

THESE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE ET D'AEROTECHNIQUE

(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

*Ecole doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et
Aéronautique*

Secteur de recherche: Mécanique des solides, des matériaux, des structures et des surfaces

Présentée par:

François HAMON

Annexes

Modélisation du comportement mécanique en fissuration d'alliages aéronautiques.

Directeurs de Thèse: Gilbert HENAFF & Damien HALM

Soutenue le 10 mai 2010

Jury:

M.Habibou Maitournam	Professeur à l'école Polytechnique, Palaiseau	Rapporteur
M.Stephane Marie	Ingénieur de recherche au CEA, Saclay	Rapporteur
M.Thierry Désoyer	Professeur à l'école Centrale, Marseille	Examineur
Mme.Sylvie Pommier	Professeur au LMT, Cachan	Examineur
M.Thomas Billaudeau	Ingénieur d'étude à Airbus, Toulouse	Examineur
M.Gilbert Henaff	Professeur à l' ENSMA, Poitiers	Examineur
M.Damien Halm	Professeur à l'ENSMA, Poitiers	Examineur

ANNEXES

Sommaire

Introduction	12
--------------------	----

Annexe I : Plan et découpe des éprouvettes

I) Eprouvettes.....	14
1 Essais de qualification	14
1-1 Essais de ténacité.....	14
1-2 Essais de courbe R.....	15
1-3 Essais de propagation de fissure à fort ΔK	16
2 Essais de Caractérisation	18
2-1 Comportement cyclique	18
2-2 Essais de traction.....	19
II) Plaques et prélèvement	20
1 Alliage d'aluminium 7175 T7351.....	20
1-1 Prélèvement des éprouvettes M (T).....	20
1-2 Exemple de prélèvement des éprouvettes CT et cylindriques.....	23
1-3 Exemple de prélèvement des éprouvettes plates de traction	25
2 Alliage d'aluminium 2024 T351.....	26
2-1 Prélèvement des éprouvettes M (T).....	26
3 Alliage de Ti-6Al-4V	28
3-1 Prélèvement des éprouvettes M (T).....	28
4 Acier 15-5PH	30
4-1 Prélèvement des éprouvettes M (T).....	30

Annexe II : Données expérimentales

I) Essais de qualification.....	34
1 Essais de ténacité	34
1-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351	34
1-2 Alliage d'aluminium 2024 T351	34
1-3 Alliage Ti-6Al-4V	35
1-4 Résultats	35
2 Essais de Courbe R	36
2-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351	36
2-2 Alliage d'aluminium 2024 T351	37
2-3 Alliage Ti-6Al-V	37

2-4 Acier 15-5PH.....	38
2-5 Valeurs de K_c	38
3 Essais de propagation de fissure à fort ΔK	39
3-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351	39
3-2 Alliage d'aluminium 2024 T351	43
3-3 Alliage Ti-6Al-4V	46
3-4 Acier 15-5PH.....	48
II) Essais d'identification.....	50
1 Comportement cyclique.....	50
1-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351	50
1-2 Alliage d'aluminium 2024 T351	54
1-3 Alliage Ti-6Al-4V	58
1-4 Acier 15-5PH.....	62
1-5 Valeurs des paramètres du comportement élastique et plastique	66
2 Essais de traction.....	66
2-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351	66
2-2 Alliage d'aluminium 2024 T351	68
2-3 Alliage Ti-6Al-4V	69
2-3 Acier 15-5PH.....	71
2-4 Données numériques	71
III) Données théoriques	72

Annexe III : Microstructure

I) Essais de ténacité.....	74
II) Essais de courbe R	82
III) Essais de propagation	86
1 Alliage d'aluminium 7175 T7351	86
2 Alliage d'aluminium 2024 T351	91
3 Alliage Ti-6Al-4V	99
4 Acier 15-5PH	106

Annexe IV : Implémentation numérique en explicite

I) Vumat.....	116
II) Résolution d'un système d'équations : fonction « Simeq ».....	135

Table des Figures

Annexe I : Plan et découpe des éprouvettes

Figure Annexe I) - 1 : Dimensions de l'éprouvette CT W = 40 utilisée lors des essais de ténacité.....	14
Figure Annexe I) - 2 : Dimensions de l'éprouvette M (T) W = 200 utilisée lors des essais de courbe R.	15
Figure Annexe I) - 3 : Dimensions de l'éprouvette CT W = 75 utilisée lors des essais de propagation de fissure à fort ΔK au LMPM.	16
Figure Annexe I) - 4 : Dimensions de l'éprouvette M (T) W = 160 utilisée lors des essais de propagation de fissure à fort ΔK à CENTECH.....	17
Figure Annexe I) - 5 : Dimensions de l'éprouvette cylindrique utilisée lors des essais de consolidation cyclique.....	18
Figure Annexe I) - 6 : Dimensions de l'éprouvette plate utilisée lors des essais de traction.	19
Figure Annexe I) - 7 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351. Etape n°1.	20
Figure Annexe I) - 8 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351. Etape n°2 : prélèvement de la plaque 620 mm * 220 mm.....	21
Figure Annexe I) - 9 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351. Etape n°3 : prélèvement des plaques 500 mm * 160 mm.....	22
Figure Annexe I) - 10 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351. Etape n°4 : prélèvement de la plaques 220 mm * 620 mm.	23
Figure Annexe I) - 11 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351 de dimensions 300 mm * 370 mm afin de prélever des éprouvettes CT W = 40 et W = 75.	24
Figure Annexe I) - 12 : Illustration de la découpe au cœur des éprouvettes CT.	24
Figure Annexe I) - 13 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351 de dimensions 472 mm * 200 mm afin de prélever des éprouvettes cylindriques dans le sens LT et TL.	25
Figure Annexe I) - 14 : Illustration de la découpe au cœur des éprouvettes cylindriques.	25
Figure Annexe I) - 15 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351 de dimensions 280 mm * 250 mm afin de prélever des éprouvettes de traction dans le sens LT et TL.	25
Figure Annexe I) - 16 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 2024 T351. Etape n°1.	26
Figure Annexe I) - 17 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 2024 T351. Etape n°2.	27
Figure Annexe I) - 18 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 2024 T351. Etape n°3.	27
Figure Annexe I) - 19 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 2024 T351. Etape n°4.	28
Figure Annexe I) - 20 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage de titane Ti-6Al-V. Etape n°1.....	29
Figure Annexe I) - 21 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage de titane Ti-6Al-V. Etape n°2.....	30
Figure Annexe I) - 22 : Plan de découpe d'une plaque d'acier 15-5PH. Etape n°1.	31
Figure Annexe I) - 23 : Plan de découpe d'une plaque de l'acier 15-5PH. Etape n°2.	32

Annexe II : Données expérimentales

Figure Annexe II) - 1 : Courbes des essais de ténacité réalisés sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans les sens de prélèvement LT et TL.	34
---	----

Figure Annexe II) - 2 : Courbes des essais de ténacité réalisés sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans les sens de prélèvement LT et TL.	34
Figure Annexe II) - 3 : Courbes des essais de ténacité réalisés sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans les sens de prélèvement LT et TL.....	35
Figure Annexe II) - 4 : Courbe R réalisée sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT. Eprouvette M (T) W = 200.....	36
Figure Annexe II) - 5 : Courbe R réalisée sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens TL. Eprouvette M (T) W = 200.....	36
Figure Annexe II) - 6 : Courbe R réalisée sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens LT. Eprouvette M (T) W = 200.....	37
Figure Annexe II) - 7 : Courbe R réalisée sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens LT.	37
Figure Annexe II) - 8 : Courbe R réalisée sur l'acier 15-5PH dans le sens LT.....	38
Figure Annexe II) - 9 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.....	39
Figure Annexe II) - 10 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.....	39
Figure Annexe II) - 11 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0.1 et R = 0.7 sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.....	40
Figure Annexe II) - 12 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.....	40
Figure Annexe II) - 13 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes M (T) W = 160.	41
Figure Annexe II) - 14 : Comparaison des essais sur des éprouvettes CT et M (T) pour l'alliages d'aluminiums 7175 T7351 sens LT à R = 0.1.	41
Figure Annexe II) - 15 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes M (T) W = 200.	42
Figure Annexe II) - 16 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes M (T) W = 200.	42
Figure Annexe II) - 17 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.....	43
Figure Annexe II) - 18 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.....	43
Figure Annexe II) - 19 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.....	44
Figure Annexe II) - 20 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.....	44
Figure Annexe II) - 21 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT réalisés sur des éprouvettes M (T) W = 160.	45
Figure Annexe II) - 22 : Comparaison des essais sur des éprouvettes CT et M (T) pour l'alliages d'aluminiums 2024 T351 sens LT à R = 0,1.	45
Figure Annexe II) - 23 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.	46
Figure Annexe II) - 24 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.	46
Figure Annexe II) - 25 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens TL réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.	47
Figure Annexe II) - 26 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens TL réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.	47
Figure Annexe II) - 27 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'acier 15-5PH sens LT réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.	48
Figure Annexe II) - 28 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'acier 15-5PH sens LT réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.	48
Figure Annexe II) - 29 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à R = 0,1 et R = 0,7 sur l'acier 15-5PH sens TL réalisés sur des éprouvettes CT W = 75.	49

Figure Annexe II) - 30 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'acier 15-5PH sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.	49
Figure Annexe II) - 31 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT.	50
Figure Annexe II) - 32 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT.	50
Figure Annexe II) - 33 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	51
Figure Annexe II) - 34 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	51
Figure Annexe II) - 35 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL.	52
Figure Annexe II) - 36 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL.	52
Figure Annexe II) - 37 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	53
Figure Annexe II) - 38 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	53
Figure Annexe II) - 39 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT.	54
Figure Annexe II) - 40 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT.	54
Figure Annexe II) - 41 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	55
Figure Annexe II) - 42 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	55
Figure Annexe II) - 43 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL.	56
Figure Annexe II) - 44 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL.	56
Figure Annexe II) - 45 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	57
Figure Annexe II) - 46 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	57
Figure Annexe II) - 47 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT.	58
Figure Annexe II) - 48 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT.	58
Figure Annexe II) - 49 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	59
Figure Annexe II) - 50 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	59
Figure Annexe II) - 51 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans sens TL.	60
Figure Annexe II) - 52 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens TL.	60
Figure Annexe II) - 53 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	61

Figure Annexe II) - 54 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	61
Figure Annexe II) - 55 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'acier 15-5PH dans le sens LT.....	62
Figure Annexe II) - 56 : Courbe de consolidation cyclique de l'acier 15-5PH dans le sens LT.....	62
Figure Annexe II) - 57 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'acier 15-5PH dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	63
Figure Annexe II) - 58 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'acier 15-5PH dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	63
Figure Annexe II) - 59 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'acier 15-5PH dans sens TL.....	64
Figure Annexe II) - 60 : Courbe de consolidation cyclique de l'acier 15-5PH dans le sens TL.....	64
Figure Annexe II) - 61 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'acier 15-5PH dans le sens TL à partir d'un essai à 1.% de déformation totale imposée.	65
Figure Annexe II) - 62 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'acier 15-5PH dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.	65
Figure Annexe II) - 63 : Comparaisons des mesures de l'extensomètre et des simulations numériques lors d'un essai de traction sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT.....	66
Figure Annexe II) - 64 : Courbes de traction, charge en fonction du déplacement, pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans les sens de prélèvement LT et TL.....	67
Figure Annexe II) - 65 : Comparaison des courbes de traction obtenues expérimentalement dans le sens LT et numériquement pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351.	67
Figure Annexe II) - 66 : Comparaisons des mesures de l'extensomètre et des simulations numériques lors d'un essai de traction sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens LT.....	68
Figure Annexe II) - 67 : Courbes de traction, charge en fonction du déplacement, pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans les sens LT et TL.....	68
Figure Annexe II) - 68 : Comparaison des courbes de traction obtenues expérimentalement dans le sens LT et numériquement pour l'alliage d'aluminium 2024 T351.	69
Figure Annexe II) - 69 : Comparaisons des mesures de l'extensomètre et des simulations numériques lors d'un essai de traction sur l'alliage Ti-6Al-4V dans le sens LT.....	69
Figure Annexe II) - 70 : Courbes de traction, charge en fonction du déplacement, pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans les sens de prélèvement LT et TL.....	70
Figure Annexe II) - 71 : Comparaison des courbes de traction obtenues expérimentalement dans le sens LT et numériquement pour l'alliage Ti-6Al-4V.	70
Figure Annexe II) - 72 : Courbes de traction, charge en fonction du déplacement, pour l'acier 15-5PH dans les sens de prélèvement LT et TL.	71

