
**
                                                                1.13787663
                                                                1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,
*Part, name=outil      *Element, type=CPE4RT      8, 9, 11, 12, 13, 14, 15,
                                                                16, 17
                                                                18, 19, 20, 21, 22, 23,
*End Part              1, 1, 2, 16, 103          24, 25, 26, 27, 28, 29,
                                                                30, 31, 32, 33
**
                                                                2, 103, 16, 17, 102
                                                                [...]

*Part, name=piece      [...]
                                                                325, 326, 327, 328, 329,
*End Part              1836, 210, 336, 15, 9    330, 331, 332, 333, 334,
                                                                335, 336
**
                                                                *Nset,      nset=_PickedSet8,
                                                                internal
**
                                                                *Elset,      elset=_PickedSet9,
                                                                internal
                                                                2, 3, 5, 6, 7, 8,
** ASSEMBLY           9, 10, 16, 17, 18, 19,
                                                                1, 2, 3, 4, 5, 6,
                                                                7, 8, 9, 10, 11, 12,
**
                                                                13, 14, 15, 16
                                                                24, 25, 26, 27, 28,
*Assembly, name=Assembly 29, 30, 31, 32, 33, 34,
                                                                35, 36, 37, 38, 39

```



PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

```

17, 18, 19, 20, 21,      1, 1, 17, 662, 90      *Elset, elset=_PickedSet239,
22, 23, 24, 25, 26, 27,      2, 17, 18, 663, 662    internal, instance=piece-1,
28, 29, 30, 31, 32                                     generate

[...]                                     625, 1625, 1

1824, 1825, 1826, 1827,      2375, 2599, 661, 7, 153  *Nset, nset=_PickedSet243,
1828, 1829, 1830, 1831,      *Nset, nset=_PickedSet6,  internal, instance=outil-1,
1832, 1833, 1834, 1835,      internal, generate       generate
1836                                     1, 1927, 1

** Section: TiAIN                                     *Elset, elset=_PickedSet243,
*Solid          Section,      *Elset, elset=_PickedSet6,  internal, instance=outil-1,
elset=_PickedSet9,          internal, generate       generate
material=TiAIN              1, 2375, 1
,                                     1, 1836, 1

** Section: WCCo                                     *Nset, nset=_PickedSet255,
*Solid          Section,      internal, instance=piece-1
elset=_PickedSet8,          *Nset, nset=_PickedSet6,   1, 5, 7, 8, 91, 92,
material=WCCo               material=A42CD4            93, 94, 95, 96, 97, 98,
,                                     ,                            99, 100, 101, 102

,                                     *End Instance              103, 104, 105, 106, 107,
*End Instance               **                            108, 109, 110, 111, 112,
**                            113, 114, 150, 151, 152,
*Nset, nset=_PickedSet239,  153
internal, instance=piece-1  [...]
*Instance, name=piece-1,
part=piece                  1, 4, 5, 7, 8, 9,      1296, 1297, 1298, 1299,
*Node                        10, 11, 12, 13, 14, 65, 1300, 1301, 1302, 1303,
                                66, 67, 68, 69         1304, 1305, 1306, 1307

1, -0.504090726, -          70, 71, 72, 73, 74,   *Elset, elset=_PickedSet255,
0.196632087                75, 76, 77, 78, 79, 80,  internal, instance=piece-1,
2, -0.504090726, -          81, 82, 83, 84, 85    generate
1.49999118

[...]                                     625, 749, 1

2599, -0.501547158,        1991, 1992, 1993, 1994,  *Nset, nset=_PickedSet256,
0.201726124                1995, 1996, 1997, 1998,  internal, instance=piece-1
*Element, type=CPE4RT        1999, 2000, 2001, 2002,
                                2003

```

1, 5, 7, 8, 91, 92,  
93, 94, 95, 96, 97, 98,  
99, 100, 101, 102

103, 104, 105, 106, 107,  
108, 109, 110, 111, 112,  
113, 114, 150, 151, 152,  
153

[...]

1296, 1297, 1298, 1299,  
1300, 1301, 1302, 1303,  
1304, 1305, 1306, 1307

\*Elset, elset=\_PickedSet256,  
internal, instance=piece-1,  
generate

625, 749, 1

\*Nset, nset=\_PickedSet258,  
internal, instance=piece-1

3, 4, 5, 6, 8, 11, 54,  
55, 56, 57, 58, 59, 60,  
61, 62, 63

64, 115, 116, 117, 118,  
119, 120, 121, 122, 123,  
124, 125, 178, 179, 180, 181

334, 335, 336, 337

\*Elset, elset=\_PickedSet258,  
internal, instance=piece-1

313, 314, 315, 316, 317,  
318, 319, 320, 321, 322,  
323, 324, 613, 614, 615, 616

617, 618, 619, 620, 621,  
622, 623, 624, 745, 746,  
747, 748, 749, 925, 926, 927

928, 929

\*Nset, nset=\_PickedSet279,  
internal, instance=piece-1,  
generate

1, 2599, 1

\*Elset, elset=\_PickedSet279,  
internal, instance=piece-1,  
generate

1, 2375, 1

\*Nset, nset=\_PickedSet280,  
internal, instance=piece-1

2, 3, 6, 28, 29, 30, 31,  
32, 33, 34, 35, 36, 37,  
38, 39, 40

41, 42, 43, 44, 45, 46,  
47, 48, 49, 50, 51, 52,  
53, 126, 127, 128

129, 130, 131, 132, 133,  
134, 135, 136, 137, 138,  
139, 140, 141, 142, 143, 144

145, 146, 147, 148, 149

\*Elset, elset=\_PickedSet280,  
internal, instance=piece-1

12, 24, 36, 48, 60, 72,  
84, 96, 108, 120, 132, 144,  
156, 168, 180, 192

204, 216, 228, 240, 252,  
264, 276, 288, 300, 312,  
324, 325, 337, 349, 361, 373

385, 397, 409, 421, 433,  
445, 457, 469, 481, 493,  
505, 517, 529, 541, 553, 565

577, 589, 601, 613

\*Nset, nset=\_PickedSet281,  
internal, instance=piece-1

2, 3, 4, 5, 6, 8, 11,  
28, 29, 30, 31, 32, 33,  
34, 35, 36

37, 38, 39, 40, 41, 42,  
43, 44, 45, 46, 47, 48,  
49, 50, 51, 52

[...]

135, 136, 137, 138, 139,  
140, 141, 142, 143, 144,  
145, 146, 147, 148, 149, 178

179, 180, 181, 334, 335,  
336, 337

\*Elset, elset=\_PickedSet281,  
internal, instance=piece-1

12, 24, 36, 48, 60, 72,  
84, 96, 108, 120, 132, 144,  
156, 168, 180, 192

204, 216, 228, 240, 252,  
264, 276, 288, 300, 312,  
313, 314, 315, 316, 317, 318

[...]

615, 616, 617, 618, 619,  
620, 621, 622, 623, 624,  
745, 746, 747, 748, 749, 925

926, 927, 928, 929

\*Nset, nset=\_PickedSet300,  
internal, instance=piece-1

13,

\*Nset, nset=\_PickedSet301,  
internal, instance=outil-1,  
generate

1, 1927, 1	*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf244, internal	*Coupling, constraint name=Constraint-1, ref node=_PickedSet300, surface=_PickedSurf299
*Nset, nset=_PickedSet301, internal, instance=piece-1, generate	__PickedSurf244_S2, S2	
1, 2599, 1	__PickedSurf244_S4, S4	*Kinematic
*Elset, elset=_PickedSet301, internal, instance=outil-1, generate	*Elset, elset=__PickedSurf282_S2, internal, instance=piece-1, generate	*End Assembly
1, 1836, 1	929, 1029, 4	**
*Elset, elset=_PickedSet301, internal, instance=piece-1, generate	*Elset, elset=__PickedSurf282_S4, internal, instance=piece-1, generate	** MATERIALS
1, 2375, 1	1030, 1622, 4	**
*Elset, elset=__PickedSurf244_S2, internal, instance=outil-1, generate	*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf282, internal	*Material, name=A42CD4
1812, 1836, 1	__PickedSurf282_S2, S2	*Conductivity
*Elset, elset=__PickedSurf244_S4, internal, instance=outil-1	__PickedSurf282_S4, S4	45.1, 20.
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16	*Elset, elset=__PickedSurf299_S1, internal, instance=piece-1	45.1,100.
17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32	750, 1030, 1031, 1032, 1033, 1626, 1627, 1628, 1629, 1630	[...]
[...]	*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf299, internal	34.4,600.
1797, 1798, 1799, 1800, 1801, 1802, 1803, 1804, 1805, 1806, 1807, 1808, 1809, 1810, 1811	__PickedSurf299_S1, S1	*Density
	** Constraint: Constraint-1	7.85e-09,
		*Elastic
		212000., 0.28, 20.
		207000., 0.28, 100.
		[...]
		164000., 0.28, 600.
		*Expansion, zero=20.
		1.15e-05, 20.
		1.21e-05,100.
		[...]

PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

```

1.44e-05,600.          9.4e-06,          1., 0.35
*Inelastic Heat Fraction *Specific Heat          **
    0.9,              4.8e+08,          ** PREDEFINED FIELDS
*Plastic,             *Material, name=WCCo    **
hardening=JOHNSON
COOK                  *Conductivity          ** Name: Predefined Field-1
                    55.,                                Type: Temperature
598., 768., 0.292, 0.807, *Density                *Initial Conditions,
1550., 20.            *Density                type=TEMPERATURE
*Rate Dependent,      1.48e-08,            _PickedSet301, 20.
type=JOHNSON COOK
0.013,1000.          *Elastic                ** -----
                    560000., 0.23          -----
*Specific Heat          **
4.61e+08, 20.        *Expansion, zero=20.    **
4.79e+08,100.        4.5e-06,                ** STEP: Step-1
[...]                *Specific Heat          **
5.87e+08,600.        2.95e+08,              *Step, name=Step-1
*Material, name=TiAlN **                                *Dynamic Temperature-
*Conductivity          ** INTERACTION          displacement, Explicit
12.112, 20.           PROPERTIES              , 0.01
12.274, 40.           **                                *Bulk Viscosity
[...]                *Surface Interaction,    0.06, 1.2
24.1,1500.           name=general            **
*Density              *Friction                ** BOUNDARY
7.4e-09,             0.32,                    CONDITIONS
*Elastic              *Gap Conductance         **
600000., 0.2         100000., 0.              ** Name: outil Type:
                    0., 0.001          Symmetry/Antisymmetry/Enc
*Expansion, zero=20. *Gap Heat Generation    astre
                    ** Boundary

```