Annexe III : Microstructure

Figure Annexe III) - 1 : Localisation des points d'étude de la surface de rupture d'une éprouvette CT, W = 40, rompue lors d'un essai de ténacité.....	74
Figure Annexe III) - 2 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à deux grossissements différents.....	74
Figure Annexe III) - 3 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à deux grossissements différents.....	74
Figure Annexe III) - 4 : Point d'étude n°1 pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT à deux grossissements différents.....	75
Figure Annexe III) - 5 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à deux grossissements différents.....	75
Figure Annexe III) - 6 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à deux grossissements différents.....	75
Figure Annexe III) - 7 : Point d'étude n°2 pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT à deux grossissements différents.....	76

Figure Annexe III) - 8 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à deux grossissements différents.....	76
Figure Annexe III) - 9 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à deux grossissements différents.....	76
Figure Annexe III) - 10 : Point d'étude n°3 pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT à deux grossissements différents.....	77
Figure Annexe III) - 11 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à deux grossissements différents.....	77
Figure Annexe III) - 12 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à deux grossissement différents.....	77
Figure Annexe III) - 13 : Point d'étude n°4 pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT à deux grossissements différents.....	78
Figure Annexe III) - 14 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL à deux grossissements différents.....	78
Figure Annexe III) - 15 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à deux grossissements différents.....	78
Figure Annexe III) - 16 : Point d'étude n°1 pour l'alliage Ti-6Al-4V sens TL à deux grossissements différents.....	79
Figure Annexe III) - 17 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL à deux grossissements différents.....	79
Figure Annexe III) - 18 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à deux grossissements différents.....	79
Figure Annexe III) - 19 : Point d'étude n°2 pour l'alliage Ti-6Al-4V sens TL à deux grossissements différents.....	80
Figure Annexe III) - 20 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL à deux grossissements différents.....	80
Figure Annexe III) - 21 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à deux grossissements différents.....	80
Figure Annexe III) - 22 : Point d'étude n°3 pour l'alliage Ti-6Al-4V sens TL à deux grossissements différents.....	81
Figure Annexe III) - 23 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL à deux grossissements différents.....	81
Figure Annexe III) - 24 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à deux grossissements différents.....	81
Figure Annexe III) - 25 : Point d'étude n°4 pour l'alliage Ti-6Al-4V sens TL à deux grossissements différents.....	82
Figure Annexe III) - 26 : Localisation des points d'étude de la surface de rupture d'une éprouvette M (T), W = 200, rompue lors d'un essai de courbe R.....	82
Figure Annexe III) - 27 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.....	82
Figure Annexe III) - 28 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.....	83
Figure Annexe III) - 29 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.....	83
Figure Annexe III) - 30 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.....	83
Figure Annexe III) - 31 : Structure triangulaire au point n°2 lors d'un essais de courbe R sur de l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT.....	84
Figure Annexe III) - 32 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.....	84
Figure Annexe III) - 33 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.....	85
Figure Annexe III) - 34 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.....	85

Figure Annexe III) - 35 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.	85
Figure Annexe III) - 36 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,7 à ΔK_1	86
Figure Annexe III) - 37 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_1	86
Figure Annexe III) - 38 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,7 à ΔK_2	87
Figure Annexe III) - 39 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_2	87
Figure Annexe III) - 40 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,7 à ΔK_3	88
Figure Annexe III) - 41 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_3	88
Figure Annexe III) - 42 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_4	89
Figure Annexe III) - 43 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_1	90
Figure Annexe III) - 44 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_2	90
Figure Annexe III) - 45 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_3	91
Figure Annexe III) - 46 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R = 0,7 à ΔK_1	92
Figure Annexe III) - 47 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_1	92
Figure Annexe III) - 48 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R = 0,7 à ΔK_2	93
Figure Annexe III) - 49 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_2	93
Figure Annexe III) - 50 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R = 0,7 à ΔK_3	94
Figure Annexe III) - 51 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R=0,1 à ΔK_3	94
Figure Annexe III) - 52 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_4	95
Figure Annexe III) - 53 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_1	96
Figure Annexe III) - 54 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,1 à ΔK_1	96
Figure Annexe III) - 55 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_2	97
Figure Annexe III) - 56 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,1 à ΔK_2	97
Figure Annexe III) - 57 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_3	98
Figure Annexe III) - 58 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_3	98
Figure Annexe III) - 59 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_4	99
Figure Annexe III) - 60 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,7 à ΔK_1	100
Figure Annexe III) - 61 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,1 à ΔK_1	100
Figure Annexe III) - 62 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,7 à ΔK_2	101
Figure Annexe III) - 63 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,1 à ΔK_2	101
Figure Annexe III) - 64 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,7 à ΔK_3	102
Figure Annexe III) - 65 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,1 à ΔK_3	102
Figure Annexe III) - 66 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R= 0,1 à ΔK_4	103
Figure Annexe III) - 67 : Alliage Ti-6Al-4V sens TL. R= 0,1 à ΔK_1	104
Figure Annexe III) - 68 : Alliage Ti-6Al-4V sens TL. R = 0,1 à ΔK_2	104
Figure Annexe III) - 69 : Alliage Ti-6Al-4V sens TL. R = 0,1 à ΔK_3	105
Figure Annexe III) - 70 : Alliage Ti-6Al-4V sens TL. R = 0,1 à ΔK_4	105
Figure Annexe III) - 71 : Comparaison des faciès de rupture d'un essai à R=0.1 entre l'alliage d'aluminium 2024 T351 et l'alliage de alliage Ti-6Al-4V.....	106
Figure Annexe III) - 72 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,1 à ΔK_1	106
Figure Annexe III) - 73 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,7 à ΔK_2	107
Figure Annexe III) - 74 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,1 à ΔK_2	107
Figure Annexe III) - 75 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,7 à ΔK_3	108
Figure Annexe III) - 76 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,1 à ΔK_3	108
Figure Annexe III) - 77 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,1 à ΔK_4	109
Figure Annexe III) - 78 : Acier 15-5PH sens TL. R = 0,7 à ΔK_1	110
Figure Annexe III) - 79 : Acier 15-5PH sens TL. R = 0,1 à ΔK_1	110
Figure Annexe III) - 80 : Acier 15-5PH sens TL. R = 0,7 à ΔK_2	111
Figure Annexe III) - 81 : Acier 15-5PH sens TL. R= 0,1 à ΔK_2	111
Figure Annexe III) - 82 : Acier 15-5PH sens TL. R= 0,7 à ΔK_3	112
Figure Annexe III) - 83 : Acier 15-5PH sens TL. R = 0,1 à ΔK_3	112
Figure Annexe III) - 84 : Acier 15-5PH sens TL. R = 0,1 à ΔK_4	113

Table des Tableaux

Annexe II : Données expérimentales

Tableau Annexe II) - 1 : Valeurs de la ténacité pour les alliages d'aluminiums et l'alliage de Ti-6Al-4V.	35
Tableau Annexe II) - 2 : Valeurs de K_c	38
Tableau Annexe II) - 3 : Paramètres du comportement élastiques et plastiques.	66
Tableau Annexe II) - 4 : Paramètres de simulation d'un essai de traction.	71
Tableau Annexe II) - 5 : Paramètres matériau entrés sous Abaqus lors de la simulation d'un essai de traction.	72

Annexe III : Essais et microstructure

Tableau Annexe III) - 1 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à R = 0,1 et R = 0,7.	86
Tableau Annexe III) - 2 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à R = 0,7.	90
Tableau Annexe III) - 3 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à R = 0,1 et R = 0,7.	91
Tableau Annexe III) - 4 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à R = 0,1 et R = 0,7.	95
Tableau Annexe III) - 5 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens LT à R = 0,1 et R = 0,7.	99
Tableau Annexe III) - 6 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens LT à R = 0,1 et R = 0,7.	103
Tableau Annexe III) - 7 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'acier 15-5PH sens LT à R = 0,1 et R = 0,7.	106
Tableau Annexe III) - 8 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'acier 15-5PH sens TL à R = 0,1 et R = 0,7.	109

Annexe IV : Implémentation numérique en explicite

Tableau Annexe IV) - 1 : Définition du tableau contenant les forces thermodynamiques lors d'un calcul en trois dimensions.	117
Tableau Annexe IV) - 2 : Définition du tableau contenant les variables internes lors d'un calcul en trois dimensions.	118
Tableau Annexe IV) - 3 : Partie supérieure de [h] lors d'un calcul en trois dimensions.	125
Tableau Annexe IV) - 4 : Partie inférieure de [h] lors d'un calcul en trois dimensions.	127

Introduction

En trois années de recherche de nombreux essais et simulations ont été réalisés. Par souci de clarté, l'ensemble des résultats n'a pas été inséré dans le manuscrit principal. De ce fait, ce second volume a été rédigé. Il ne contient que les courbes et les tableaux bruts sans aucune analyse puisqu'elles ont été effectuées dans le texte principal. L'objectif, d'un point de vue expérimental, est de rendre accessible toutes les données obtenues à partir des essais sur les quatre matériaux et, d'un point de vue numérique, de permettre à tout le monde de créer sans difficulté une Vumat sous le logiciel Abaqus. Ainsi, ce second rapport se divise en quatre parties.

Tout d'abord, l'ensemble des informations concernant les éprouvettes, comme par exemple leur lieu prélèvement ou leur géométrie, est fourni en annexe I. Ces données sont importantes car les résultats peuvent en dépendre. Il n'est pas rare de voir des variations dans les courbes suivant le lieu de prélèvement des éprouvettes dans une tôle de grande dimension.

Ensuite, seules les courbes de l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sont présentées dans le texte principale. Cette seconde annexe regroupe toutes les courbes des quatre matériaux de l'étude. Ainsi, il apparaît clairement que chaque matériau à un comportement propre même s'ils sont proches les uns des autres.

De même, l'annexe III rassemble toutes les observations effectuées sous MEB, Microscope électronique à Balayage. Les résultats obtenus dans le texte principal à partir des images des surfaces de rupture de l'alliage d'aluminium 7175 T7351 se généralisent aux quatre matériaux avec des petites variations sur l'influence des paramètres ΔK et K_{max} .

Enfin, la Vumat est dépouillée dans l'annexe IV afin de rendre accessible sa réalisation. La Vumat est une subroutine classique du logiciel de calcul par éléments finis. Elle doit donc être réalisable et comprise rapidement par tous. A partir du fichier Fortran 77, les outils et la méthode utilisée sont explicités entièrement.

Annexe I : Plan et découpe des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour les essais sont prélevées dans des plaques fournies par Airbus. Celles-ci sont de grande taille ce qui permet de prélever les éprouvettes en différents endroits. Cette partie présente les dimensions des éprouvettes et des plaques initiales ainsi que des exemples de lieu de prélèvement des éprouvettes.

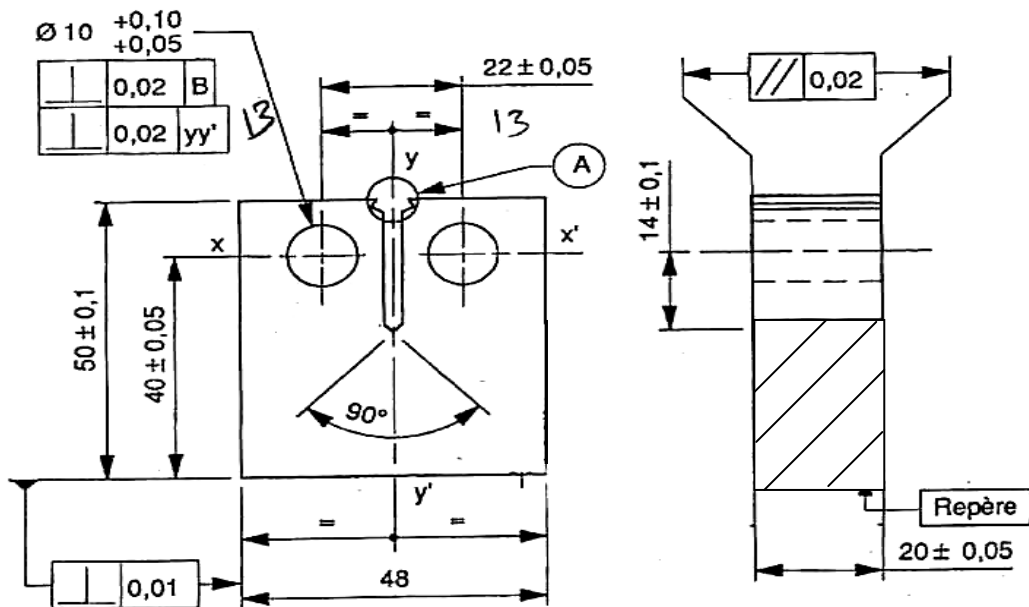
I) Eprouvettes

1 Essais de qualification

1-1 Essais de ténacité

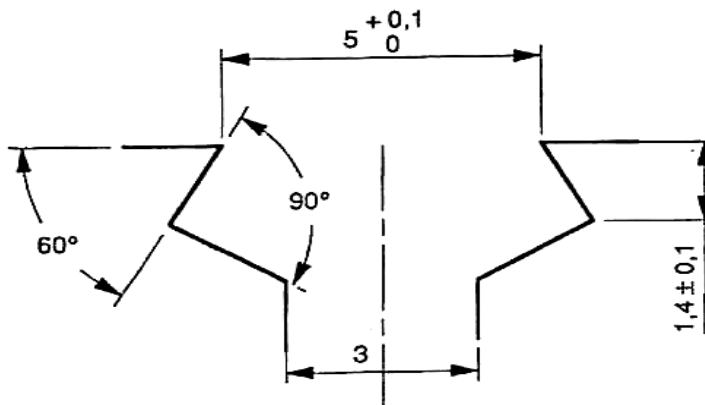
Les essais sont réalisés sur des éprouvettes CT W = 40 mm avec une épaisseur de B = 20 mm, Figure Annexe D) - 1.

Rayon du fond d'entaille < 0,02



yy' Axe de symétrie de l'entaille

Détail A Ech. 10



Tolérance générale = JS 12

Tolérance de forme = IT 9

Figure Annexe D) - 1 : Dimensions de l'éprouvette CT W = 40 utilisée lors des essais de ténacité.

1-2 Essais de courbe R

Les essais sont effectués sur des éprouvettes M (T) $W = 200$ mm et $B = 2$ mm, Figure Annexe I) - 2

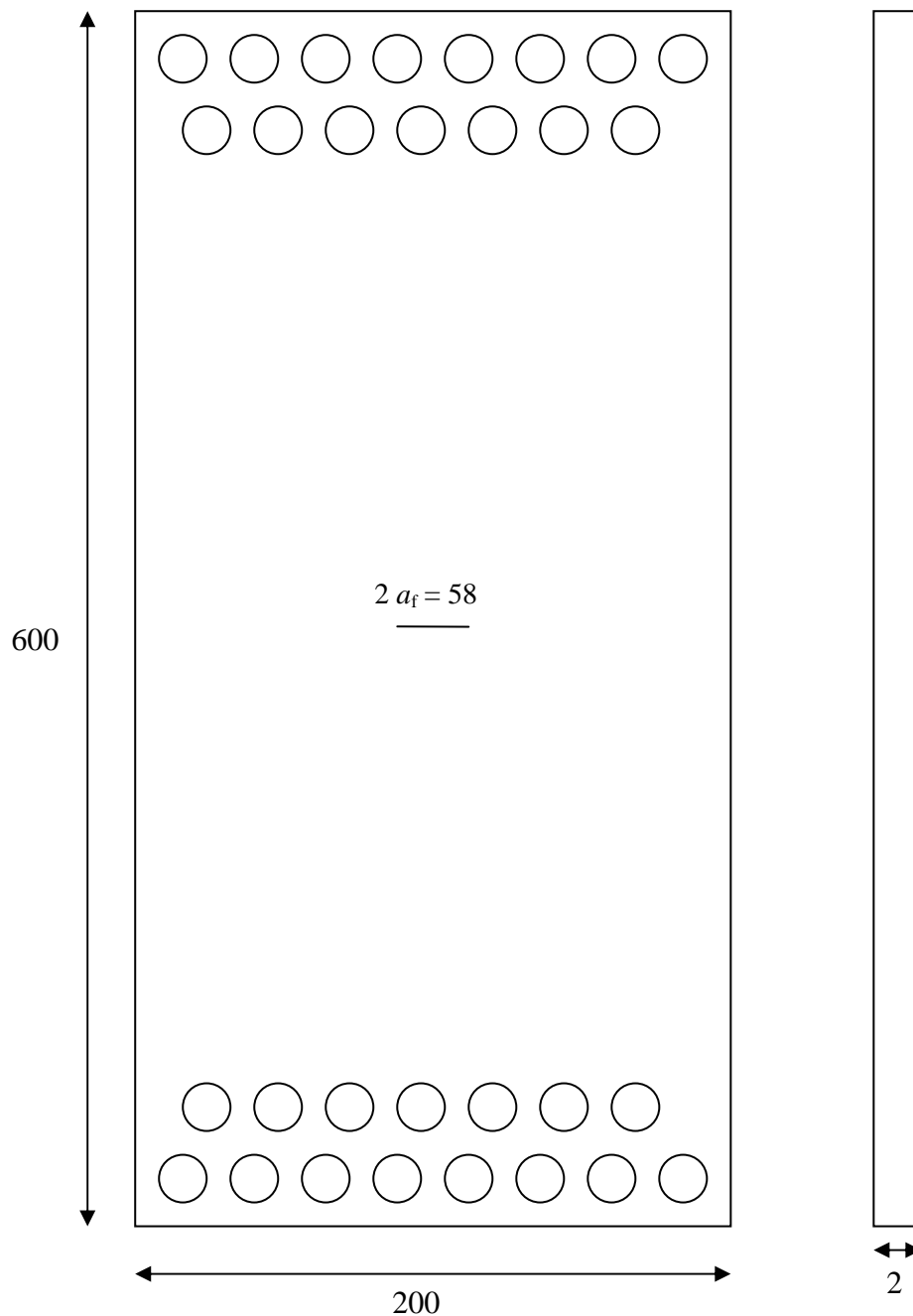


Figure Annexe I) - 2 : Dimensions de l'éprouvette M (T) $W = 200$ utilisée lors des essais de courbe R.

1-3 Essais de propagation de fissure à fort ΔK

Les premiers essais de propagation à fort ΔK sont effectués sur des éprouvettes CT W = 75 avec une épaisseur B = 20 mm, Figure Annexe I) - 3.

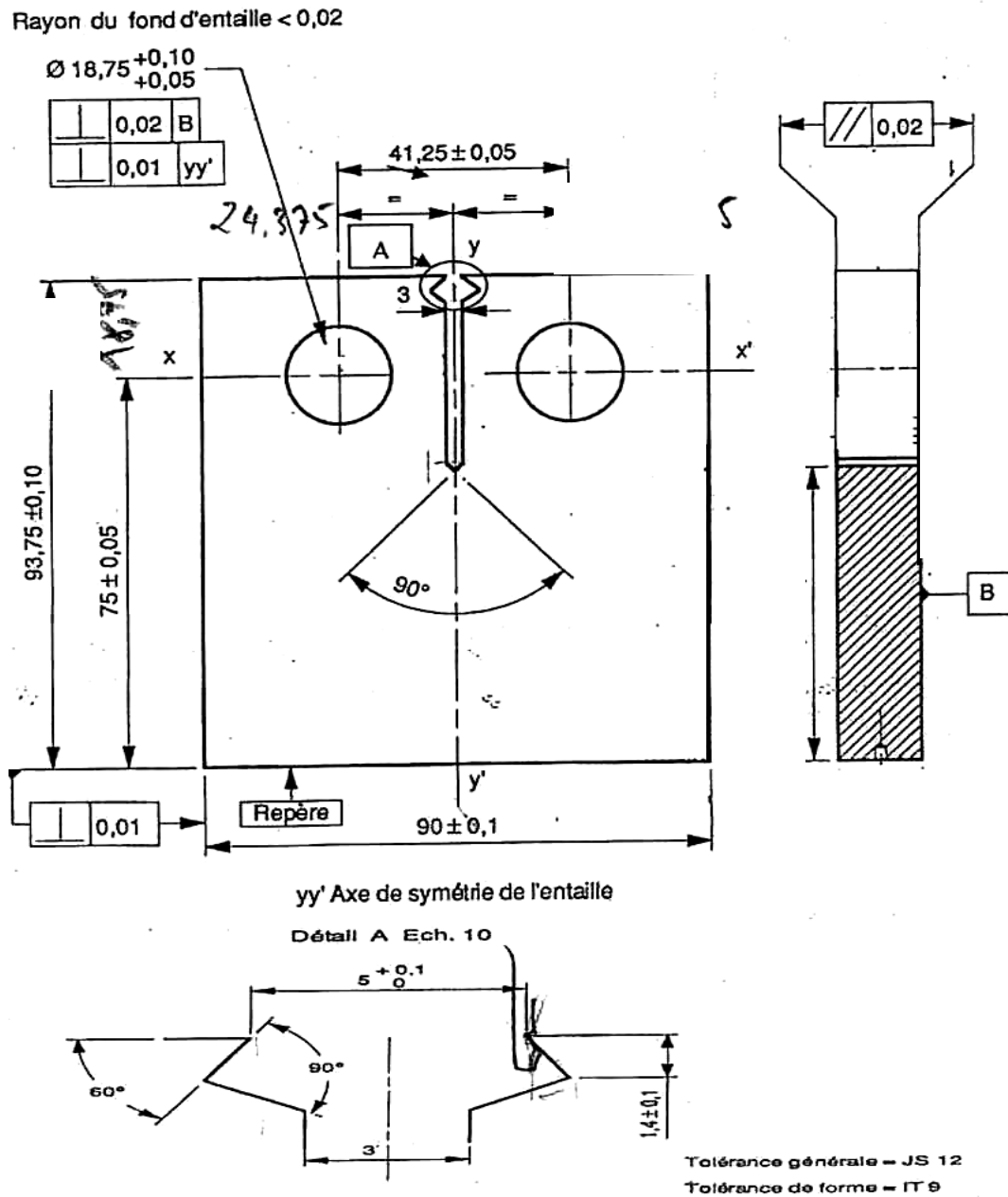


Figure Annexe I) - 3 : Dimensions de l'éprouvette CT W = 75 utilisée lors des essais de propagation de fissure à fort ΔK au LMPM.

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes M (T) $W = 160 \text{ mm}$ $B = 2 \text{ mm}$, Figure Annexe I) - 4.