```

_PickedSet243, ENCASTRE      ** Name: base Type:      ** OUTPUT REQUESTS
                             Displacement/Rotation           **
** Name: vitesse Type:      *Adaptive Mesh Constraint
Velocity/Angular velocity
*Boundary, type=VELOCITY,    _PickedSet280, 2, 2     *Restart, write, number
region type=EULERIAN
                             ** Name: es Type:           **
                             Displacement/Rotation           **
                             *Adaptive Mesh Constraint
_PickedSet281, 1, 1, 4000.   ** FIELD OUTPUT: F-
                             **                               Output-1
_PickedSet281, 2, 2
*Adaptive Mesh Controls,    _PickedSet258, 1, 1     **
name=Ada-1, mesh
constraint angle=45.,
meshing
predictor=PREVIOUS
1., 0., 0.
** Interaction: general
*Adaptive Mesh,            *Contact Pair,
elset=_PickedSet279,
controls=Ada-1,
frequency=1, op=NEW
**
** INTERACTIONS
**
** HISTORY OUTPUT: H-
Output, field,
variable=PRESELECT
**
**
** ADAPTIVE MESH           *Output, history,
CONSTRAINTS               variable=PRESELECT
**
**                               *End Step
**

```

## 2 ANALYSE

---

## 2.1 Récupération des résultats du calcul

Pour visualiser les résultats du calcul il faut cliquer sur le bouton « Results » dans la fenêtre de « Job Manager » ou bien ouvrir le fichier avec l'extension « .odb » du calcul correspondant (Figure 48).

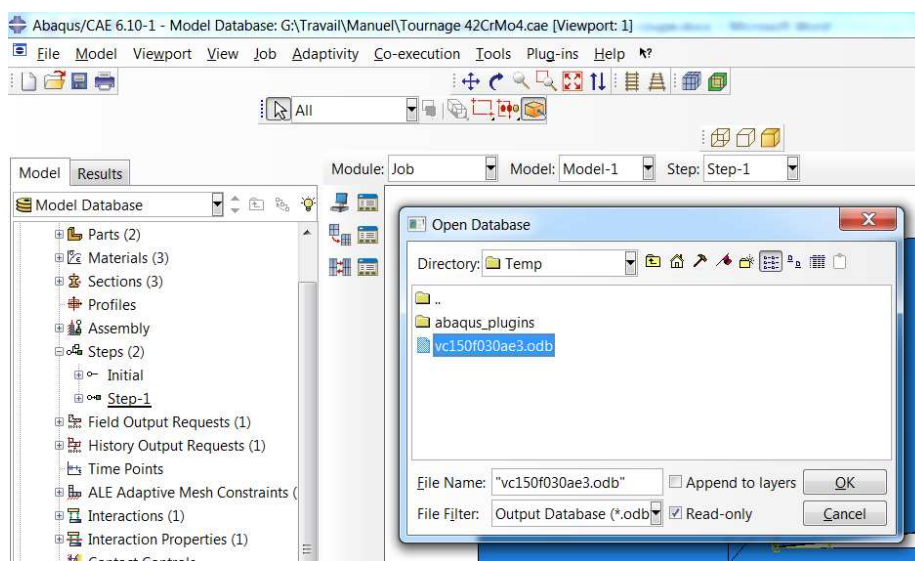


Figure 48 - Ouverture du fichier avec les résultats du calcul

Comme montré sur la Figure 49 les résultats du calcul peuvent être sélectionnés à partir de la liste des paramètres dans le module « Visualisation ».

Pour obtenir les valeurs des paramètres dans les nœuds du modèle calculé il convient premièrement de les visualiser. Pour cela la fonction « Show node labels » est prévue dans l'option « Common Plot Options » (Figure 50).

## PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

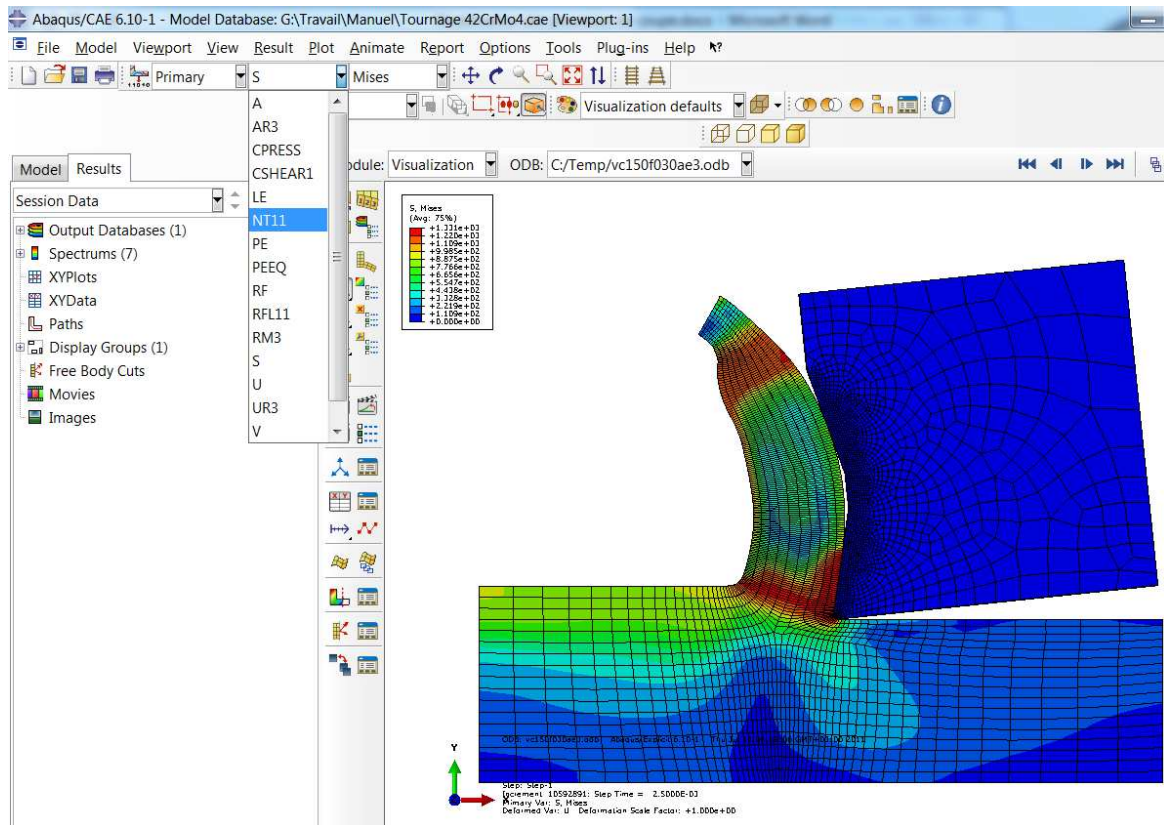


Figure 49 - Visualisation des résultats du calcul

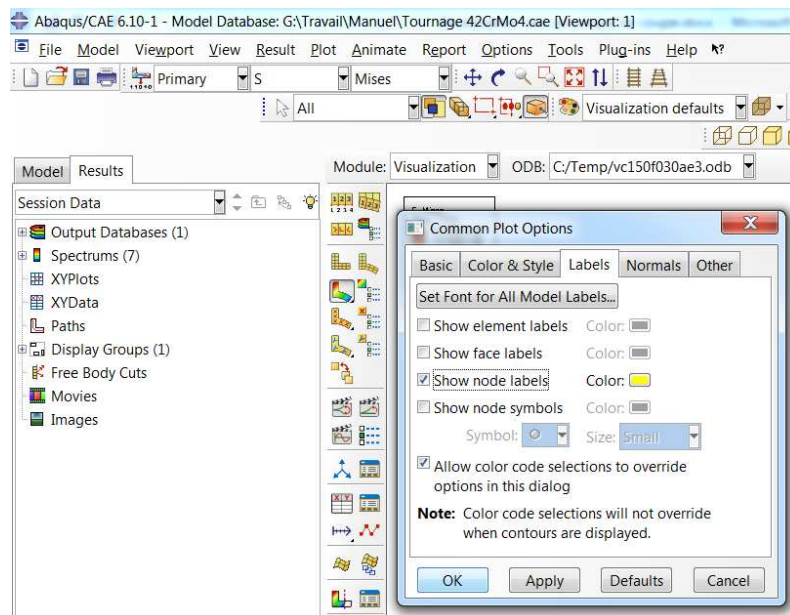


Figure 50 - Visualisation des nœuds du modèle

Puis la fonction « Create Path » de la fonction « Node list » est utilisée pour déterminer l'ensemble des nœuds considérés (Figure 51).



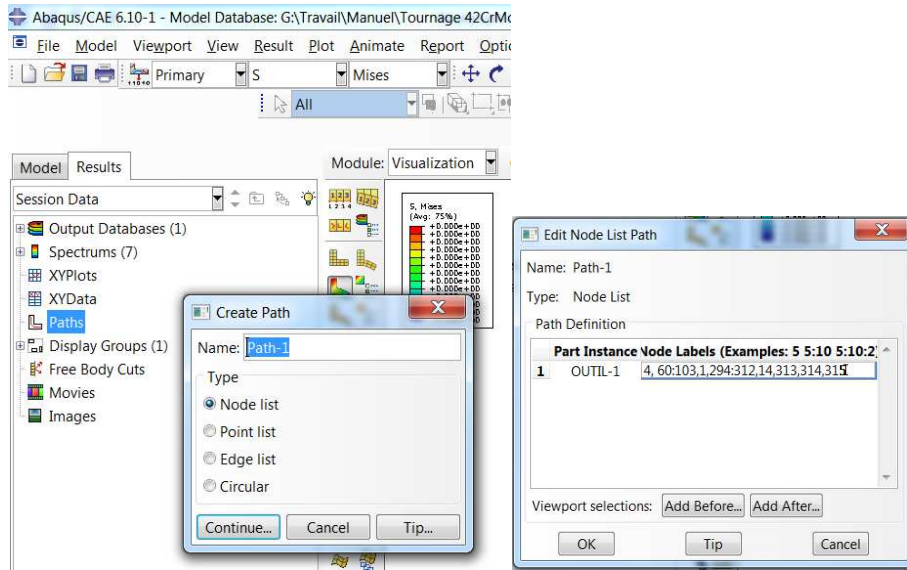


Figure 51 - Création de l'ensemble des nœuds

Ensuite les valeurs des nœuds peuvent être générées par « Create XY Data » (Figure 52) où le type des coordonnées, le temps du processus et le paramètre analysé sont à préciser (Figure 53).

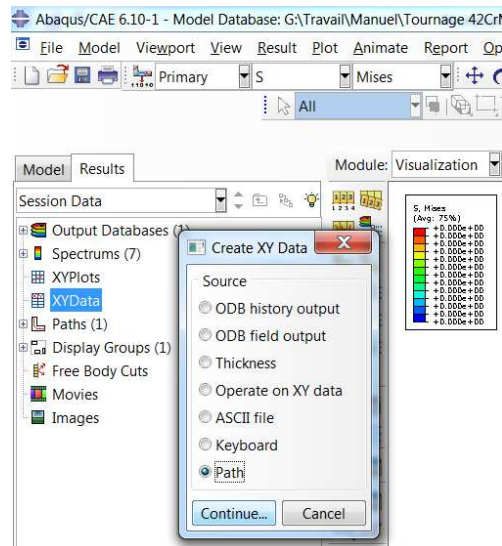


Figure 52 - Fonction « Create XY Data »

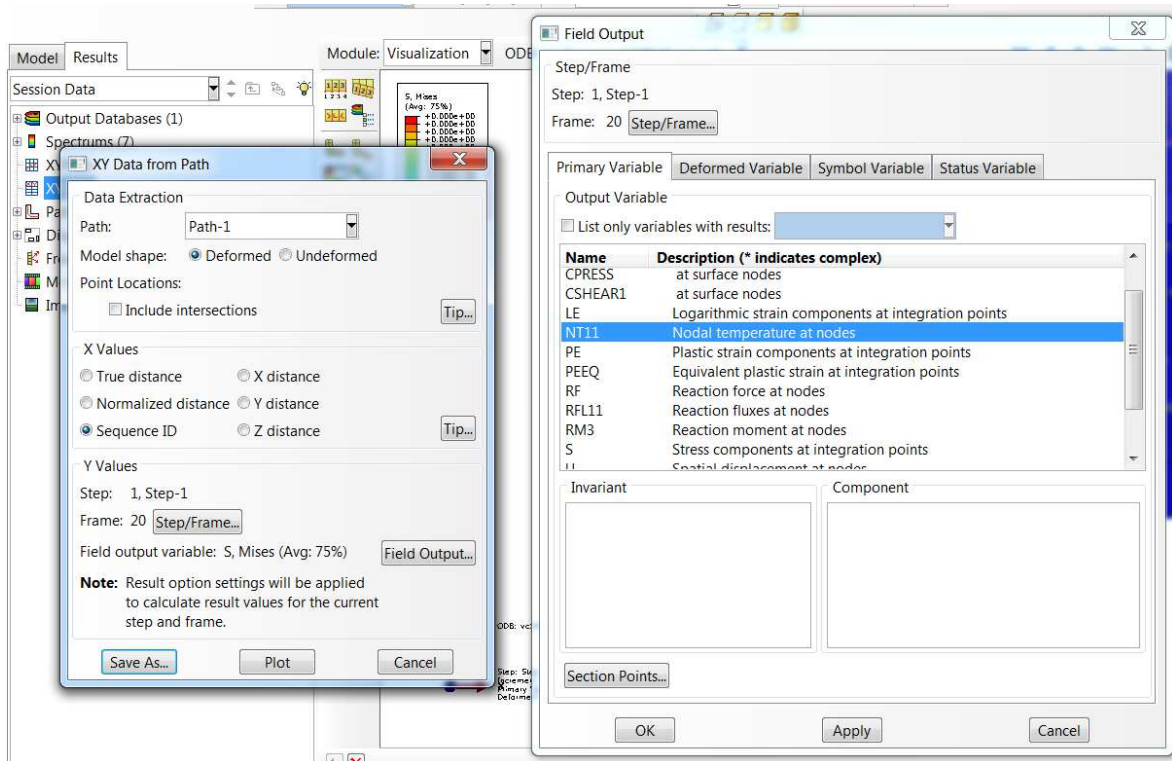


Figure 53 - Sélection des paramètres de la présentation des valeurs

Les valeurs peuvent être sauvegardées (Figure 54) et présentées sous forme de table (Figure 55) ou graphiquement (Figure 56).

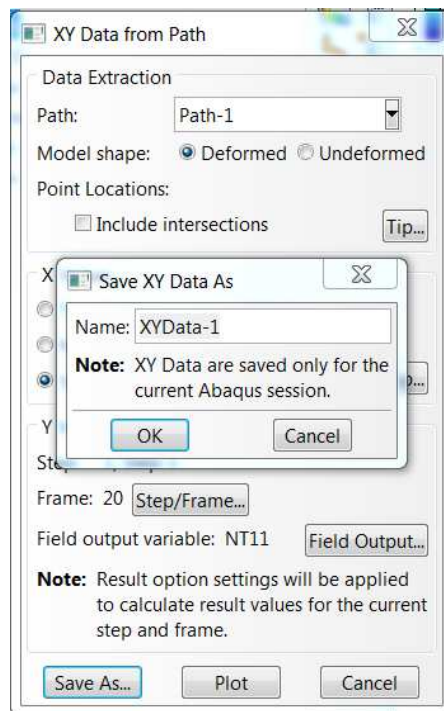


Figure 54 - Sauvegarde des valeurs

PRATIQUE DE LA MODÉLISATION DES PROCESSUS DE COUPE AVEC ASSISTANCE

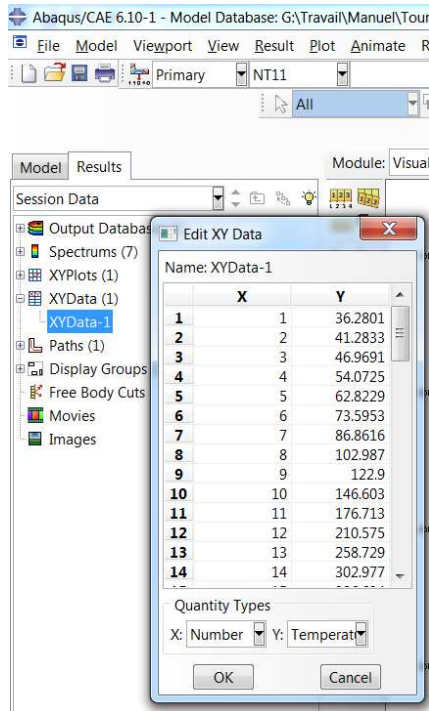


Figure 55 - Présentation des valeurs sous forme de table

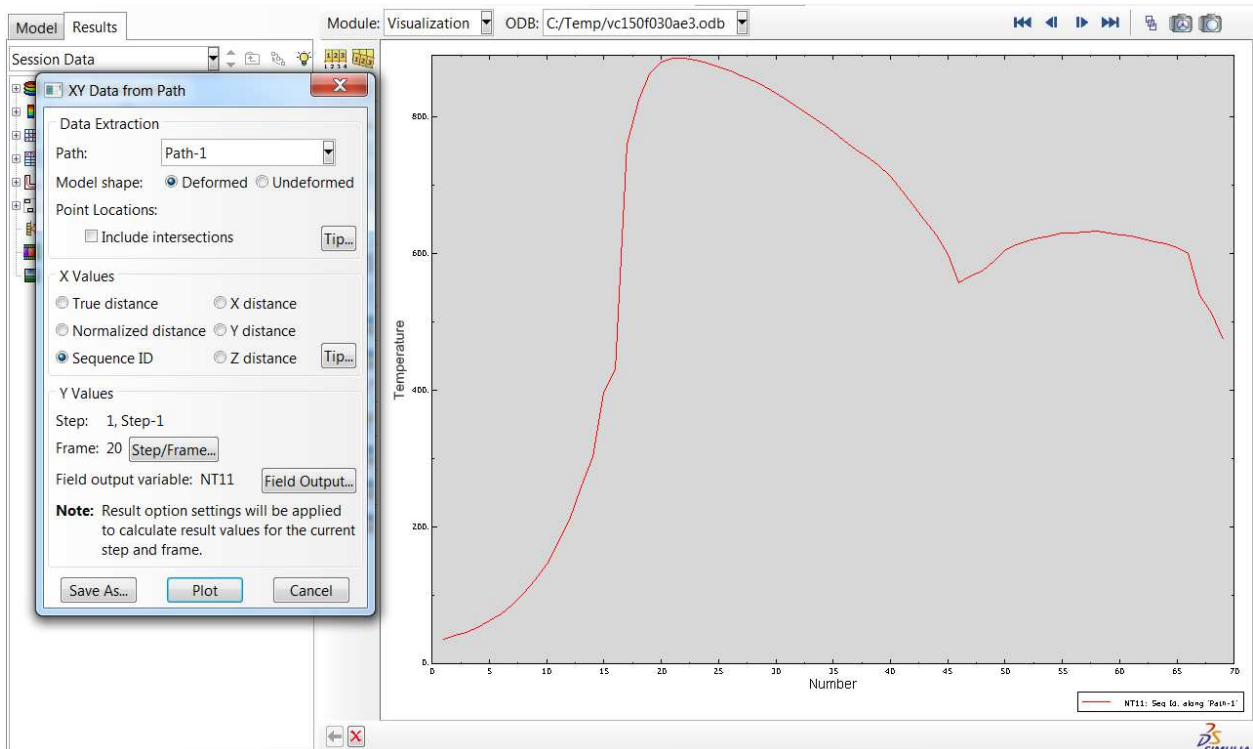


Figure 56 - Présentation des valeurs sous forme de graphique

## 2.2 Validation du modèle du processus de coupe

Les expérimentations servant de validation au présent modèle ont été effectuées sur le tour H.Ernault Somua 450 NCS lors du tournage des échantillons de l'acier 42CrMo4 ( $\varnothing 154$  mm, longueur 500 mm) par un outil à charioter équipé d'une plaquette de coupe ATI Stellram CNMG542A-4E SP0819 CNMI60608E-4E. Les composantes de l'effort de coupe ont été mesurés à l'aide de la platine de mesure Kistler 9257B avec des capteurs piézoélectriques. Le porte-outil Sandvik Coromant DCLNR3232P-16 assure l'inclinaison de la plaquette de coupe : angle de coupe  $\gamma = 9^\circ$ ; angle de dépouille  $\alpha = 6^\circ$ ; angle de direction  $\varphi = 50^\circ$ , angle de direction complémentaire  $\varphi_1 = 50^\circ$ , l'arrête de coupe est arrondie.

Lors des expérimentations :

- la vitesse de coupe a été choisie dans l'intervalle  $v = 100-200$  m/min avec une variation de 50 m/min ( $f = 0.3$  mm/tr et  $a_p = 3$  mm) ;
- l'avance a été choisie dans l'intervalle  $f = 0.1-0.3$  mm/tr avec un pas de variation de 0.2 mm/tr ( $v = 150$  m/min et  $a_p = 1$  mm) ;
- la largeur de coupe a été choisie dans l'intervalle  $a_p = 1-3$  mm avec un pas de variation de 2 mm ( $v = 150$  m/min et  $f = 0.1$  mm/tr).

Les résultats des expérimentations sont analysés par analyse statistique avec la détermination des intervalles de confiance.

Si la taille de l'échantillon est fixée à  $n = 5$  la valeur moyenne des efforts de coupe  $\bar{F}$  est donnée par :

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^5 F_i}{n},$$

où  $F_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  mesure de l'effort de coupe.

L'écart type de l'échantillon des valeurs des efforts de coupe  $s_F$  est donné par :

$$s_F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n-1}}$$

L'intervalle de confiance  $\delta_F$  des mesures si la probabilité de confiance  $\alpha = 0.95$  est donné par :

$$\delta_F = \pm 1,96 \cdot \frac{s_F}{\sqrt{n}}$$

L'effort de coupe équivalent  $F$  est donné par :

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2},$$

où  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  sont les efforts axial, radial et tangentiel respectivement.

L'erreur du modèle  $\Delta$  est donné par :

$$\Delta = \frac{|F - F_s|}{F} \cdot 100\%,$$

où  $F_s$  est effort de coupe équivalent obtenu en simulation.

La comparaison de l'influence de la vitesse de coupe  $v$ , de l'avance  $f$  et de la profondeur de coupe  $a_p$  sur les composantes de l'effort de coupe obtenues expérimentalement et en simulation sont présentées dans le Tableau 10.

Les températures de coupe obtenues en simulation se trouvent dans les limites de 7% d'erreur avec les mesures expérimentales des auteurs (Pujana, et al., 2007), (Arrazola, et al., 2008) réalisées à l'aide d'une caméra infrarouge thermographique qui garantit une erreur  $\pm 10^\circ\text{C}$ .

Tableau 10 - Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe obtenu expérimentalement et en simulation ( $f = 0.3 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 3 \text{ mm}$ )

Vitesse de coupe, m/min	Avance, mm/tr	Profondeur de coupe, mm	Numéro de mesure	Composants de l'effort de coupe						Effort de coupe équivalent					
				axial		radial		tangential		F	$\bar{F} \pm \delta, \text{ N}$	$F_s$	$\Delta, \%$		
				$F_x, \text{ N}$	$\bar{F}_x \pm \delta, \text{ N}$	$F_y, \text{ N}$	$\bar{F}_y \pm \delta, \text{ N}$	$F_z, \text{ N}$	$\bar{F}_z \pm \delta, \text{ N}$						
100	0.3	3	1	1064	1065 ± 3	406	429 ± 23	2250	2300 ± 26	2522	2571 ± 18	2539	1		
			2	1062		451		2295		2569			1		
			3	1071		460		2324		2600			2		
			4	1067		430		2320		2590			2		
			5	1062		400		2312		2575			1		
		150	0.3	3	1	947	948 ± 1	362	364 ± 2	2218	2255 ± 24	2462	2473 ± 16	2527	3
					2	949		365		2242		2439			4
					3	948		365		2256		2474			2
					4	948		362		2269		2486			2
					5	947		366		2289		2504			1
150	0.1	1	1	171	182 ± 6	127	132 ± 3	260	263 ± 8	336	346 ± 8	321	4		
			2	180		130		267		347			8		
			3	182		136		255		341			6		
			4	187		133		276		359			11		
			5	190		133		255		345			7		
	0.3	1	3	1	236	235 ± 1	226	225 ± 1	807	842 ± 24	871	902 ± 10	843	3	
				2	235		225		826		887			5	
				3	234		224		841		901			6	
				4	236		225		859		919			8	
				5	234		223		876		934			10	
150	0.1	1	1	171	182 ± 6	127	132 ± 3	260	263 ± 8	336	346 ± 8	321	5		
			2	180		130		267		347			8		
			3	182		136		255		341			6		
			4	187		133		276		359			11		
			5	190		133		255		345			7		
	0.3	3	1	1	485	499 ± 7	205	222 ± 9	773	873 ± 50	935	1031 ± 48	963	3	
				2	502		229		898		1054			9	
				3	503		228		916		1070			10	
				4	500		225		880		1037			7	
				5	505		224		900		1057			9	

## 2.3 Principes d'analyse des sollicitations de l'outil de coupe

### 2.3.1 Détermination des macro-, méso- et microzones de l'outil de coupe

Comme indiqué sur la , on peut distinguer 3 types de zones dans la formation du copeau :

- Macrozone  $C_{macro}$  est la zone de contact totale de l'outil de coupe avec le matériau à usiner.
- Mésozones  $C_{més0}$  sont les zones de contact de l'outil de coupe avec le copeau I, avec la zone de grandes transformations II, avec la zone de l'écrasement du matériau par la partie arrondie de l'arrête de coupe III, avec le matériau usiné IV.
- Microzones  $C_{micro}$  sont les zones constitutives des mésozones. La quantité de microzones est déterminée en fonction de la précision, du temps de la simulation et de la puissance de calcul de l'ordinateur.

La sollicitation résultante du niveau de la macrozone  $C_{macro}$  comprend l'ensemble des sollicitations des mésozones  $C_{més0}$ , qui comprend l'ensemble des sollicitations des microzones  $C_{micro}$  suivant le schéma défini par :

$$C_{macro} = \cup_{i=1}^4 C_{més0_i} (\cup_{i=1}^k C_{micro_i}).$$

La sollicitation thermomécanique  $C_i$  observée au sein de la  $i^{\text{ème}}$  mésozone s'écrit sous la forme suivante :

$$C_i = (\sigma_i, \tau_i, \theta_i),$$

où  $\sigma_i$  est la pression normale de contact en MPa,  $\tau_i$  est la composante tangentielle de contact en MPa et  $\theta_i$  est la température de contact en °C de la  $i$ -ème mésozone de l'outil de coupe.

Alors :

$$C = \{(\sigma_1, \tau_1, \theta_1); (\sigma_2, \tau_2, \theta_2); (\sigma_3, \tau_3, \theta_3); (\sigma_4, \tau_4, \theta_4)\}.$$

La dimension des macro-, meso-, microzones dépend de la géométrie de l'outil de coupe, du régime de coupe et du matériau à usiner. Un exemple plus illustratif est présenté sur la :

- 1) la macrozone peut être identifiée comme la zone totale de contact entre l'outil de coupe et la matériau à usiner ;
- 2) une certaine quantité de microzones a été déterminée en fonction de la précision, du temps du calcul et de la puissance de calcul de l'ordinateur et est égale à 40 dans le cas présenté;
- 3) la limite entre les mésozones II et III a été déterminée et correspond au point de séparation de matière suivant deux directions différentes ;
- 4) la mésozone I a été identifiée comme l'ensemble des microzones pour lesquelles la pression normale de contact ne dépasse pas 2% de la valeur maximale (elle se situe vers la sortie du copeau);
- 5) la mésozone II a été identifiée comme l'ensemble des microzones situées entre les mésozones I et III ;
- 6) la limite entre la mésozone III et IV a été déterminée comme étant séparées par une valeur limite de la pression de contact normale ou tangentielle par rapport aux maximales à 40% ;
- 7) les mésozones III et IV ont été identifiées comme l'ensemble des microzones de la limite de la mésozone II à la mésozone III et de la limite de la mésozone III à la mésozone IV respectivement.



Alors la sollicitation de macrozone  $C_{macro}$  s'écrit alors sous la forme suivante:

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_{40}\};$$

$$C = \{(\sigma_1, \tau_1, \theta_1); (\sigma_2, \tau_2, \theta_2); \dots, (\sigma_i, \tau_i, \theta_i), \dots, (\sigma_{40}, \tau_{40}, \theta_{40})\};$$

$$C = \{M[C_{1-a}], M[C_{a-b}], M[C_{b-c}], M[C_{d-40}]\};$$

$$C = \{M[\sigma_{1-a}, \tau_{1-a}, \theta_{1-a}], M[\sigma_{a-b}, \tau_{a-b}, \theta_{a-b}], M[\sigma_{b-c}, \tau_{b-c}, \theta_{b-c}], M[\sigma_{d-40}, \tau_{d-40}, \theta_{d-40}]\},$$

où  $M[C_{i-j}]$  est la valeur moyenne des paramètres de la sollicitation thermomécanique (pression normale, pression tangentielle, température de contact de la i-ème à la j-ème microzone, où i et j sont les numéros des microzones-limites des mesozones a, b, c, d).

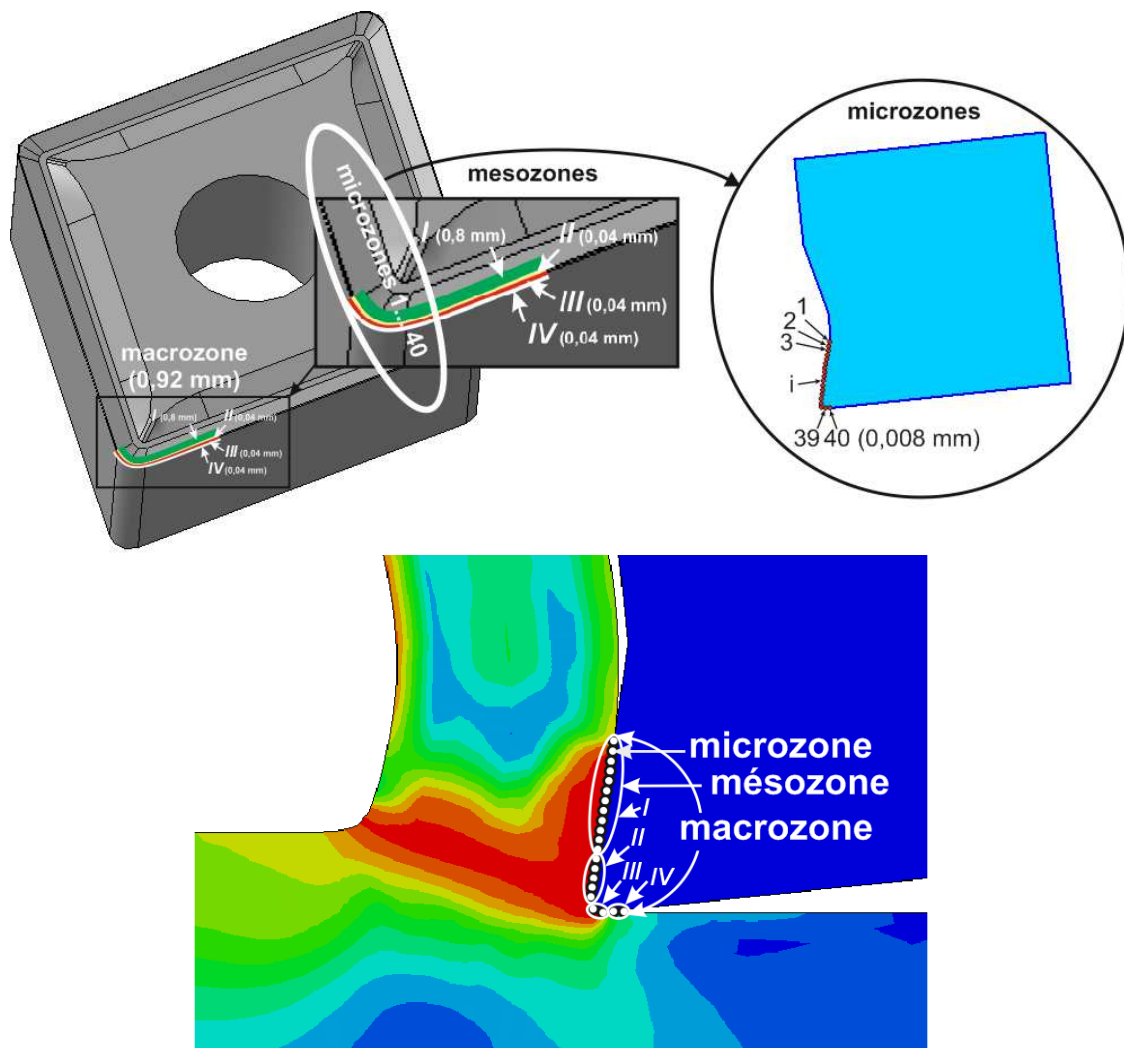


Figure 57 - Exemple de la disposition des macro-, meso- et microzones

## 2.3.2 Résultats des simulations du processus de coupe

Les résultats des simulations du processus de coupe de l'acier 42CrMo4, de l'alliage Ti6Al4V et de l'acier X2CrNiMo18-14-3 sont présentés dans les Tableau 11, Tableau 12 et Tableau 13.

Tableau 11 - Résultats des simulations du processus de coupe de l'acier 42CrMo4

Régime de coupe	Mésozones				Macrozone		
	No	$\sigma$ , MPa	$\tau$ , MPa	$\theta$ , °C	$\sigma$ , MPa	$\tau$ , MPa	$\theta$ , °C
v = 100 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	70	22	659	1721	25	595
	II	2393	10	570			
	III	1269	34	582			
	IV	3150	33	570			
v = 125 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	67	21	704	1770	20	623
	II	1822	11	590			
	III	2733	17	607			
	IV	2457	30	591			
v = 150 m/min, f = 0.1 mm/tr, ap = 1 mm	I	116	37	658	1363	55	540
	II	1398	60	557			
	III	2470	71	495			
	IV	1467	50	449			
v = 150 m/min, f = 0.1 mm/tr, ap = 3 mm	I	117	37	659	1359	57	541
	II	1401	58	559			
	III	2381	82	498			
	IV	1535	50	447			
v = 150 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 1 mm	I	71	23	762	1215	24	653
	II	2135	6	602			
	III	1726	21	630			
	IV	929	48	617			
v = 150 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	71	23	760	1267	29	652
	II	2376	12	601			
	III	1497	41	631			
	IV	1125	41	618			
v = 175 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	176	26	775	1380	32	668
	II	2108	13	623			
	III	709	23	643			
	IV	2526	67	630			
v = 200 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	72	23	813	1399	37	693
	II	2877	20	635			
	III	302	19	666			
	IV	2345	85	656			

Tableau 12 - Résultats des simulations du processus de coupe de l'alliage Ti6Al4V

Régime de coupe	Mésozones				Macrozone		