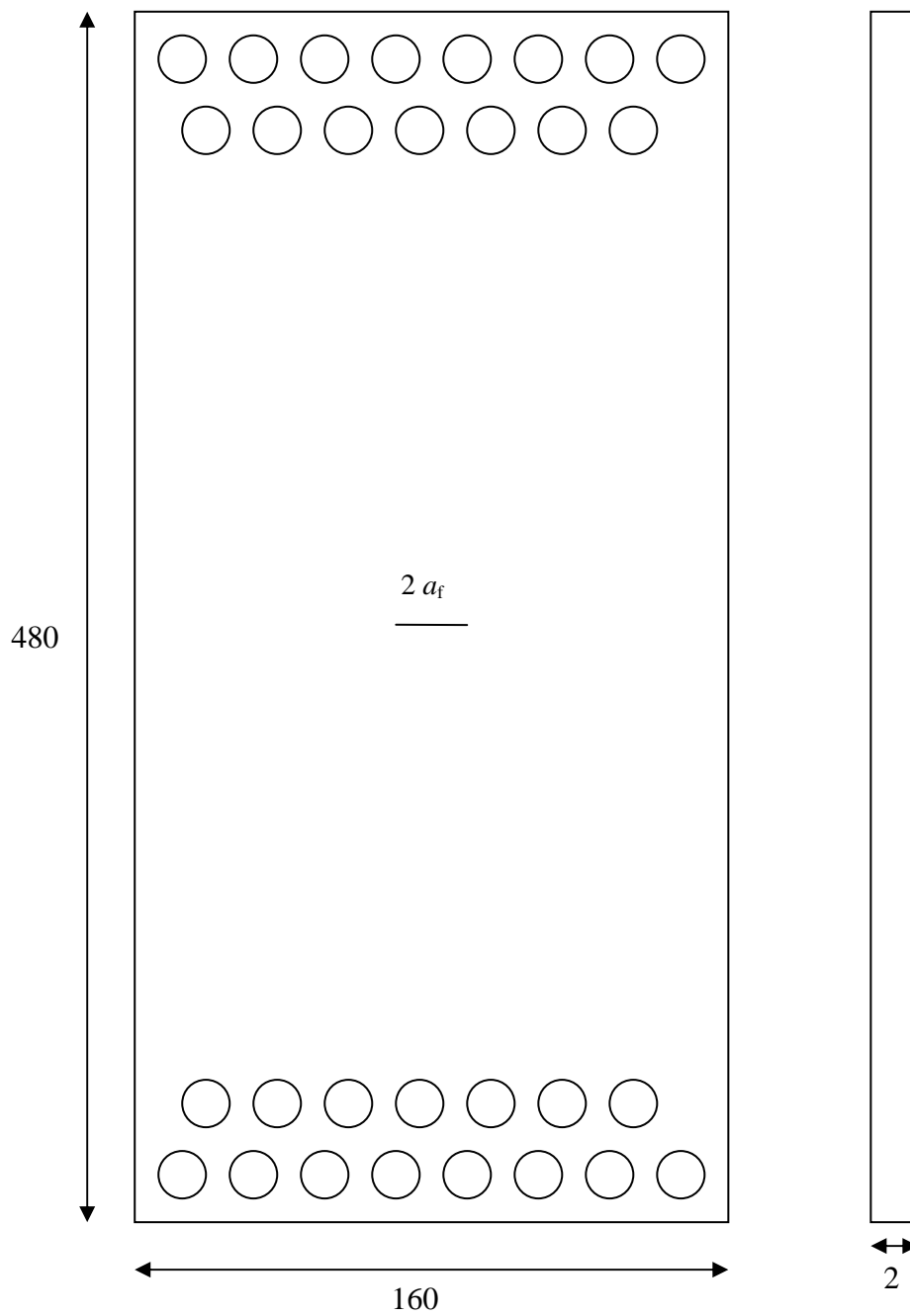


Figure Annexe I) - 4 : Dimensions de l'éprouvette M (T) $W = 160$ utilisée lors des essais de propagation de fissure à fort ΔK à CENTECH.

2 Essais de Caractérisation

2-1 Comportement cyclique

Des éprouvettes cylindriques sont employées lors des essais de caractérisation du comportement plastique, Figure Annexe I) - 5.

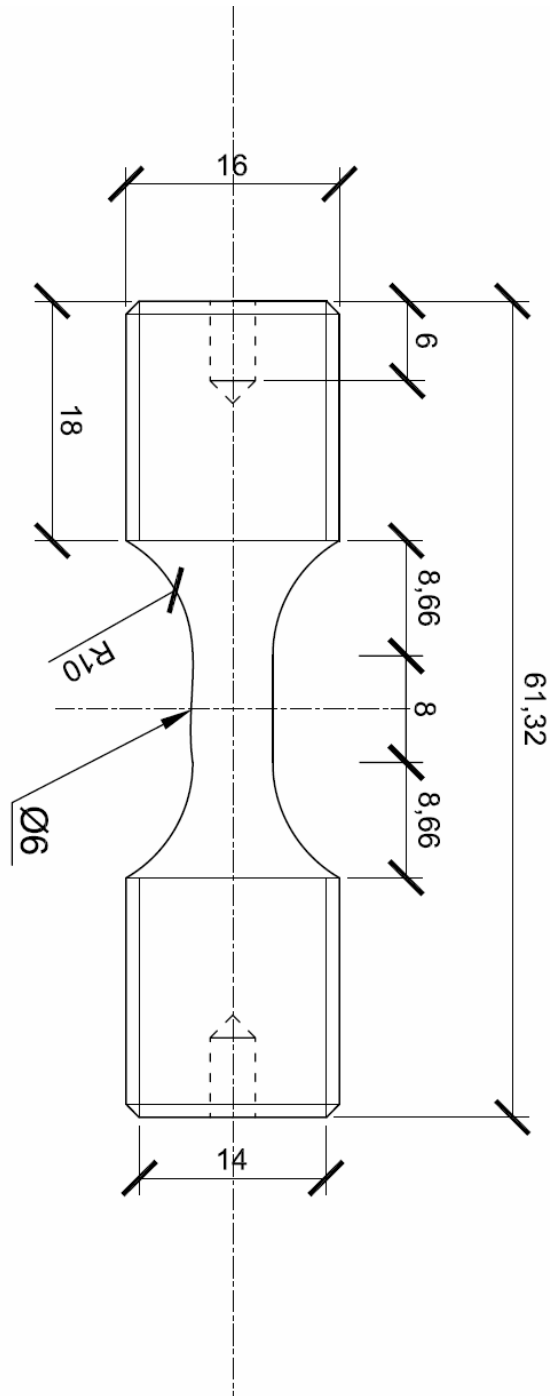


Figure Annexe I) - 5 : Dimensions de l'éprouvette cylindrique utilisée lors des essais de consolidation cyclique.

2-2 Essais de traction

La géométrie des éprouvettes utilisées est présentée sur la Figure Annexe I) - 6.

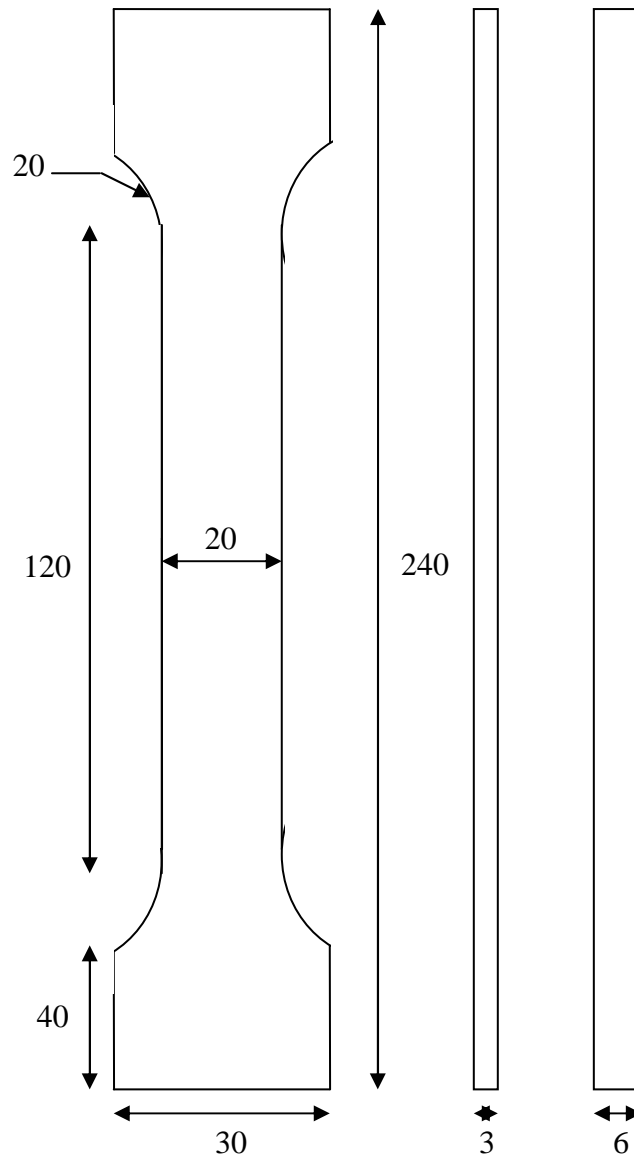


Figure Annexe I) - 6 : Dimensions de l'éprouvette plate utilisée lors des essais de traction.

La norme ASTM-E10002 impose une épaisseur de 6 mm. Cependant, avec une telle épaisseur les essais n'auraient pas pu être menés jusqu'à la rupture dans le cas de l'alliage Ti-6Al-V et de l'acier 15-5PH. En effet, la charge nécessaire pour rompre une éprouvette de 6 mm d'épaisseur de ce type de matériau est bien supérieure à 100 kN, la charge maximale applicable par la machine de traction. Par conséquent, pour ces deux matériaux, l'épaisseur est réduite de moitié : $B = 3$ mm.

II) Plaques et prélèvement

1 Alliage d'aluminium 7175 T7351

1-1 Prélèvement des éprouvettes M (T)

Deux plaques d'alliage d'aluminium 7175 T7351 ont été fournies au début de l'étude. Elles ont les mêmes dimensions : longueur 1065 mm, largeur 900 mm et épaisseur 45 mm. Il est nécessaire de prélever deux plaques de dimensions 220 mm * 620 mm et deux plaques de dimensions 180 mm * 500 mm pour effectuer respectivement les essais de courbe R et les essais de propagation à fort ΔK . Un jeu de 20 mm est prévu par rapport aux dimensions des éprouvettes M (T) pour compenser la lame de la scie.

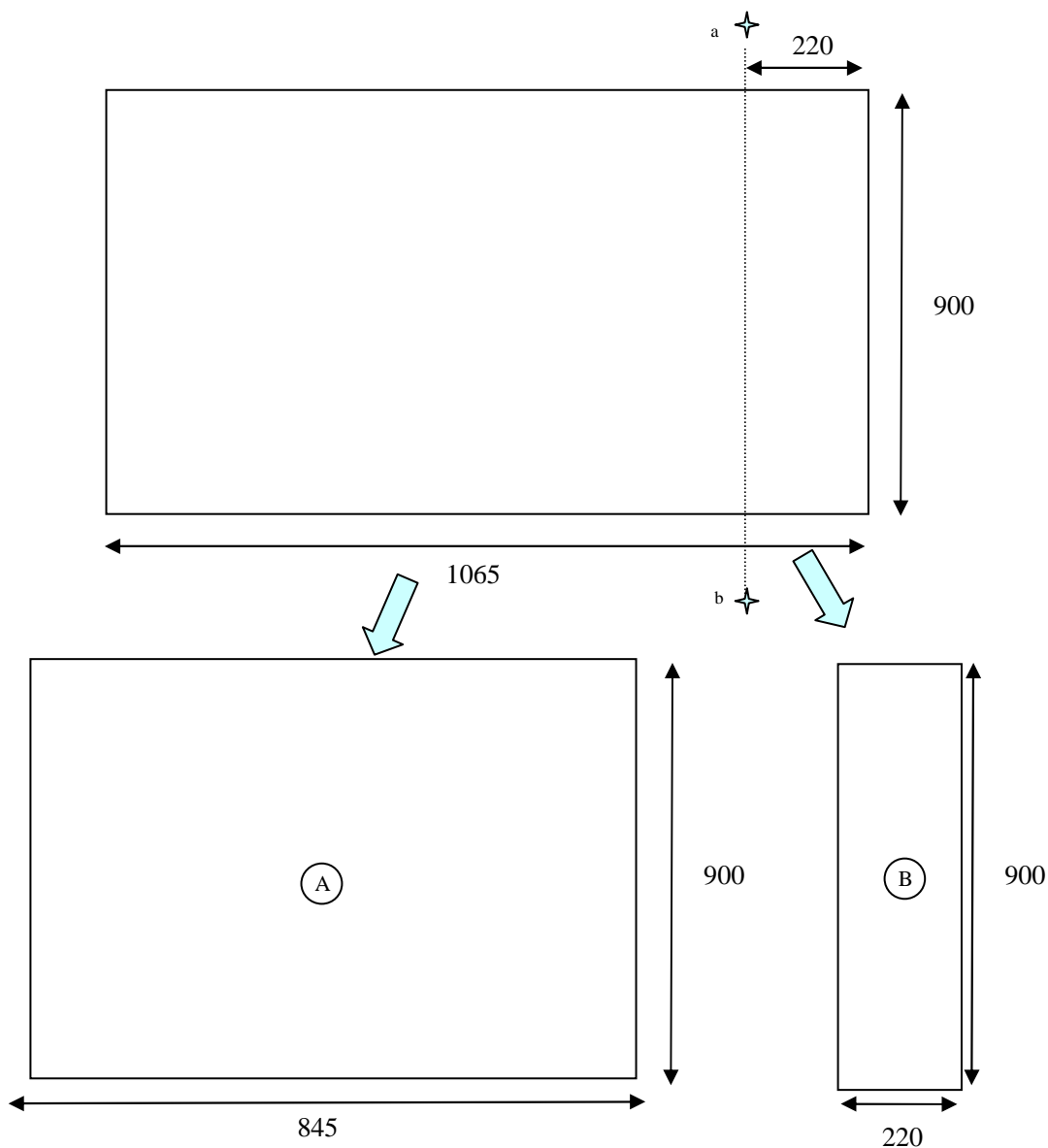


Figure Annexe I) - 7 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351. Etape n°1.