	No	$\sigma$ , MPa	$\tau$ , MPa	$\theta$ , °C	$\sigma$ , MPa	$\tau$ , MPa	$\theta$ , °C
v = 55 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	79	37	617	2956	32	681
	II	3789	11	767			
	III	5443	32	707			
	IV	2512	47	635			
v = 65 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	117	53	848	2225	42	861
	II	2776	8	884			
	III	1958	30	846			
	IV	4050	75	864			
v = 78 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	110	34	850	2118	33	887
	II	2913	17	916			
	III	2902	46	882			
	IV	2546	35	899			
v = 90 m/min, s = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	110	31	864	1889	28	902
	II	2229	12	931			
	III	2543	51	892			
	IV	2673	16	922			

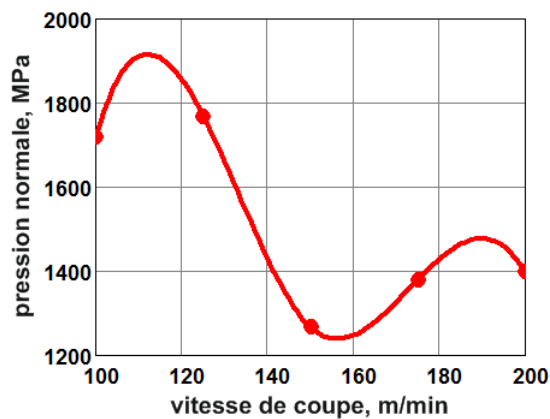
Tableau 13 - Résultats des simulations du processus de coupe

de l'acier X2CrNiMo18-14-3

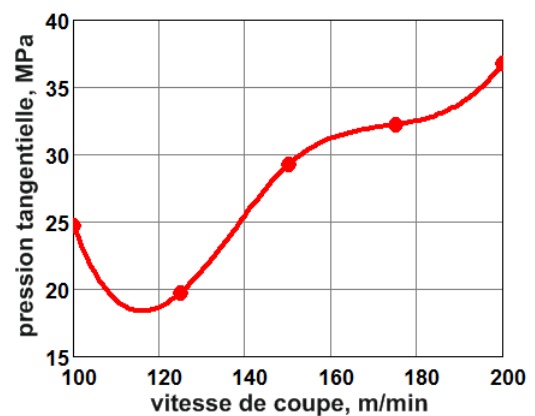
Régime de coupe	Mésozones				Macrozone		
	No	$\sigma$ , MPa	$\tau$ , MPa	$\theta$ , °C	$\sigma$ , MPa	$\tau$ , MPa	$\theta$ , °C
v = 145 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	70	28	786	1477	36	610
	II	1489	16	540			
	III	2208	76	554			
	IV	2139	25	560			
v = 185 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	117	30	827	1585	44	639
	II	1587	15	557			
	III	2485	9	589			
	IV	2152	122	584			
v = 225 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	70	29	898	1575	48	672
	II	2526	25	578			
	III	1162	87	609			
	IV	2371	52	605			
v = 265 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	70	28	899	1532	46	690
	II	2526	36	610			
	III	1162	28	630			
	IV	2371	92	622			
v = 305 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	I	74	30	950	1291	46	706
	II	2375	34	614			
	III	600	38	632			
	IV	2114	81	627			

### 2.3.3 Étude de l'influence de la vitesse de coupe sur la sollicitation thermomécanique de l'outil de coupe

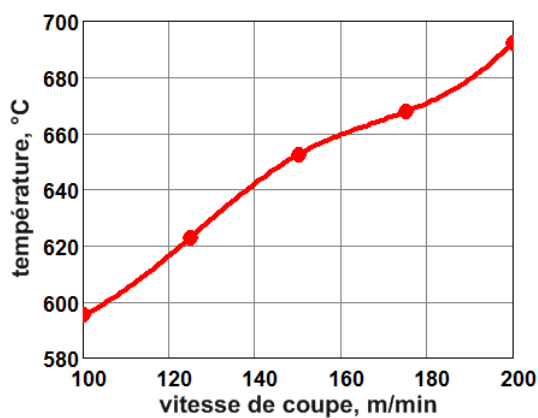
Les influences de la vitesse de coupe dans l'intervalle  $v = 100-200$  m/min avec une variation correspondant à un pas de 25 m/min ( $f = 0.3$  mm/tr et  $a_p = 3$  mm) sur la sollicitation thermomécanique de la macrozone et des mésozones de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier 42CrMo4 sont présentées sur la Figure 58 et la Figure 59 respectivement.



a)



b)



c)

Figure 58 - Influence de la vitesse de coupe sur la pression normale de contact (a), la pression tangentielle de contact (b), la température de contact (c) de la macrozone de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier 42CrMo4

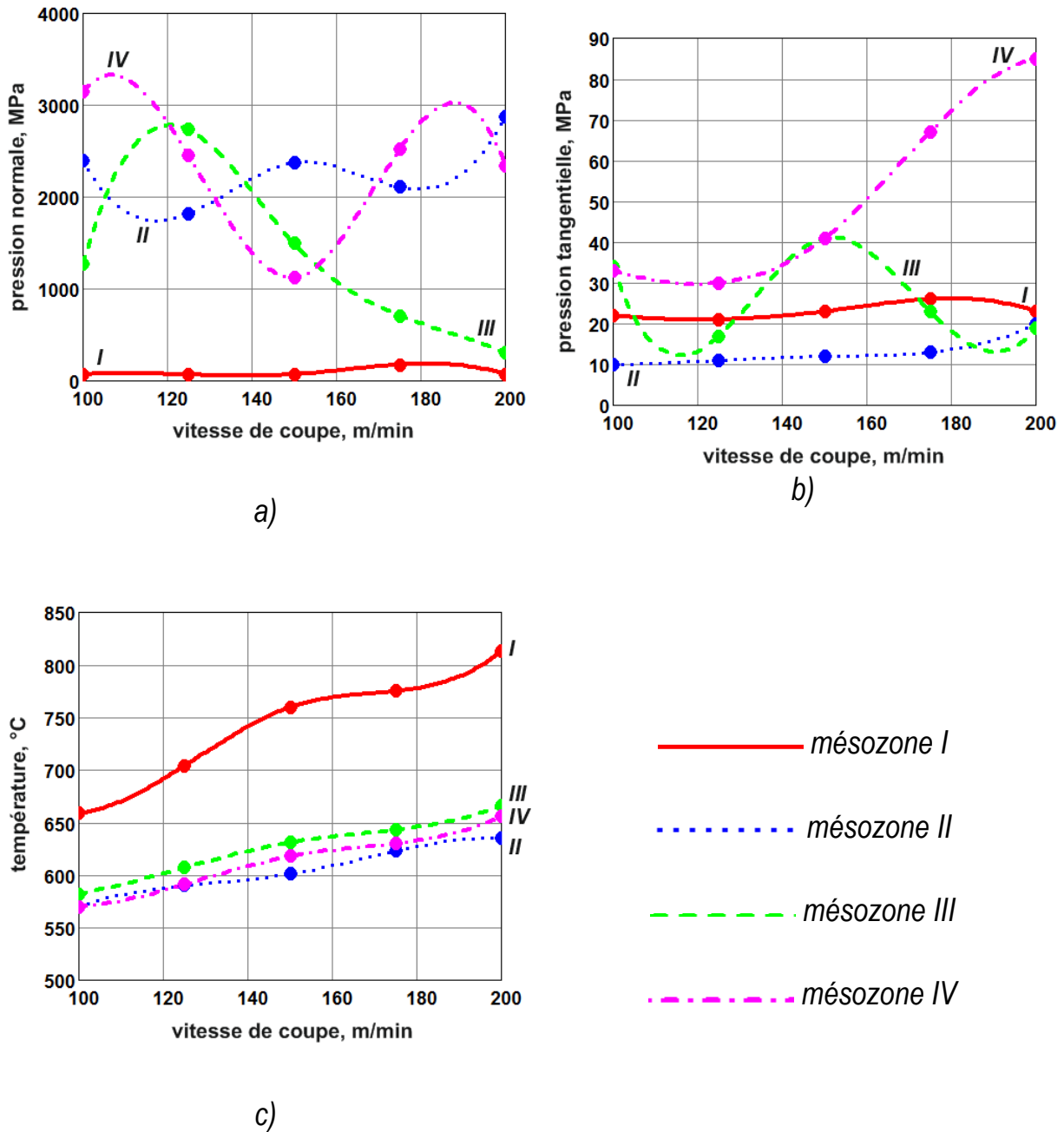


Figure 59 - Influence de la vitesse de coupe sur la pression normale de contact (a), la pression tangentielle de contact (b), la température de contact (c) des mésozones de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier 42CrMo4

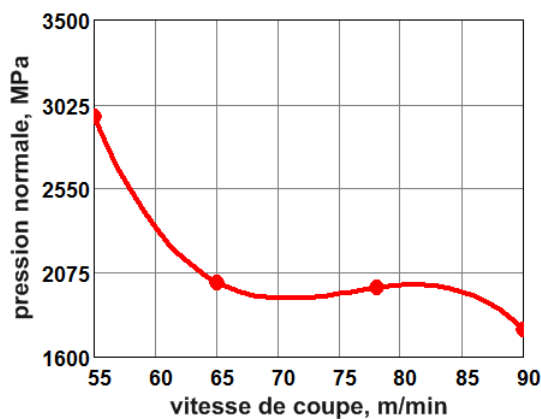
Aux intervalles des vitesses de coupe 100-125 m/min et 150-200 m/min l'écroissage du matériau provoque l'augmentation de la pression normale. Aux vitesses de coupe 125-150 m/min on observe une chute de la ductilité du matériau à usiner et, comme

conséquence, une diminution de la pression normale. Pour les aciers hypo-eutectoïdiques la température pour laquelle on observe une chute de la ductilité correspond au point critique du matériau  $A_{c3}$ .  $A_{c3}$  est la température de la transformation de toute la ferrite résiduelle en austénite au chauffage. Les dépendances obtenues permettent de déterminer la température correspondant à une chute maximale de la ductilité autour de  $767^{\circ}\text{C}$  pour une vitesse de coupe de  $150\text{ m/min}$  (mésozone I), qui est proche à la température  $A_{c3} = 790^{\circ}\text{C}$ . Aux vitesses de coupe entre  $100\text{-}125\text{ m/min}$  une diminution des pressions tangentielles est observée. Néanmoins, à l'approche du point de recristallisation, dans ce cas c'est le point  $A_{c1} = 745^{\circ}\text{C}$  (température de la transformation de la perlite en austénite au chauffage), la résistance à la déformation augmente et les pressions tangentielles augmentent aussi. Ce phénomène se passe pour une vitesse de coupe inférieure à  $125\text{ m/min}$ .

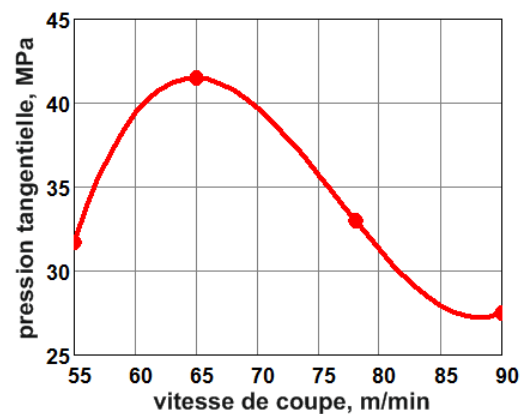
Lorsque la vitesse de coupe varie, les pressions normales et tangentielles au niveau des mésozones I et II ont un caractère relativement stable ce qui se traduit par la stabilité de la formation du copeau. Aux basses vitesses ( $v = 100\text{-}125\text{ m/min}$ ) les écrouissages en déformation sont dominants. Cela explique les hautes valeurs de pression normale au niveau des mésozones III et IV. Cependant les valeurs de pression tangentielle sont basses. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe ( $v = 125\text{-}175\text{ m/min}$ ) le comportement du matériau commence à s'adoucir et les pressions normales diminuent alors que les pressions tangentielles augmentent. Après avoir dépassé la zone  $A_{c1}\text{-}A_{c3}$  ( $v = 125\text{-}150\text{ m/min}$ ) la structure du matériau change, ce qui provoque le changement des pressions. Le matériau se radoucit au niveau de la mésozone III ( $v = 125\text{-}200\text{ m/min}$ ) : les pressions normales et tangentielles diminuent. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe la température augmente car le matériau a une conductibilité thermique assez haute, ce qui fait que le flux de chaleur principal est concentré sur la mésozone I qui est donc celle qui présente alors les plus hautes températures. Pour les autres mésozones, la répartition des températures est presque uniforme.

Ainsi lors du tournage de l'acier 42CrMo4 il convient alors de diminuer la pression normale de contact aux vitesses dans la gamme  $v = 100-150$  m/min et la pression tangentielle de contact aux vitesses dans la gamme  $v = 150-200$  m/min. Il est donc nécessaire de diminuer la pression normale de contact sur les mésozones II, III et IV, la pression tangentielle de contact sur les mésozones III et IV et la température de contact sur la mésozone I.

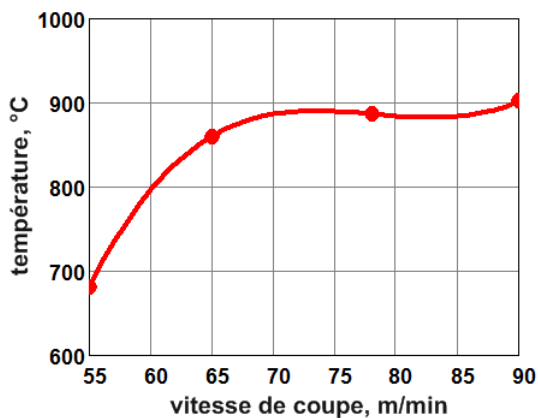
Les influences de la vitesse de coupe sur l'intervalle des vitesses  $v = 55-90$  m/min avec une variation du pas de 12 m/min ( $f = 0.3$  mm/tr et  $a_p = 3$  mm) sur la sollicitation thermomécanique de la macrozone et des mésozones de l'outil de coupe lors du tournage de l'alliage Ti6Al4V sont présentées sur la Figure 60, la Figure 58 et la Figure 61 respectivement.



a)



b)



c)

Figure 60 - Influence de la vitesse de coupe sur la pression normale de contact (a), la pression tangentielle de contact (b), la température de contact (c) de la macrozone de l'outil de coupe lors du tournage de l'alliage Ti6Al4V

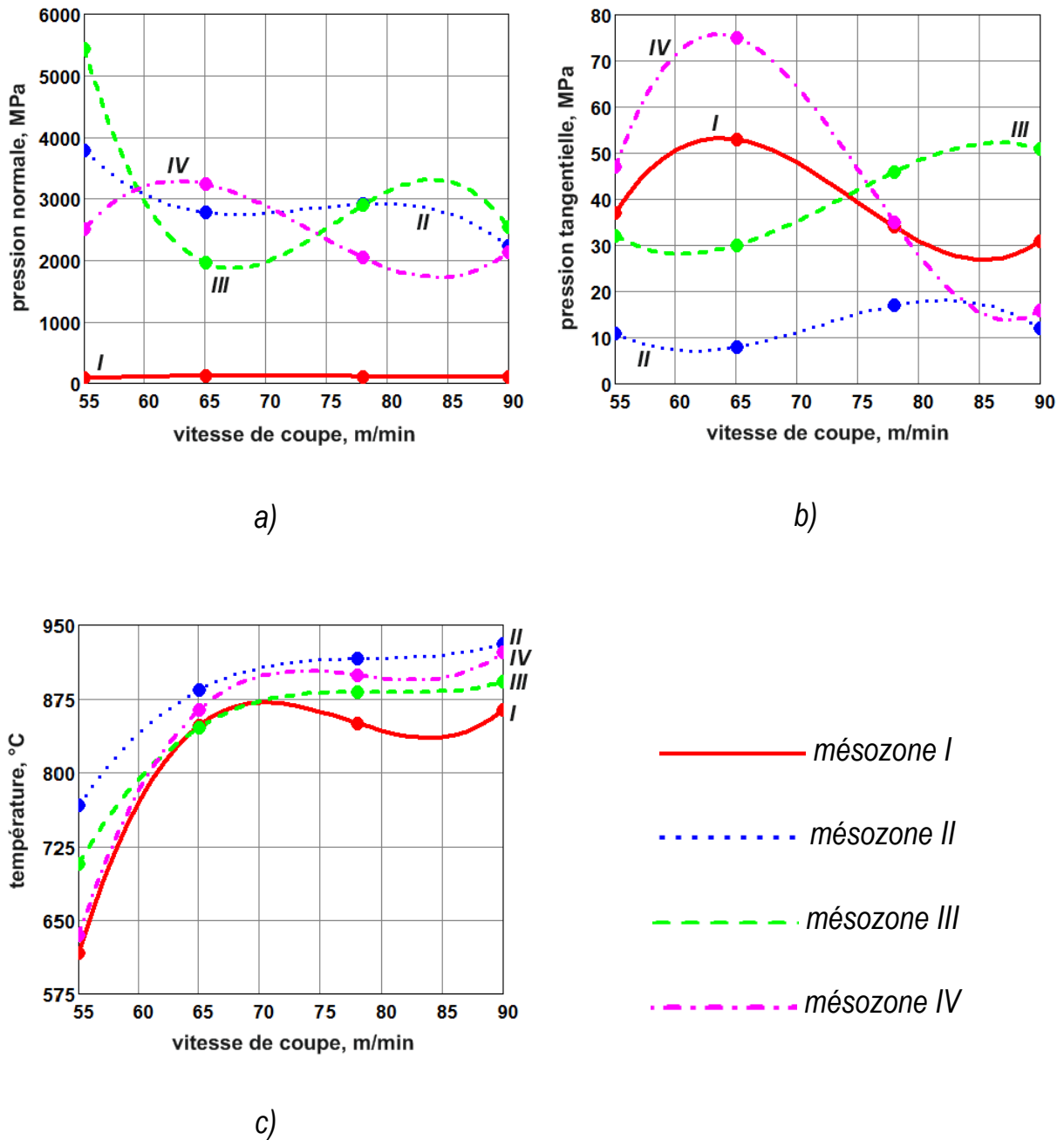


Figure 61 - Influence de la vitesse de coupe sur la pression normale de contact (a), la pression tangentielle de contact (b), la température de contact (c) des mésozones de l'outil de coupe lors du tournage de l'alliage Ti6Al4V

À la vitesse de coupe  $v = 90$  m/min une chute de la ductilité du matériau à usiner est constatée, avec comme conséquence la diminution de la pression normale de contact. Pour les alliages de titane le point de début de recristallisation  $\theta_{d.r.}$  correspond au point



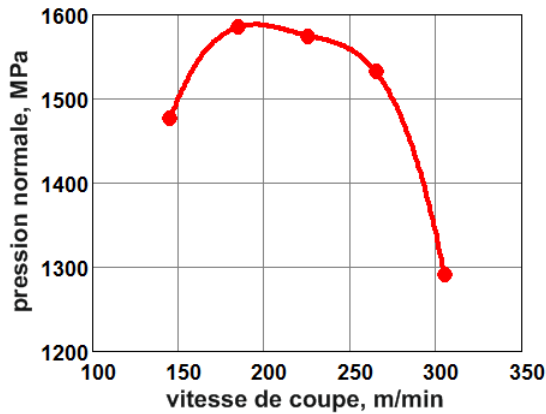
de plasticité maximale du matériau. Les dépendances obtenues permettent de déterminer la température de la chute de ductilité maximale :  $902^{\circ}\text{C}$ , correspondant à une vitesse de coupe  $v = 90$  m/min. Du fait que la proportion de la chaleur dégagée lors de la déformation plastique d'un matériau à basse conductibilité thermique soit augmentée, les pressions tangentielles de contact diminuent considérablement. Cet effet est observé sur l'intervalle de vitesses  $v = 65-90$  m/min. À cause de la résistance à la déformation sur l'intervalle  $v = 55-65$  m/min les pressions tangentielles augmentent.

En raison de la basse conductibilité thermique et de la haute ténacité de l'alliage Ti6Al4V la distribution des pressions normales présente un caractère similaire pour les 4 mésozones. La déformation plastique se transforme en écoulement visqueux. Pourtant, lorsque l'on s'approche du point de début de recristallisation ( $v = 65$  m/min) dans les mésozones II et III le ramollissement du matériau est observé ( $v = 55-65$  m/min) accompagné par la diminution de la pression normale. À son tour, ce processus provoque l'écroutissage dans la mésozone IV et, comme conséquence, l'augmentation de la pression normale de contact. Les phénomènes de l'écroutissage et du ramollissement ont le caractère cyclique de la distribution des pressions tangentielles. En cela l'augmentation de la pression tangentielle dans la mésozone III est accompagnée par sa diminution dans la mésozone joignante IV, et inversement. Des effets analogues sont observés dans les mésozones I et II. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe la température augmente, et à cause de la basse conductibilité thermique les températures maximales sont concentrées dans la mésozone II.

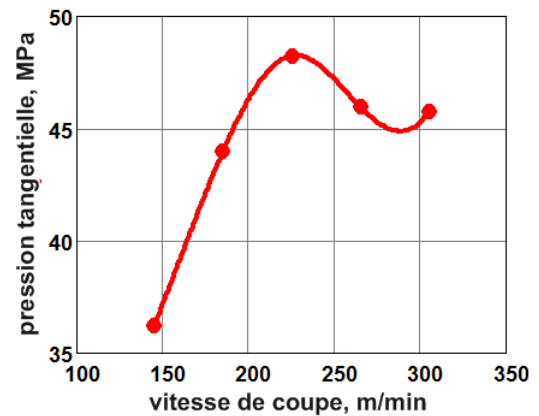
Ainsi, lors du tournage de l'alliage Ti6Al4V il faut diminuer la pression normale de contact sur l'intervalle  $v = 55-78$  m/min. Il est alors nécessaire de diminuer la pression normale de contact dans les mésozones II, III, IV, la pression tangentielle de contact dans les mésozones III, IV, et la température de contact dans les mésozones II et IV.

Les influences de la vitesse de coupe pour l'intervalle  $v = 145-305$  m/min avec le pas 40 m/min ( $f = 0.3$  mm/tr et  $a_p = 3$  mm) sur la sollicitation thermomécanique de la

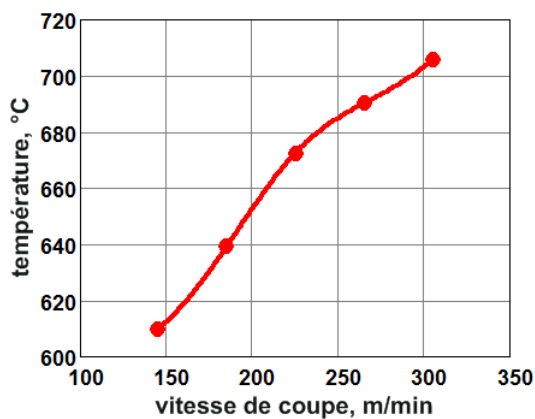
macrozone et des mésozones de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier X2CrNiMo18-14-3 sont présentées sur la Figure 62 et la Figure 63 respectivement.



a)



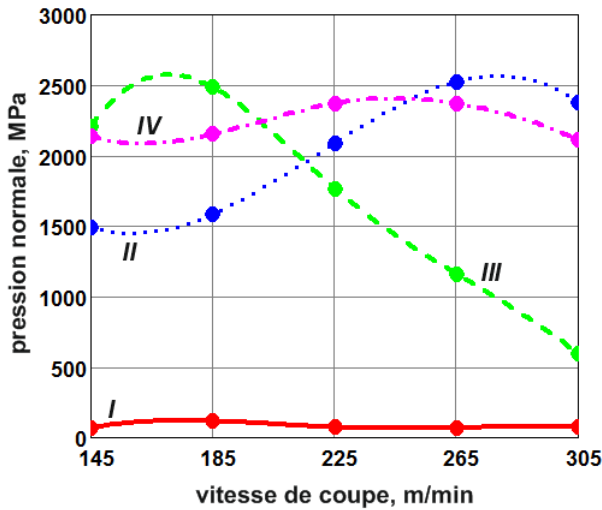
b)



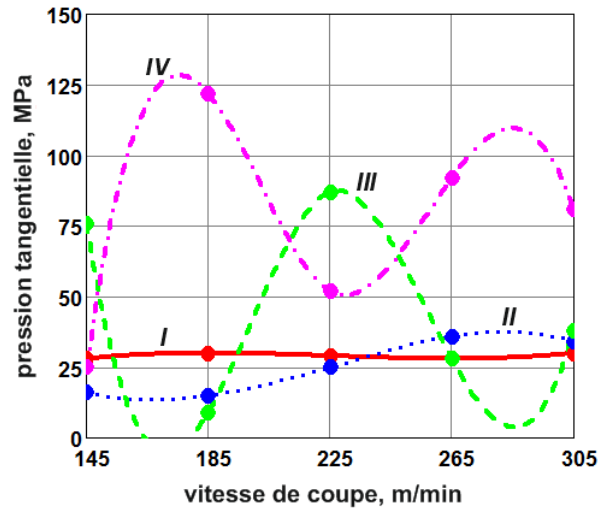
c)

*Figure 62 -Influence de la vitesse de coupe sur la pression normale de contact (a), la pression tangentielle de contact (b), la température de contact (c) de la macrozone de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier X2CrNiMo18-14-3*

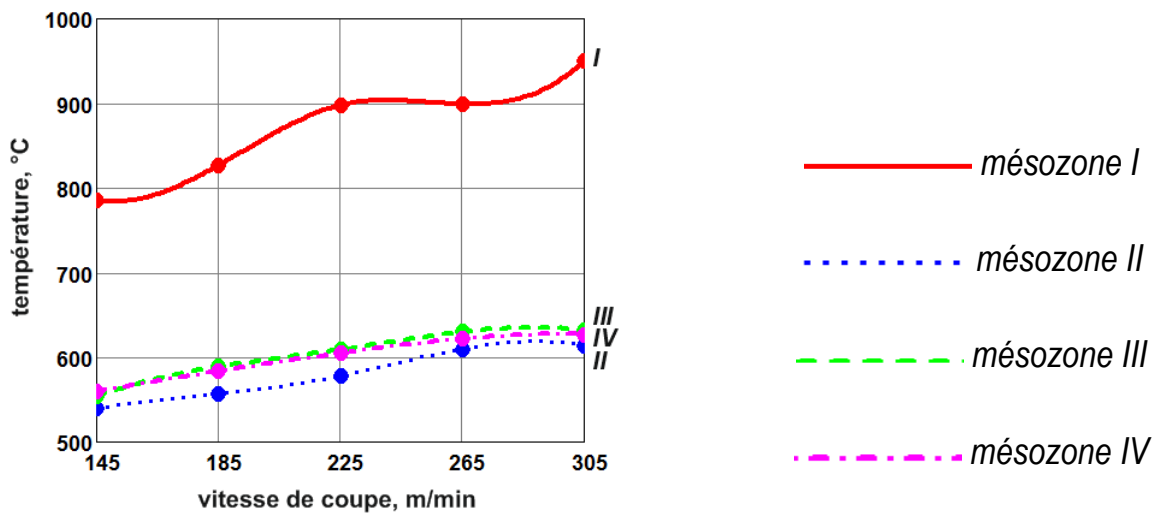
Pour le matériau à étudier et l'intervalle des vitesses de coupe proposé, à partir d'une température de coupe comprise entre 610°C et 685°C ( $v = 145-265$  m/min) le matériau du copeau est modifié (K-état) par la mise en place d'un processus de diffusion et la formation du composé  $Ni_3Cr$  accompagné par la diminution de la ductilité du matériau à usiner et, comme conséquence, par l'augmentation des pressions normales et tangentielles de contact.



a)



b)



c)

Figure 63 - Influence de la vitesse de coupe sur la pression normale de contact (a), la pression tangentielle de contact (b), la température de contact (c) des mésozones de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier X2CrNiMo18-14-3

À partir de la température de coupe 690°C ( $v = 265-305$  m/min) le composé K-état se détériore activement et entraîne l'augmentation de la ductilité du matériau à usiner et, par conséquent, la diminution des pressions normales et tangentielles de contact. Sur la

vitesse de coupe  $v = 145-225$  m/min l'écroissage du matériau est observé ce qui provoque l'augmentation des pressions normales et tangentielles.

Sur l'intervalle des vitesses de formation du composé K-état du matériau ( $v = 145-185$  m/min) l'écroissage du matériau dans la mésozone III est constaté, et ainsi la pression normale augmente et est accompagnée par la diminution des valeurs dans les mésozones II et IV. Lors de la détérioration du K-état la dépendance inverse est observée ( $v = 185-305$  m/min). Les aciers austénites se caractérisent par des oscillations lors du dégagement du copeau c'est pourquoi on observe une dépendance cyclique liée aux changements des pressions tangentielles. Lorsque les pressions tangentielles dans les mésozones II et III augmentent, elles diminuent dans les mésozones joignantes I et IV, et inversement. Avec l'augmentation de la vitesse la température augmente. Le flux de chaleur est essentiellement concentré dans la mésozone I qui présente les plus hautes températures. Dans les autres mésozones la distribution des températures est similaire.

Ainsi, lors du tournage de l'acier X2CrNiMo18-14-3 il faut diminuer la pression normale de contact sur l'intervalle  $v = 145-265$  m/min et la pression tangentielle de contact sur l'intervalle  $v = 165-305$  m/min. Il est nécessaire de diminuer la pression normale de contact dans les mésozones II, III, IV, la pression tangentielle de contact dans les mésozones III, IV, et la température de contact au niveau de la mésozone I.

### **2.3.4 Estimation de la durée de vie et de la sollicitation de l'outil de coupe**

L'équation de régression de la dépendance de la durée de vie  $T$  en fonction des sollicitations thermomécaniques (pression normale de contact  $\sigma$ , pression tangentielle de contact  $\tau$ , température de contact  $\theta$ ) de la mésozone IV (car la durée de vie critique est principalement liée à l'usure en dépouille) se traduit par la relation suivante :

$$T(\sigma, \tau, \theta) = e^{k+x \cdot \ln(\sigma)+y \cdot \ln(\tau)+z \cdot \ln(\theta)}$$

où  $k, x, y, z$  sont les coefficients de l'équation de régression.