Les découpes sont réalisées de \ast a vers \ast b.

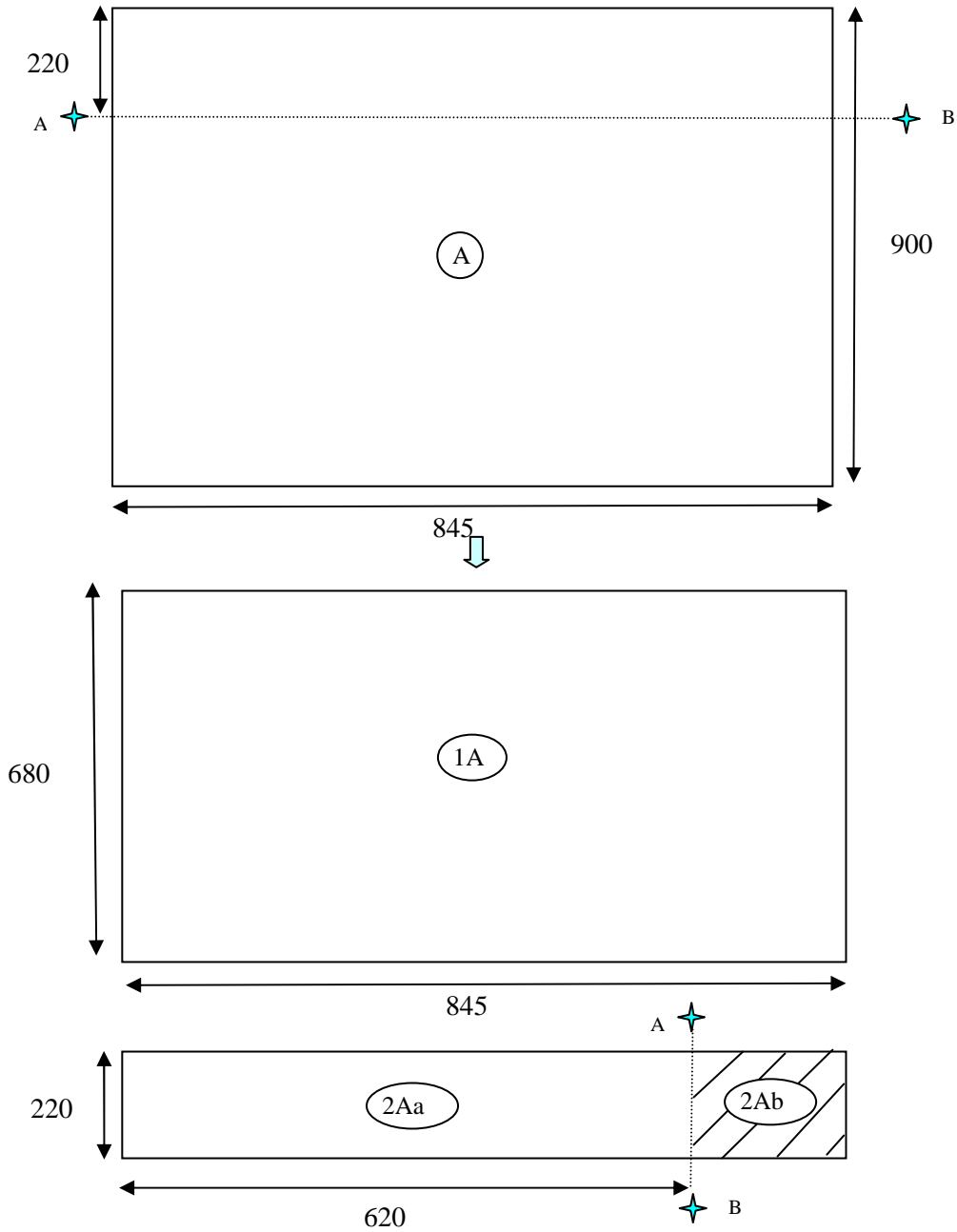


Figure Annexe I) - 8 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351. Etape n°2 : prélèvement de la plaque 620 mm * 220 mm.

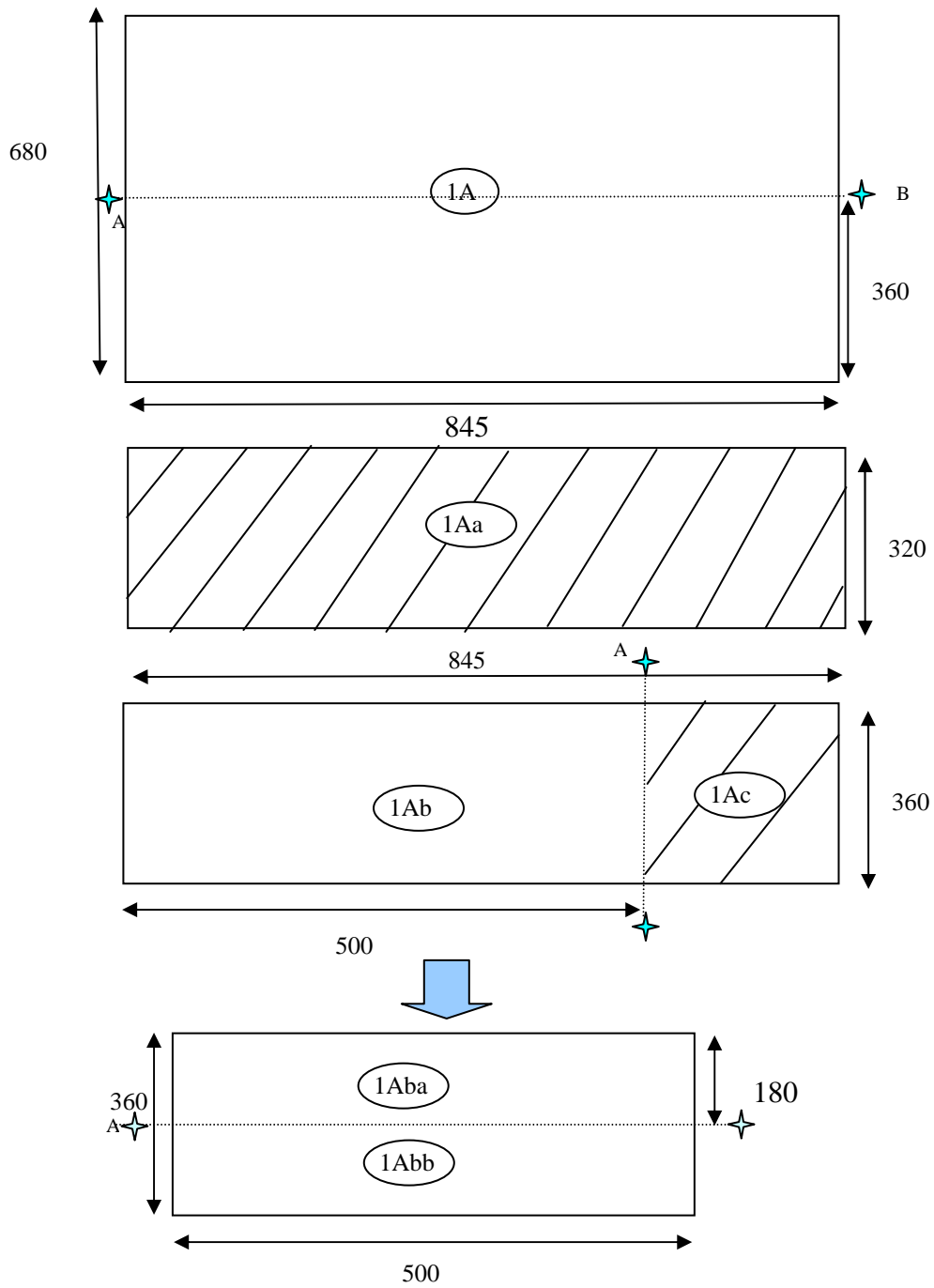


Figure Annexe I) - 9 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351. Etape n°3 : prélèvement des plaques 500 mm * 160 mm.

B est une plaque de dimensions 220 mm * 900 mm. Elle est recoupée pour obtenir une plaque de dimensions 220 mm * 620 mm, Figure Annexe I) - 10.

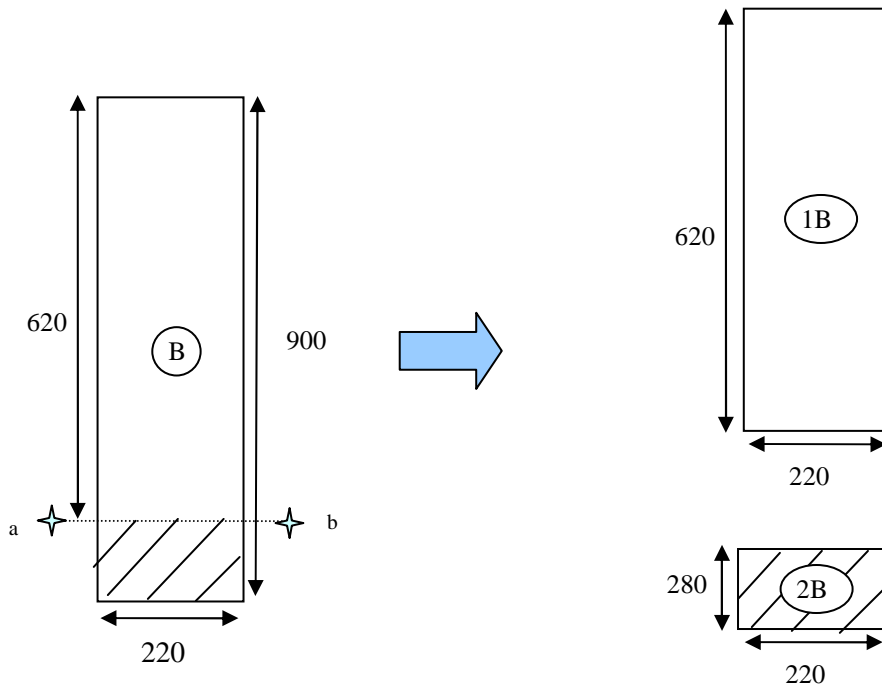


Figure Annexe I) - 10 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351. Etape n°4 : prélèvement de la plaques 220 mm *620 mm.