Les valeurs des sollicitations thermomécaniques sont présentées dans le Tableau 14. Les valeurs des durées de vie de l'outil de coupe sont déterminées à partir de l'équation de régression de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance pour des conditions de coupe analogues à celles obtenues par méthode expérimentale dans l'ouvrage (Grolleau, 1996). La durée de vie a été estimée selon ISO 3685 «Essais de durée de vie des outils de tournage à partie active unique» où le critère usuel est la largeur moyenne de l'usure en dépouille  $VB_B = 0.3$  mm.

La dépendance de la durée de vie de l'outil de coupe en fonction des sollicitations thermomécaniques est présentée dans le Tableau 14.

Tableau 14 - Dépendance de la durée de vie de l'outil de coupe en fonction des sollicitations thermomécaniques lors du tournage de l'acier 42CrMo4

index	régimes de coupe	sollicitation thermomécanique de la mésozone IV			durée de vie T, min
		$\sigma$ , MPa	$\tau$ , MPa	$\theta$ , °C	
1	$v = 200$ m/min, $f = 0,3$ mm/tr, $ap = 3$ mm	2345	85	655	9
2	$v = 150$ m/min, $f = 0,3$ mm/tr, $ap = 3$ mm	1125	40	620	19
3	$v = 100$ m/min, $f = 0,3$ mm/tr, $ap = 3$ mm	3150	35	570	29
4	$v = 150$ m/min, $f = 0,1$ mm/tr, $ap = 3$ mm	1535	50	445	43

À la base des données présentées un système d'équations de régression a été élaboré :

$$\begin{cases} \ln(T_1) = k + x \cdot \ln(\sigma_1) + y \cdot \ln(\tau_1) + z \cdot \ln(\theta_1); \\ \ln(T_2) = k + x \cdot \ln(\sigma_2) + y \cdot \ln(\tau_2) + z \cdot \ln(\theta_2); \\ \ln(T_3) = k + x \cdot \ln(\sigma_3) + y \cdot \ln(\tau_3) + z \cdot \ln(\theta_3); \\ \ln(T_4) = k + x \cdot \ln(\sigma_4) + y \cdot \ln(\tau_4) + z \cdot \ln(\theta_4). \end{cases}$$

Ainsi  $k = 25,06$ ;  $x = 0,01$ ;  $y = -0,79$ ;  $z = -3$ . Alors la dépendance de la durée de vie de l'outil en fonction des sollicitations thermomécaniques se traduit de la manière suivante :

$$T(\sigma, \tau, \theta) = e^{25,06 + 0,01 \cdot \ln(\sigma) - 0,79 \cdot \ln(\tau) - 3 \cdot \ln(\theta)}$$

La comparaison de la durée de vie obtenue par l'expérimentation et en simulation est présentée dans Tableau 15.

Tableau 15 - Durée de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier 42CrMo4

régime de coupe	durée de vie T, min		erreur, %
	simulation	expérimentation	
v = 150 m/min, f = 0.1 mm/tr, ap = 3 mm	43	37	14
v = 150 m/min, f = 0.1 mm/tr, ap = 1 mm	41	35	15
v = 162 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	15	17 (Grolleau, 1996)	12
v = 190 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm	10	12 (Grolleau, 1996)	16

Pour estimer la sollicitation de l'outil de coupe au niveau des mésozones on introduit le coefficient de sollicitation B qui présente la valeur moyenne des rapports des différences entre les valeurs maximales et minimales des paramètres thermomécaniques de la sollicitation pour le facteur à étudier (par exemple, la vitesse de coupe)

$$B_i = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\max\{\sigma_{ij}\}_{j=1}^4}{\min(\sigma)} + \frac{\max\{\tau_{ij}\}_{j=1}^4}{\min(\tau)} + \frac{\max\{\theta_{ij}\}_{j=1}^4}{\min(\theta)} \right) - 1$$

$$B_i = \frac{\frac{\max(\sigma_{1i}, \sigma_{2i}, \sigma_{3i}, \sigma_{4i}) - \min(\sigma)}{\min(\sigma)} + \frac{\max(\tau_{1i}, \tau_{2i}, \tau_{3i}, \tau_{4i}) - \min(\tau)}{\min(\tau)} + \frac{\max(\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}) - \min(\theta)}{\min(\theta)}}{3}$$

où  $B_i$  est le coefficient de sollicitation pour  $i^{\text{ème}}$  facteur;  $\sigma_{ij}$   $\sigma_{1i}$  и  $\sigma_{2i}$ ,  $\tau_{ij}$   $\tau_{1i}$  и  $\tau_{2i}$ ,  $\theta_{ij}$   $\theta_{1i}$  и  $\theta_{2i}$  sont la pression normale de contact, la pression tangentielle de contact, et la température de contact respectivement de la  $j^{\text{ème}}$  mésozone ;  $\max\{\sigma_{ij}\}_{j=1}^4$ ,  $\max\{\tau_{ij}\}_{j=1}^4$ ,  $\max\{\theta_{ij}\}_{j=1}^4$  sont la valeur maximale de la pression normale de contact, de la pression tangentielle de contact, et de la température de contact respectivement pour le  $i^{\text{ème}}$  facteur;  $\min(\sigma)$ ,  $\min(\tau)$ ,  $\min(\theta)$  sont la valeur minimale de la pression normale de contact, de la pression tangentielle de contact, de la température de contact respectivement déterminée des valeurs maximales des paramètres correspondants pour les intervalles de facteur à étudier.

Ainsi,  $B = 0$  correspond à la sollicitation minimale de l'outil de coupe pour l'intervalle des facteurs à étudier. Les valeurs maximales de B correspondent à la sollicitation maximale.

Pour justifier l'utilisation du coefficient de sollicitation B il faut comparer l'usure des outils de coupe obtenue expérimentalement et le coefficient de sollicitation B calculé à la base des sollicitations thermomécaniques des mésozones des outils de coupe obtenues en simulation (Tableau 16).

Tableau 16 - Influence du coefficient de sollicitation B sur l'usure des mésozones de l'outil de coupe

régimes de coupe	mésozone	sollicitation thermomécanique			coefficient de sollicitation B	usure en face de coupe	usure en dépouille
		$\sigma$ , MPa	$\tau$ , MPa	$\theta$ , °C			
v = 100 m/min f = 0.3 mm/tr ap = 3 mm	I	70	20	660	0.2		
	II	2395	10	570			
	III	1270	35	580			
	IV	3150	35	570			
v = 150 m/min f = 0.3 mm/tr ap = 3 mm	I	70	25	760	0.21		
	II	2375	10	600			
	III	1495	40	630			
	IV	1125	40	620			
v = 200 m/min f = 0.3 mm/tr ap = 3 mm	I	70	25	815	0.81		
	II	2875	20	635			
	III	300	20	665			
	IV	2345	85	655			

Selon le tableau, l'usure minimale des outils de coupe est assurée aux valeurs minimales du coefficient de sollicitation B = 0.2 et B = 0.21 (aux régimes de coupe v = 100 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm et v = 150 m/min, f = 0.3 mm/tr, ap = 3 mm), et l'usure maximale à valeur maximale B = 0.81.

Les conditions critiques de la sollicitation provoquent l'évolution intensive de l'usure de l'outil de coupe. Ainsi sur la mésozone I l'usure en cratère augmente lors de l'augmentation de la température de contact.

L'usure minimale de la mésozone II a été observée au régime  $v = 150$  m/min,  $f = 0.3$  mm/tr,  $a_p = 3$  mm, et maximale pour  $v = 200$  m/min,  $f = 0.3$  mm/tr,  $a_p = 3$  mm. Cela est principalement lié avec l'augmentation de la pression normale de contact.

L'usure minimale de la mésozone III correspond au régime  $v = 200$  m/min,  $f = 0.3$  mm/tr,  $a_p = 3$  mm, et la maximale au régime  $v = 150$  m/min,  $f = 0.3$  mm/tr,  $a_p = 3$  mm. Cela s'explique par l'augmentation de la pression tangentielle de contact.

L'usure minimale de la mésozone IV correspond au régime  $v = 100$  m/min,  $f = 0.3$  mm/tr,  $a_p = 3$  mm, et la maximale correspond  $v = 200$  m/min,  $f = 0.3$  mm/tr,  $a_p = 3$  mm. Cela s'explique aussi par l'augmentation de la pression tangentielle de contact.

Les dépendances de la durée de vie  $T$  et du coefficient de sollicitation  $B$  de l'outil de coupe de la vitesse de coupe de l'acier 42CrMo4, de l'alliage Ti6Al4V et de l'acier X2CrNiMo18-14-3 sont présentées sur la Figure 64, la Figure 65 et la Figure 66 respectivement.

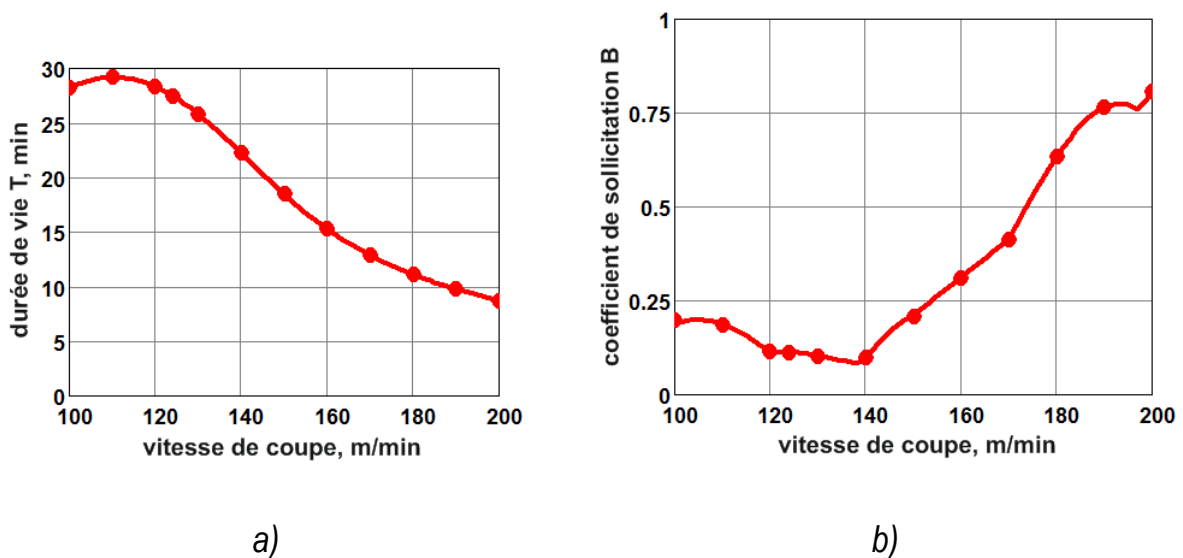


Figure 64 - Dépendances de la durée de vie  $T$  (a) et du coefficient de sollicitation  $B$  (b) de l'outil de coupe de la vitesse de coupe de l'acier 42CrMo4 ( $f = 0.3$  mm/tr,  $a_p = 3$  mm)



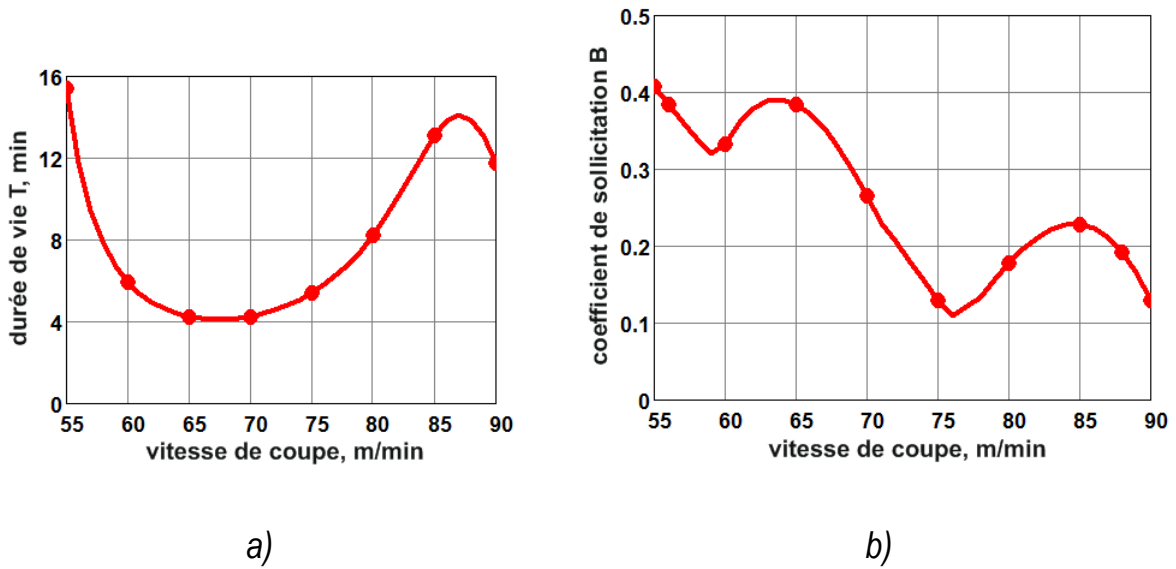


Figure 65 - Dépendances de la durée de vie  $T$  (a) et du coefficient de sollicitation  $B$  (b) de l'outil de coupe de la vitesse de coupe de l'alliage Ti6Al4V ( $f = 0.3$  mm/tr,  $ap = 3$  mm)

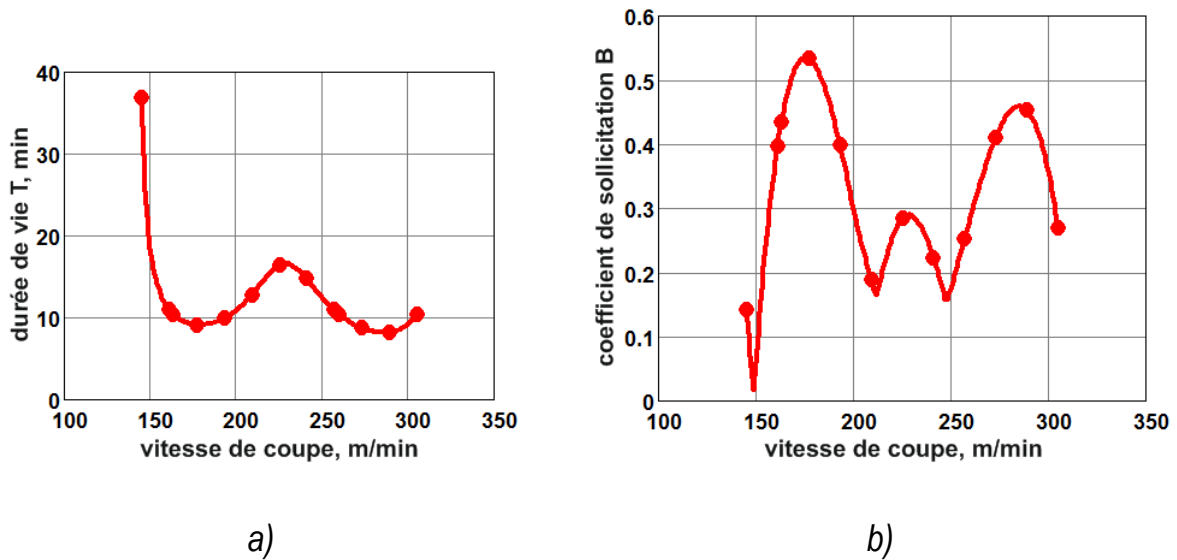


Figure 66 - Dépendances de la durée de vie  $T$  (a) et du coefficient de sollicitation  $B$  (b) de l'outil de coupe de la vitesse de coupe de l'acier X2CrNiMo18-14-3 ( $f = 0.3$  mm/tr,  $ap = 3$  mm)

## 2.4 Analyse de l'influence du liquide de coupe

Les caractéristiques thermophysiques des liquides de coupe sont présentées dans le Tableau 17.

Tableau 17 - Caractéristiques thermophysiques des liquides de coupe

(Энтелис, et al., 1995), (Худобин, et al., 2006)

Type (GOST 28549.7)	Liquide de coupe	caractéristiques thermophysiques			
		densité, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> (pour 20°C/100°C)	viscosité cinématique, $\nu$ mm <sup>2</sup> /s (pour 20°C/100°C)	chaleur spécifique en masse, $c_p$ , J/(kg·K) (pour 20°C/100°C)	conductivité, $\lambda$ , W/(m·K) (pour 20°C/100°C)
MAD	Akvol-2, 3 %-émulsion	995.6/ 955.2	1.275/ 0.3851	1103/ 4152	0.5761/ 0.6582
	Akvol-2, 5 %-émulsion	993.8/ 953.1	1.466/ 0.4349	4054/ 4112	0.5620/ 0.6922
	Akvol-2, 10 %-émulsion	989.4/ 947.9	1.860/ 0.4801	3934/ 4012	0.5296/ 0.6062
MAC	Oukrinol-1M	995.9/	1.405/	4111/	0.5711/
	AZMOL, 3 %-émulsion	955.6	0.4128	4164	0.6529
MHF	AZMOL MP-6	946.3/ 891,2	139.50/ 6.633	1910/ 2190	0.1362/ 0.1288
MHF	ARIAN	891.6/	124.3/	1881/	0.1456/
	MP-99	839.0	7.213	2149	0.1372

Le diamètre équivalent correspondant est  $D_{\text{éq}} = 0.004$  m. La détermination du coefficient de conductivité thermique pour les différentes compositions chimiques et modes d'alimentation des liquides de coupe est présentée dans le Tableau 18.

Tableau 18 - Coefficient de conductibilité thermique des liquides de coupe

Liquide de coupe	Pression du jet, MPa	Vitesse d'alimentation du liquide de coupe, m/s	Nombre de Reynolds	Nombre de Prandtl	Nombre de Prandtl dans la couche frontière	Nombre de Nusselt	Coefficient de conductibilité thermique, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Akvol-2, 3 %-émulsion	0.1	10	23581	1.15	0.09	210	40406
	0.2	14	33349			259	49746
	0.3	17	40844			293	56180
	0.4	20	47163			319	61244
Akvol-2, 5 %-émulsion	0.1	10	20528	0.36	0.10	90	17292
	0.2	14	29030			111	21289
	0.3	17	35555			125	24043
	0.4	20	41055			136	26210
Akvol-2, 10 %-émulsion	0.1	10	16215	0.47	0.11	90	17208
	0.2	14	22932			110	21185
	0.3	17	28086			125	23925
	0.4	20	32430			136	26082
Oukrinol-1M AZMOL, 3 %-émulsion	0.1	10	21396	0.34	0.09	91	17399
	0.2	14	30259			112	21420
	0.3	17	37059			126	24191
	0.4	20	42792			137	26372
AZMOL MP-6	0.1	10	221	69.11	2.70	84	16059
	0.2	15	313			99	19098
	0.3	18	383			110	21135
	0.4	21	442			118	22712
ARIAN MP-99	0.1	11	256	58.92	2.82	80	15452
	0.2	15	361			96	18375
	0.3	18	443			106	20336
	0.4	21	511			114	21852

L'influence de l'ensemble des actions lubrifiante et réfrigérante du liquide de coupe sur la sollicitation thermomécanique de l'outil de coupe en fonction des modèles et des niveaux et intervalles des paramètres (coefficient de conductibilité thermique  $\alpha$  et coefficient de frottement  $\mu$ ) sont présentés dans le Tableau 19. La matrice du plan d'expérience est présentée dans le Tableau 20.

Tableau 19 - Niveaux et intervalles de variable des facteurs

facteurs	niveaux			intervalle de variable
	-1	0	+1	
$x_1$ (coefficient de conductibilité thermique $\alpha$ , $\frac{kW}{m^2 \cdot K}$ )	20	40	60	20
$x_2$ (coefficient de frottement $\mu$ )	0.12	0.22	0.32	0.1

Tableau 20 - Matrice du plan d'expérience

numéro d'expérience	$x_1$	$x_2$	$y(\sigma, \tau, \theta)$
1	+1	+1	$y_1(\sigma, \tau, \theta)$
2	-1	+1	$y_2(\sigma, \tau, \theta)$
3	+1	-1	$y_3(\sigma, \tau, \theta)$
4	-1	-1	$y_4(\sigma, \tau, \theta)$
5	0	+1	$y_5(\sigma, \tau, \theta)$
6	+1	0	$y_6(\sigma, \tau, \theta)$
7	0	-1	$y_7(\sigma, \tau, \theta)$
8	-1	0	$y_8(\sigma, \tau, \theta)$
9	0	0	$y_9(\sigma, \tau, \theta)$

Les résultats de simulation servent à obtenir les dépendances de la sollicitation thermomécanique de l'outil de coupe (pression normale de contact  $\sigma$ , pression tangentielle de contact  $\tau$ , température de contact  $\theta$ ) en fonction du coefficient de conductibilité thermique  $\alpha$  (niveau de discrétisation  $1 \frac{kW}{m^2 \cdot K}$ ) et du coefficient de frottement  $\mu$  (niveau de discrétisation 0.01) pour chaque mésozone de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier 42CrMo4 (Figure 67), de l'alliage Ti6Al4V (Figure 68), de l'acier X2CrNiMo18-14-3 (Figure 69).

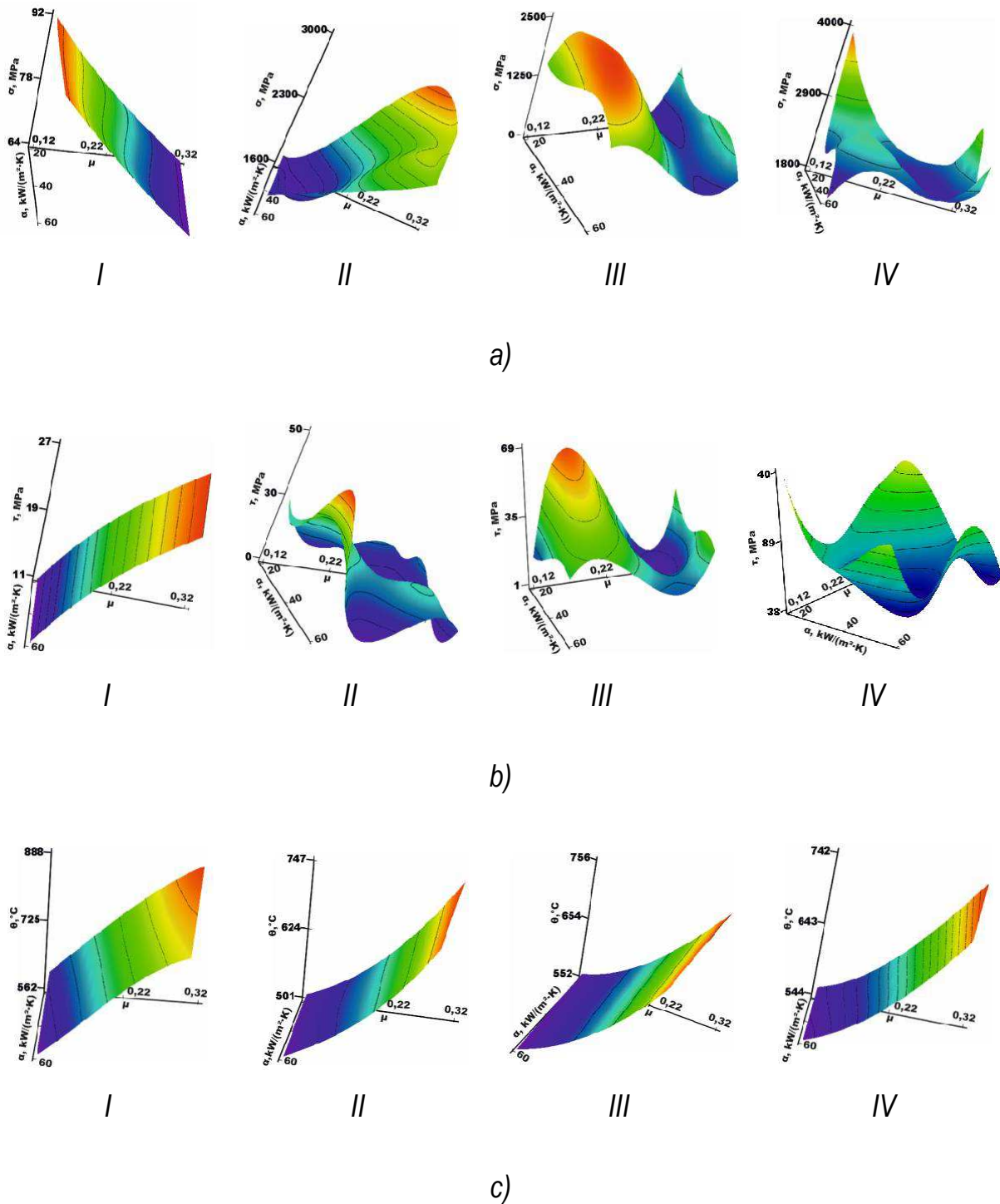
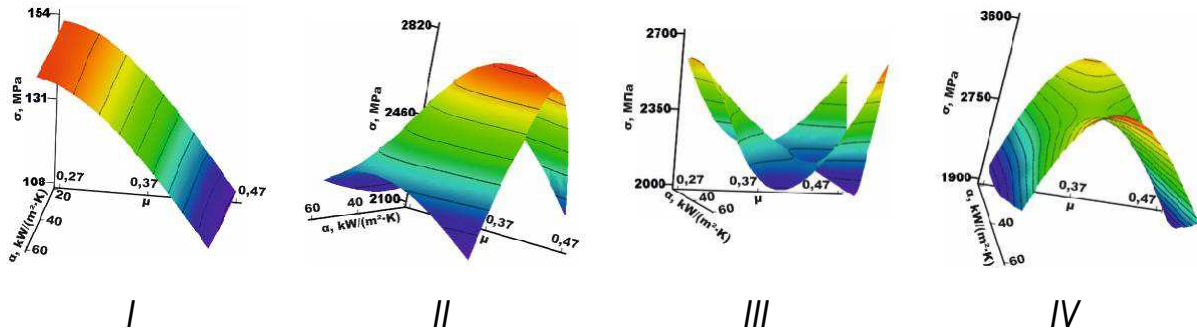
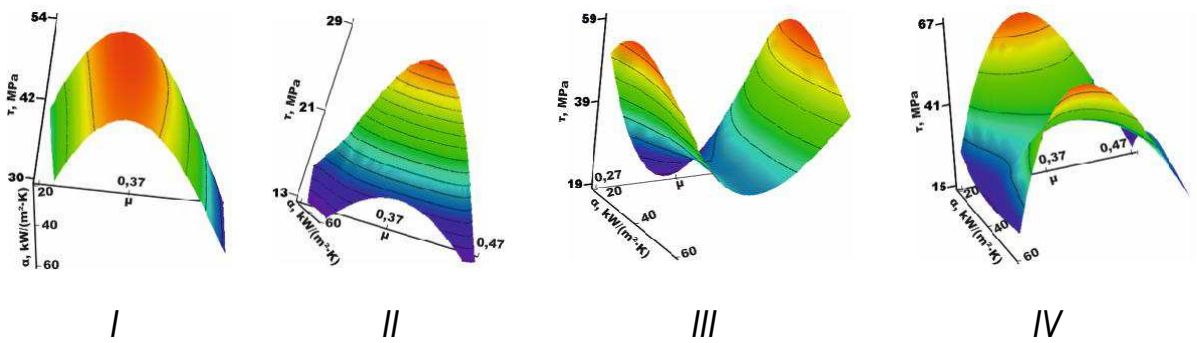


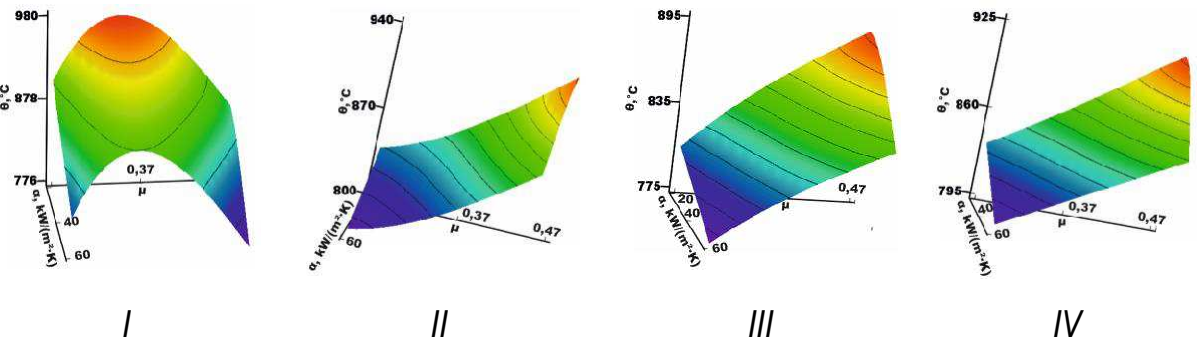
Figure 67 - Influence des actions du liquide de coupe sur la sollicitation thermomécanique lors du tournage de l'acier 42CrMo4 ( $v = 200 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.3 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 3 \text{ mm}$ ) : a) pression normale de contact ; b) pression tangentielle de contact ; c) température de contact



a)



b)



c)

Figure 68 - Influence des actions du liquide de coupe sur la sollicitation thermomécanique lors du tournage de l'alliage Ti6Al4V ( $v = 90 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.3 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 3 \text{ mm}$ ) : a) pression normale de contact ; b) pression tangentielle de contact ; c) température de contact

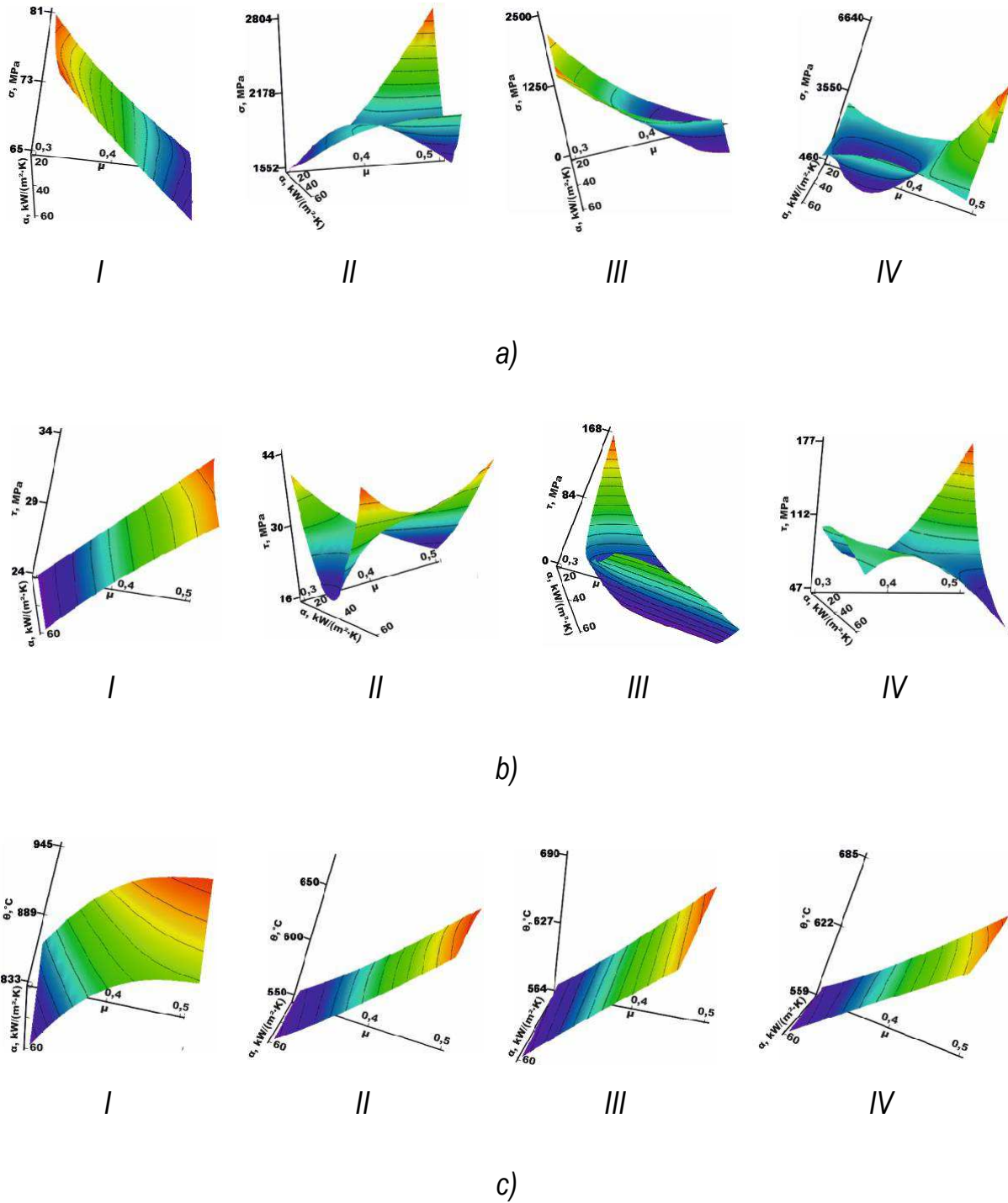


Figure 69 - Influence des actions du liquide de coupe sur la sollicitation thermomécanique lors du tournage de l'acier X2CrNiMo18-14-3 ( $v = 305 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.3 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 3 \text{ mm}$ ) : a) pression normale de contact ; b) pression tangentielle de contact ; c) température de contact

De par les dépendances observées, on peut identifier les variantes des ensembles P (coefficient de la conductibilité thermique  $\alpha$  et coefficient de frottement  $\mu$ ) qui assurent la sollicitation thermomécanique imposée des mésozones de l'outil de coupe

$$\begin{array}{l}
 \alpha\mu(\sigma) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n \\ \text{for } j \in 0..m \\ \text{if } \sigma \geq \text{ceil}(Mf_{i,j}) \\ \left| \begin{array}{l} P_{k,0} \leftarrow x_i \\ P_{k,1} \leftarrow y_j \\ k \leftarrow k + 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \\