Les plaques, 2B 200 mm * 620 mm, 2Aa 620 mm * 200 mm et 1Aba 1Abb 500 mm * 180 mm, ont été envoyées chez CENTECH où elles ont été de nouveau découpées pour prélever les éprouvettes les M (T), au centre des plaques par mesure de précaution car le comportement peut être différent entre des éprouvettes prélevées en surface et à cœur.

Ensuite, les chutes de matière sont utilisées pour fabriquer les éprouvettes employées lors des essais au LMPM. La même démarche est appliquée à l'ensemble des quatre matériaux.

1-2 Exemple de prélèvement des éprouvettes CT et cylindriques

A partir de la chute de matière 1Ac d'alliage d'aluminium 7175 T7351 et de dimensions 300 mm * 370 mm, d'épaisseur 45 mm, 4 CT W = 75 (LT), 4 CT W = 40 (TL) et 4 CT W = 40 (LT) sont prélevées, Figure Annexe I) - 11.

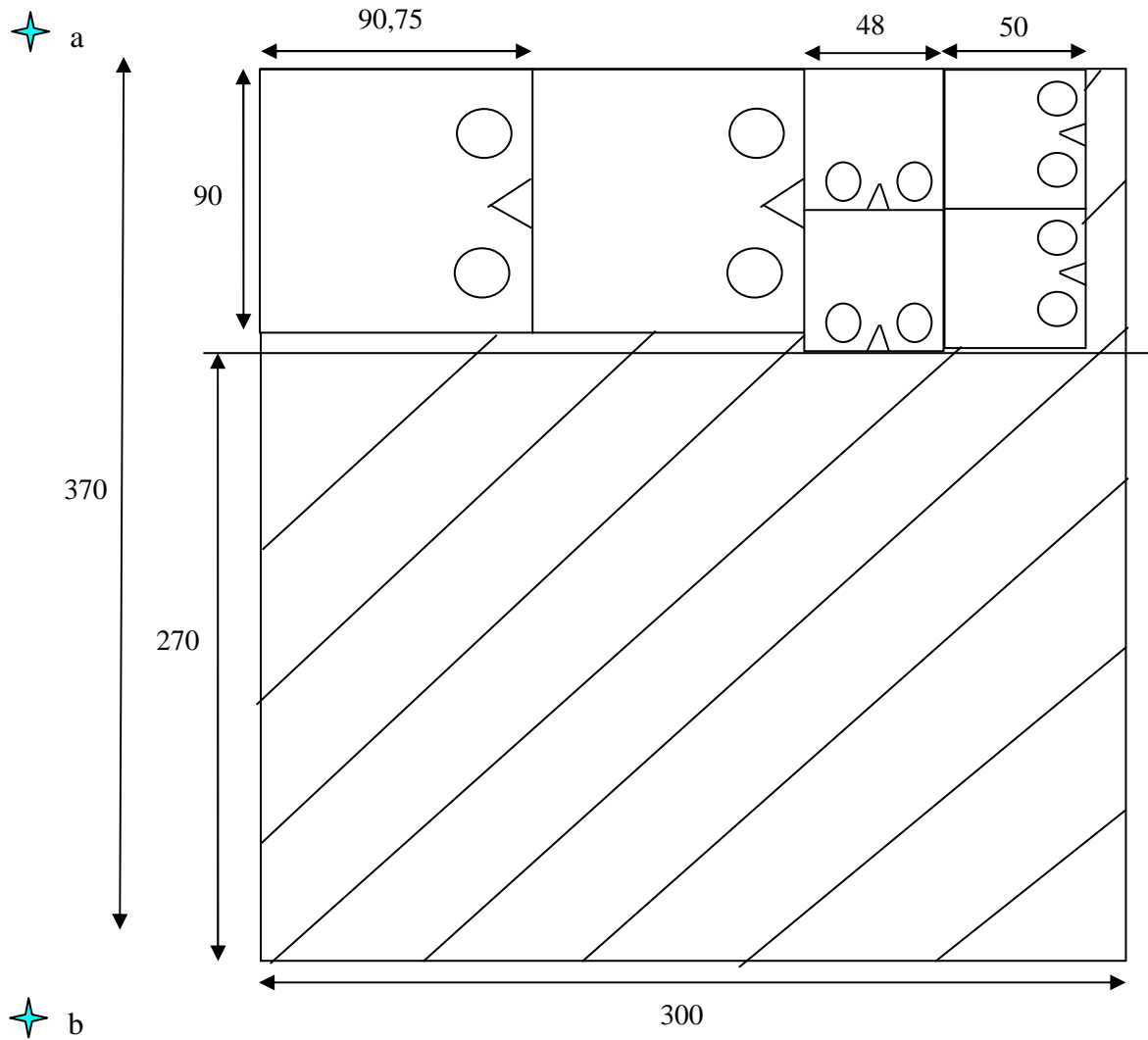


Figure Annexe I) - 11 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351 de dimensions 300 mm * 370 mm afin de prélever des éprouvettes CT W = 40 et W = 75.

La découpe est réalisée de \star a vers \star b. Les éprouvettes sont prises au centre de la plaque, Figure Annexe I) - 12.

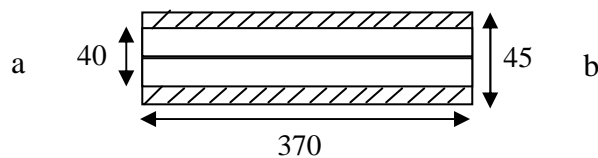


Figure Annexe I) - 12 : Illustration de la découpe au cœur des éprouvettes CT.

Ensuite, dans une plaque de dimension 472 mm * 200 mm, 12 éprouvettes cylindriques, dont 6 dans le sens LT et 6 dans le sens TL, sont extraites, Figure Annexe I) - 13.

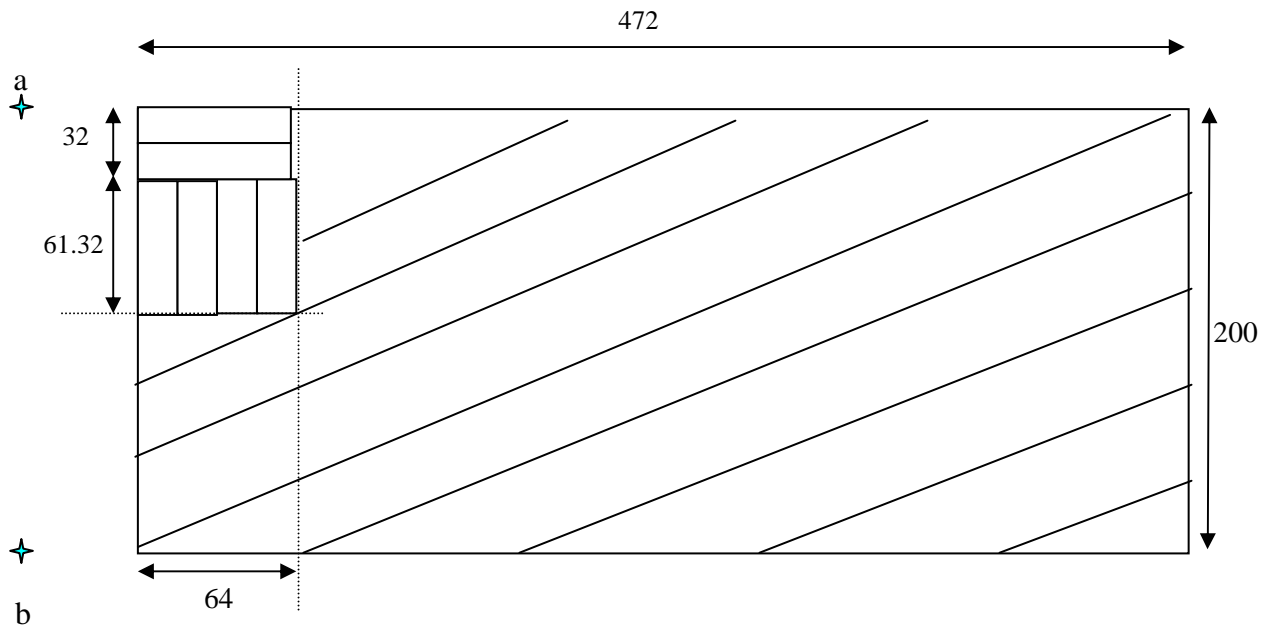


Figure Annexe I) - 13 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351 de dimensions 472 mm * 200 mm afin de prélever des éprouvettes cylindriques dans le sens LT et TL.

Deux éprouvettes sont découpées dans l'épaisseur, Figure Annexe I) - 14.

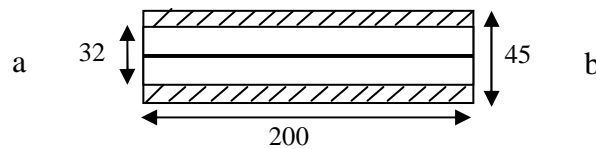


Figure Annexe I) - 14 : Illustration de la découpe au cœur des éprouvettes cylindriques.

1-3 Exemple de prélèvement des éprouvettes plates de traction

Six éprouvettes de traction sont prélevées dans la chute 2B de l'alliage d'aluminium 7175 T7351.

Trois d'entre elles sont dans le sens LT et les autres sont dans le sens TL, Figure Annexe I) - 15.

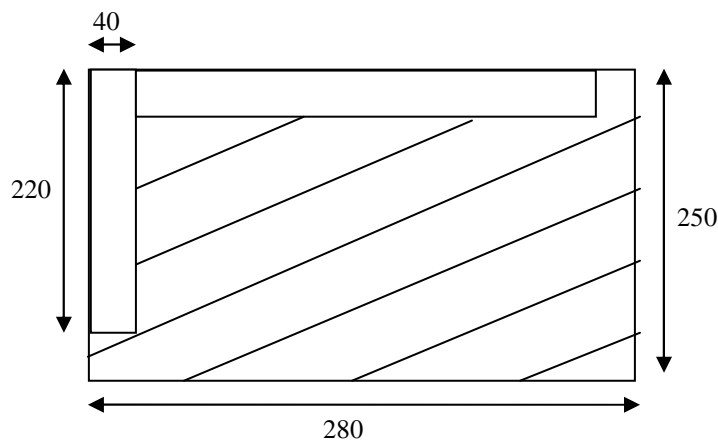


Figure Annexe I) - 15 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 7175 T7351 de dimensions 280 mm * 250 mm afin de prélever des éprouvettes de traction dans le sens LT et TL.

Elles sont aussi prélevées dans l'épaisseur. Cependant, un risque survient lorsque nous en extrayons plusieurs dans l'épaisseur car le comportement peut changer entre les éprouvettes situées au cœur et celles proches de la surface. Ce problème est surtout présent pour ce type d'éprouvette car il est possible d'en prendre plus de 5 dans l'épaisseur. Ceci peut être une des raisons des divergences de résultats en traction, annexe II.

2 Alliage d'aluminium 2024 T351

2-1 Prélèvement des éprouvettes M (T)

La plaque initiale est à une dimension de 725 mm * 2830 mm et une épaisseur de 21 mm. L'objectif est d'extraire 6 M (T) $W = 160$ dans les deux sens LT et TL et 2 M (T) $W = 200$. Bien évidemment, toutes les éprouvettes M (T) n'ont pas été envoyées chez Centech. Nous en gardons en réserve pour de prochaines études.

La plaque principale est scindée, dans le sens de la longueur, en trois plaques A, B et C, Figure Annexe I) - 16. La plaque est tournée dans ce document afin de simplifier la représentation. Les découpes sont réalisées de a vers b.