 P
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \alpha\mu(\tau) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n \\ \text{for } j \in 0..m \\ \text{if } \tau \geq \text{ceil}(Mf_{i,j}) \\ \left| \begin{array}{l} P_{k,0} \leftarrow x_i \\ P_{k,1} \leftarrow y_j \\ k \leftarrow k + 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \\
 P
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \alpha\mu(t) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n \\ \text{for } j \in 0..m \\ \text{if } t \geq \text{ceil}(Mf_{i,j}) \\ \left| \begin{array}{l} P_{k,0} \leftarrow x_i \\ P_{k,1} \leftarrow y_j \\ k \leftarrow k + 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \\
 P
 \end{array}$$

où  $Mf_{i,j}$  est la valeur du paramètre de la sollicitation pour la  $i^{\text{ème}}$  valeur du coefficient de conductibilité thermique et la  $j^{\text{ème}}$  valeur du coefficient de frottement. Les valeurs imposées des paramètres de la sollicitation thermomécanique des mésozones de l'outil de coupe sont :  $\sigma$  - pression normale de contact,  $\tau$  - pression tangentielle de contact,  $\theta$  - température de contact ;  $0..n$  – intervalle de la variation des valeurs du coefficient de conductibilité thermique ;  $0..m$  – intervalle de la variation du coefficient de frottement;  $x_n$ ,  $x_i$ ,  $x_k$  - respectivement minimale,  $i^{\text{ème}}$  et maximale valeur du coefficient de conductibilité thermique ;  $y_n$ ,  $y_j$ ,  $y_k$  - respectivement minimale,  $j^{\text{ème}}$  et maximale valeur du coefficient de frottement.



# Bibliographie

**Arrazola, P. J., et al. 2008.** The effect of machinability on thermal fields in orthogonal cutting of AISI 4140 steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008, № 57, pp. 65-68.

**AZoM.** The group of material scientists. AZoM. [En ligne] [Citation : 06 01 2012.] <http://www.azom.com>.

**Bacaria, J.-L. 2001.** *Un modèle comportemental et transitoire pour la coupe des métaux : thèse présentée pour obtenir le grade de docteur*. Tarbes : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 2001.

**Braham Bouchnak, T. 2010.** *tude du comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique: le Ti555-3: thèse présentée pour obtenir le grade de docteur*. Angers : ENSAM d'Angers, 2010.

**Chinmaya, R., et al. 2010.** Machinability improvement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and hybrid machining. *nternational Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2010, №50, pp. 174-182.

**Germain, G. 2006.** *Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assiste laser : thèse pour obtenir le grade de Docteur*. Angers : École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006.

**Gökkaya, H., Nalbant, M. et Yaşar, M. 2009.** Kaplama çeşidi-katman sayısı ve sıcaklığa bağlı olarak kesici takım üst yüzeyindeki takım-talaş temas alan bölgesi ve yanak yüzeyindeki sıcaklık dağılıminin sonlu elemanlarla analizi. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*. 2009.

**Grolleau, V. 1996.** *Approche de la validation expérimentale des simulations numériques de la coupe avec prise en compte des phénomènes locaux à l'arête de l'outil: thèse présentée pour obtenir le grade de docteur*. Nantes : Ecole centrale de Nantes, 1996.

**Jianxin, D., Li, Y. et Song, W. 2008.** Diffusion wear in dry cutting of Ti–6Al–4V with WC/Co carbide tools. *Wear*. 2008, №265, pp. 1776–1783.

**Kamnis, S., et al. 2008.** Computational simulation of thermally sprayed WC–Co powder. *Computational Materials Science*. 2008, No43, pp. 1172–1182.

**Kone, F. F., et al. 2011.** Finite element modelling of the thermo-mechanical behavior of coatings under extreme contact loading in dry machining. *Surface & Coatings Technology*. 2011, №205, pp. 3559–3566.

**Limido, J. 2008.** *Etude de l'effet de l'usinage grande vitesse sur la tenue en fatigue de pièces aéronautiques : thèse en vue de l'obtention du doctorat*. Toulouse : Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.

**Nouari, M. 2010.** Numerical simulation for nuclear components machining. *Ecole Internationale du Nucléaire*. [Online] 11 02, 2010. [Cited: 11 2010, 10.] [http://www.inuclear-academy.com/scr\\_media/medias/Pages/07%20cirtes.pdf](http://www.inuclear-academy.com/scr_media/medias/Pages/07%20cirtes.pdf).

**Okamoto, S., et al. 2005.** Mechanical properties of WC/Co cemented carbide with larger WC grain size. *Materials Characterization*. 2005, No55, pp. 281– 287.

**OTUA.** Propriétés physiques. OTUA. [En ligne] [Citation : 06 01 2012.] <http://www.otua.org>.

**Ozel, T., et al. 2010.** Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti–6Al–4V alloy with experiments and finite element simulations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Elsevier, 2010, 59.

**Pantalé, O. 1996.** *Modélisation et simulation tridimensionnelles de la coupe des métaux : thèse présentée pour obtenir le grade de docteur*. Tarbes : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 1996.

—. **2005.** *Plateforme de prototypage virtuel pour la simulation numérique en grandes transformations thermomécaniques rapides.* Toulouse : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 2005.

**Pantalé, O., et al. 2004.** 2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* Elsevier, 2004, 193.

**Pujana, J., et al. 2007.** Analysis of the inverse identification of constitutive equations applied in orthogonal cutting process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 2007, № 47, pp. 2153–2161.

**Staia, M. H., et al. 2006.** High-temperature tribological characterization of commercial TiAlN coatings. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2006, №18, pp. 1727–1736.

**Valiorgue, F. 2008.** *Simulation des processus de génération de contraintes résiduelles en tournage du 316L. Nouvelle approche numérique et expérimentale : thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur.* Saint-Etienne : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.

**Xie, L. 2004.** *Estimation of two-dimension tool wear based on finite element method: Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften.* Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 2004.

**Криворучко, Д. В., Залога, В. О. et Корбач, В. Г. 2009.** *Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів.* Суми : СумДУ, 2009.

**Худобин, Л. В., Бабичев, А. П. et Булыжев, Е. М. 2006.** *Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник.* Москва : Машиностроение, 2006.

**Энтелис, С. Г., Берлинер, Э. М. et Годлевский, В. А. 1995.** *Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник.* Москва : Машиностроение, 1995.