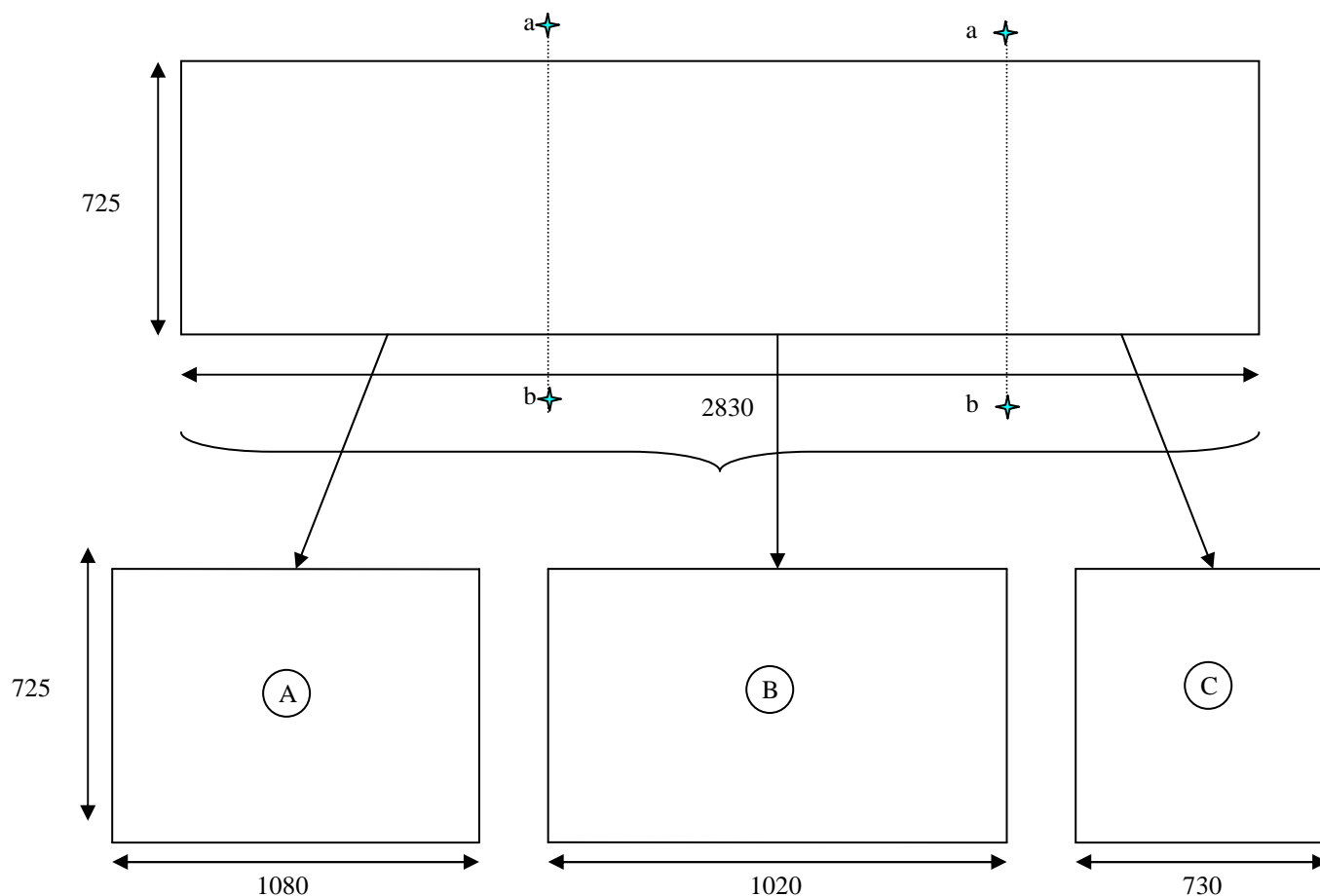


Figure Annexe I) - 16 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 2024 T351. Etape n°1.

Ensuite, les plaques A et C sont de nouveau découpées dans le sens de la longueur, Figure Annexe I) - 17.

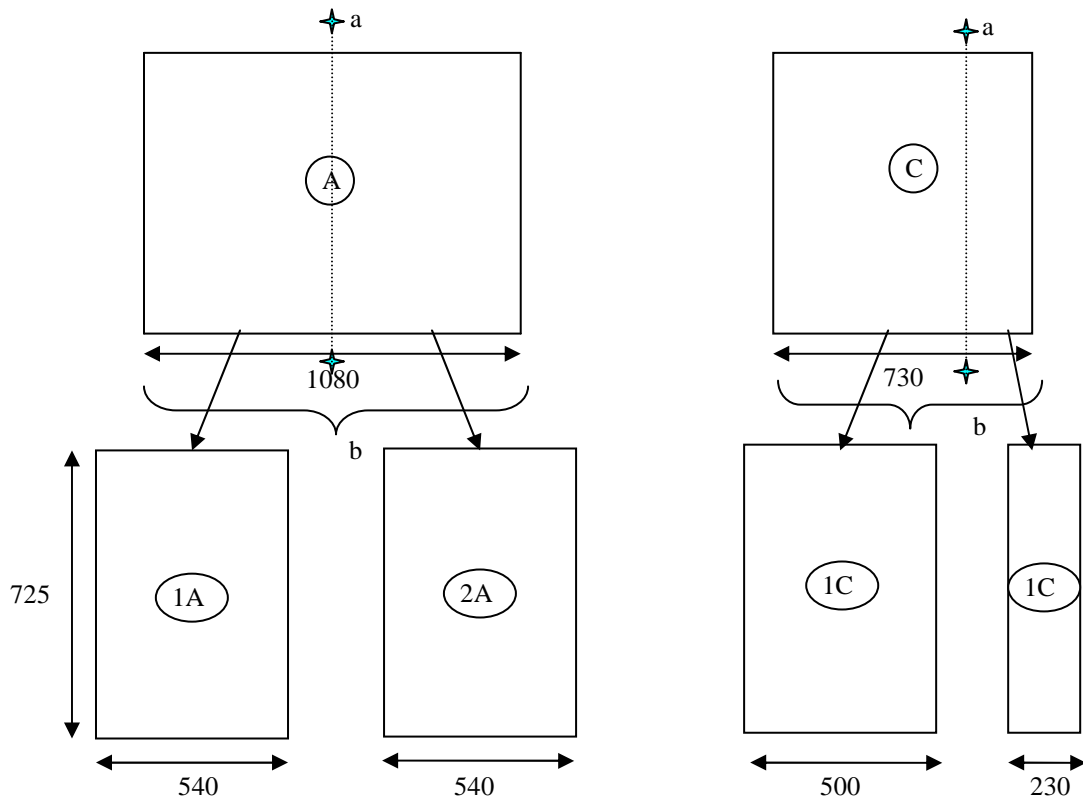


Figure Annexe I) - 17 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 2024 T351. Etape n°2.

Les plaques obtenues à la deuxième découpe sont séparées dans le sens de la longueur, Figure Annexe I) - 18.

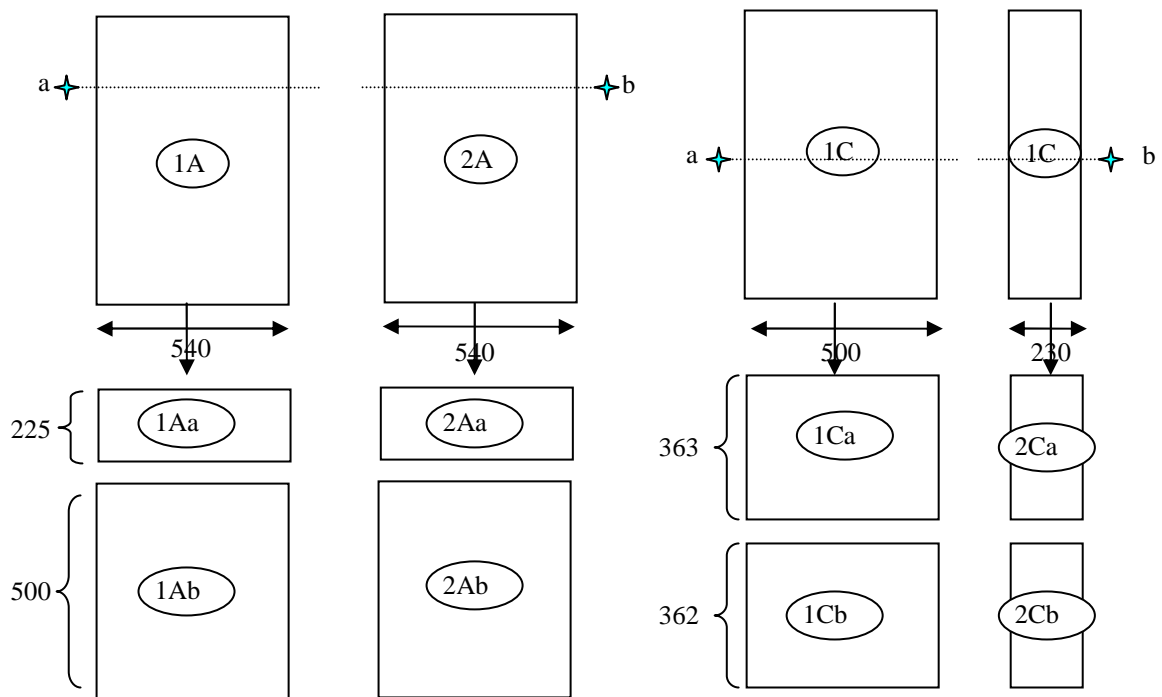


Figure Annexe I) - 18 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 2024 T351. Etape n°3.

Dans chacune des plaques (1Ab) et (2Ab), trois éprouvettes M (T) W = 160 (LT) sont extraites, Figure Annexe I) - 19. Deux M (T) W = 160 (TL) sont réalisées à partir de la (1Ca), ainsi que dans la (1Cb). Les autres plaques sont des chutes dans lesquelles des éprouvettes CT et des éprouvettes de traction sont extraites.

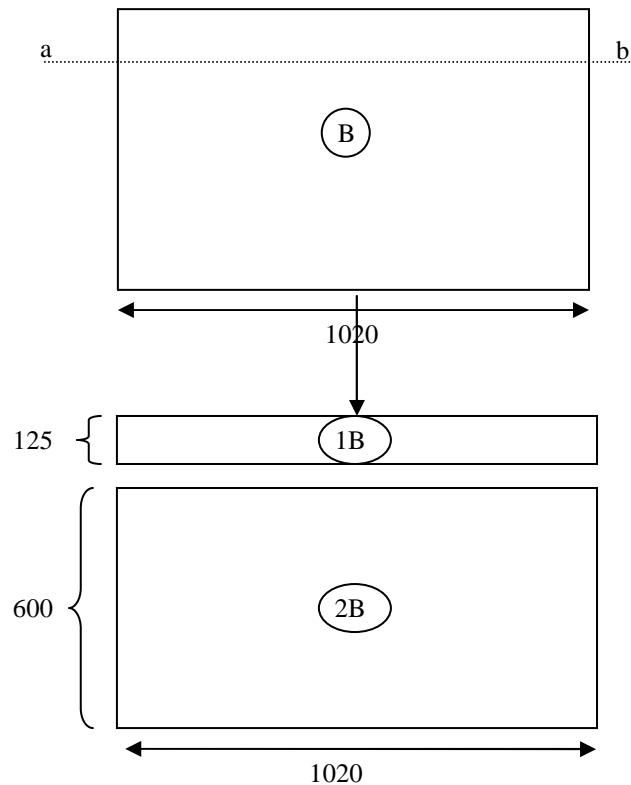


Figure Annexe I) - 19 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage d'aluminium 2024 T351. Etape n°4.

La plaque (2B) donne deux éprouvettes M (T) W = 400 (TL) et deux éprouvettes M (T) W = 160 (TL). Le morceau (1B) servira aussi pour faire des éprouvettes plates de traction, des éprouvettes CT et cylindriques.

3 Alliage de Ti-6Al-V

3-1 Prélèvement des éprouvettes M (T)

Deux éprouvettes M (T) W = 200 sont prélevées dans une plaque de 1000 mm * 790 mm et d'épaisseur 32 mm. Rappelons que les éprouvettes M (T) de l'alliage de titane et de l'acier 15-5PH ne subissent que les essais de courbe R. Les éprouvettes M (T) W = 160 sont donc inutiles.

Comme précédemment, les dimensions des éprouvettes tiennent compte d'un excédent de matière de 20 mm.

Ce paragraphe sert simplement à détailler l'ordre de découpe de la plaque. Les découpes sont toujours réalisées de a vers b.

La plaque principale est scindée en trois parties, Figure Annexe I) - 20. La coupe se fait dans le sens de la largeur.

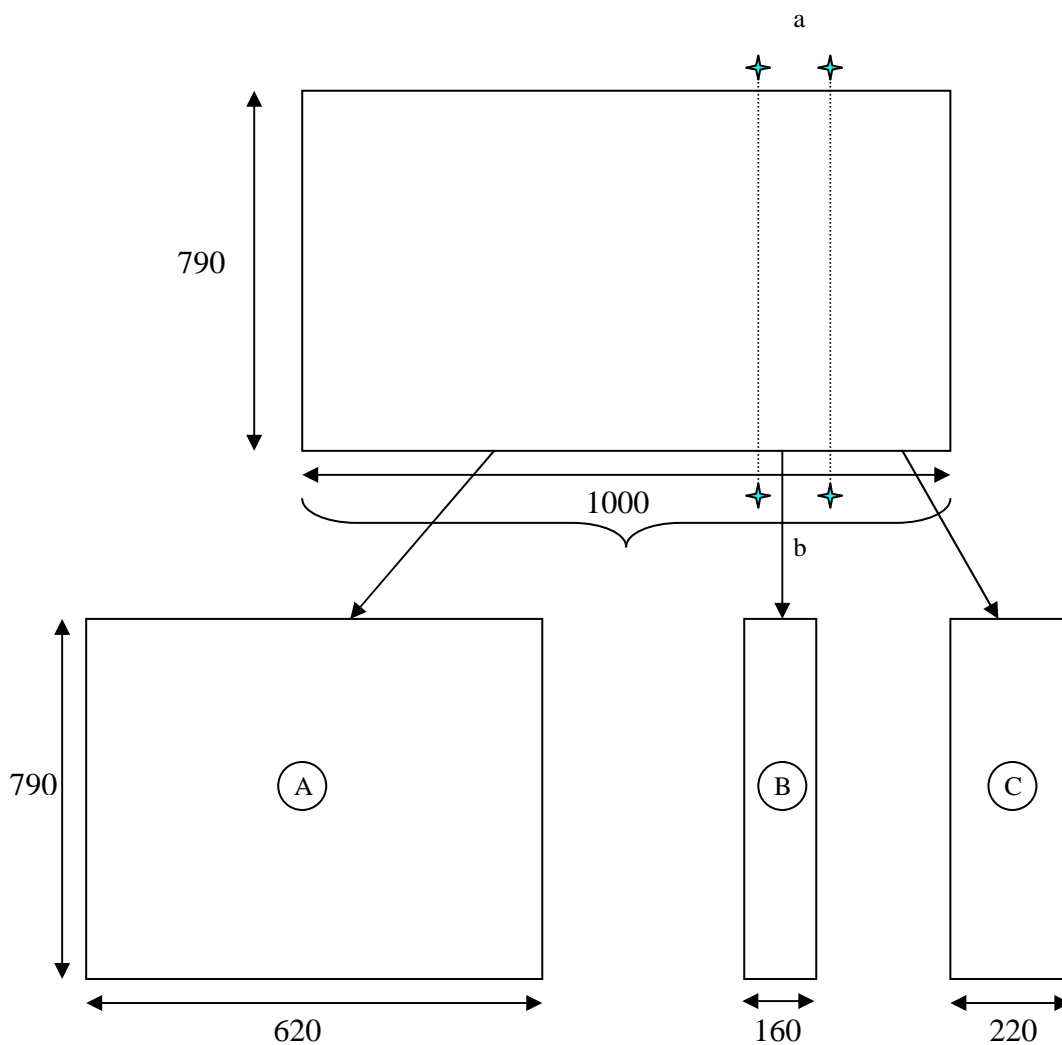


Figure Annexe I) - 20 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage de titane Ti-6Al-V. Etape n°1.

Les plaques obtenues sont découpées dans le sens de la largeur, Figure Annexe I) - 21.

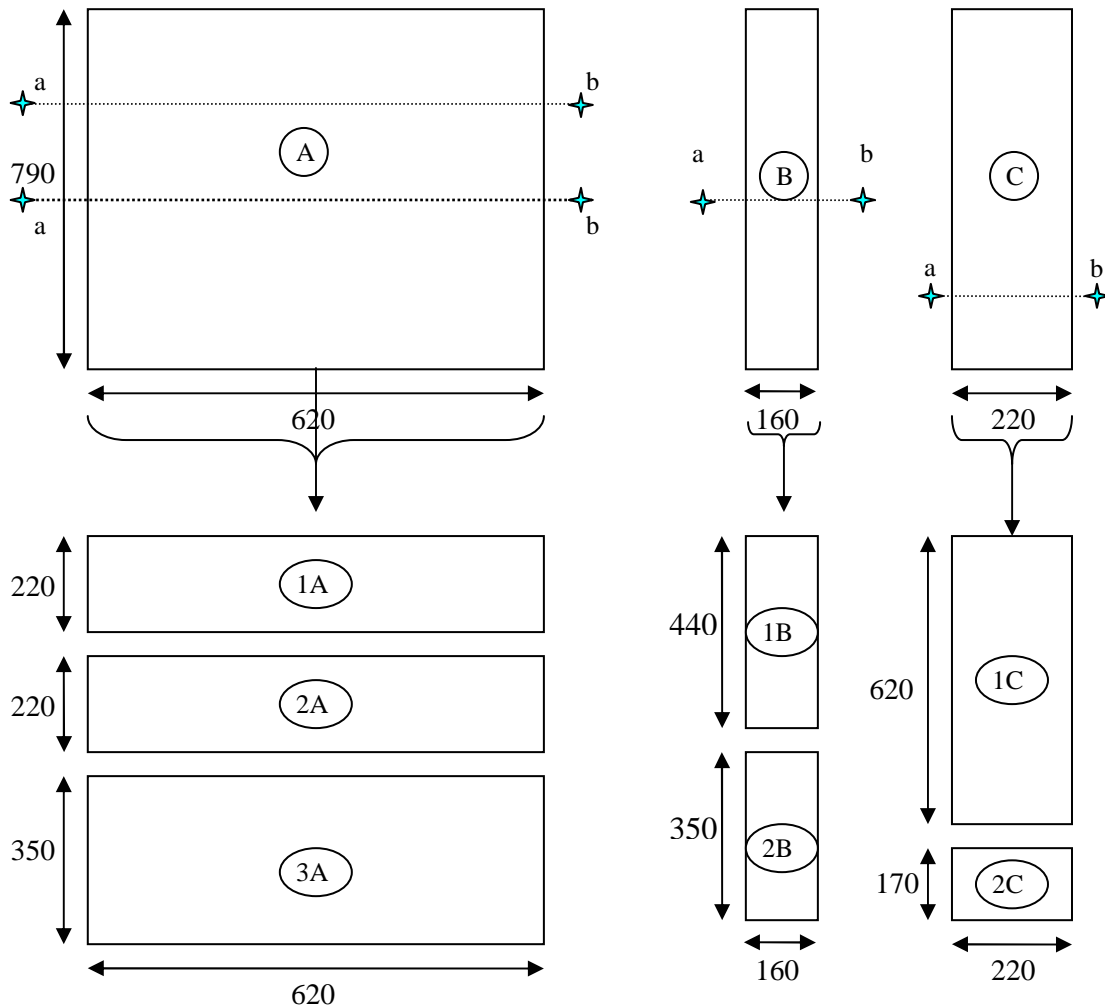


Figure Annexe I) - 21 : Plan de découpe d'une plaque d'alliage de titane Ti-6Al-V. Etape n°2.

Les plaques (1A), (2A) et (1C) sont des éprouvettes M (T) $W = 200$. A partir des sections (3A), (1B), (2B) et (2C), les éprouvettes CT $W = 75$, CT $W = 40$, les éprouvettes plates et cylindriques sont réalisées.

4 Acier 15-5PH

4-1 Prélèvement des éprouvettes M (T)

Deux éprouvettes M (T) $W = 200$ sont prélevées dans une plaque de 1000 mm * 790 mm et d'épaisseur 22 mm. Ce plan de découpe est très proche de celui de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. Les découpes sont réalisées de a vers b.

La plaque principale est scindée en trois parties, Figure Annexe I) - 22. La coupe se fait dans le sens de la largeur.

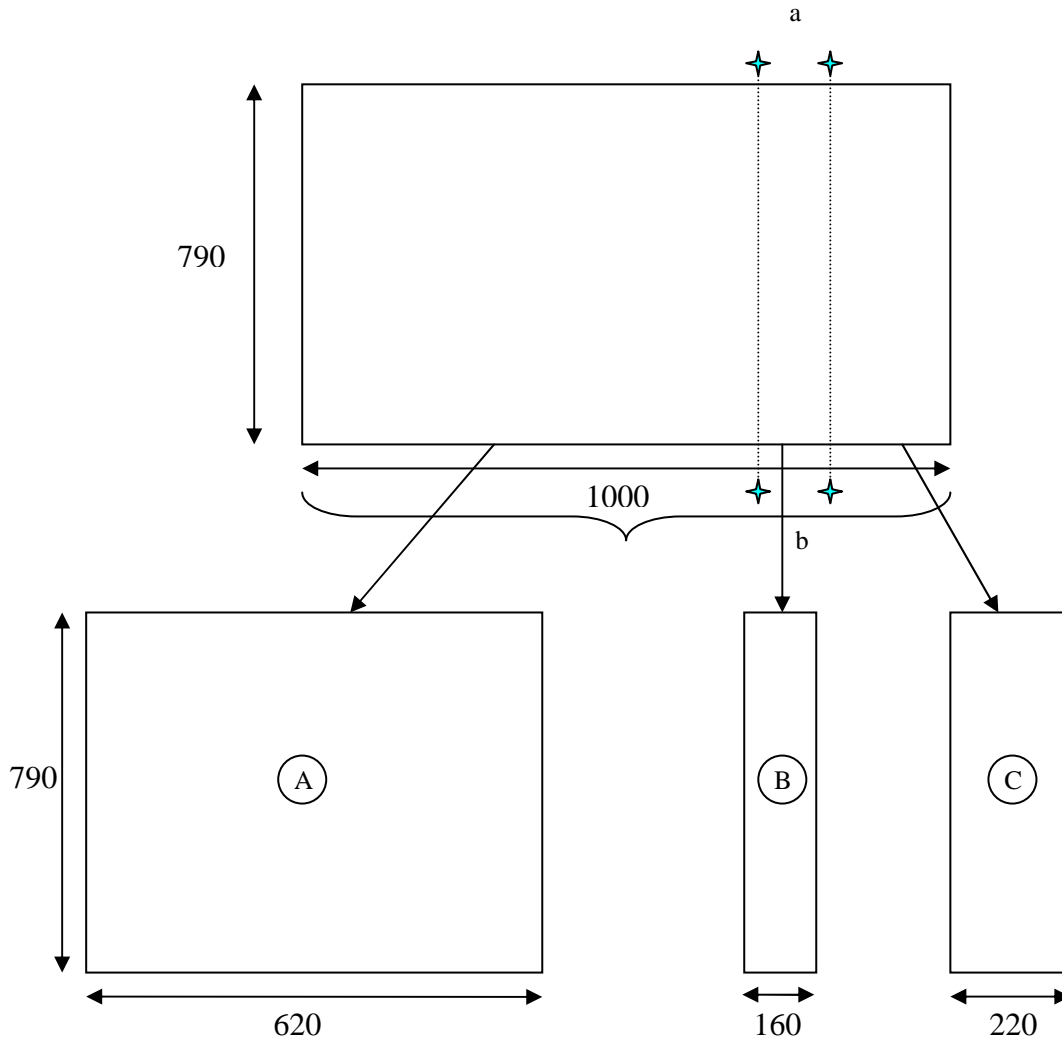


Figure Annexe I) - 22 : Plan de découpe d'une plaque d'acier 15-5PH. Etape n°1.

Les plaques obtenues sont découpées dans le sens de la largeur, Figure Annexe I) - 23.

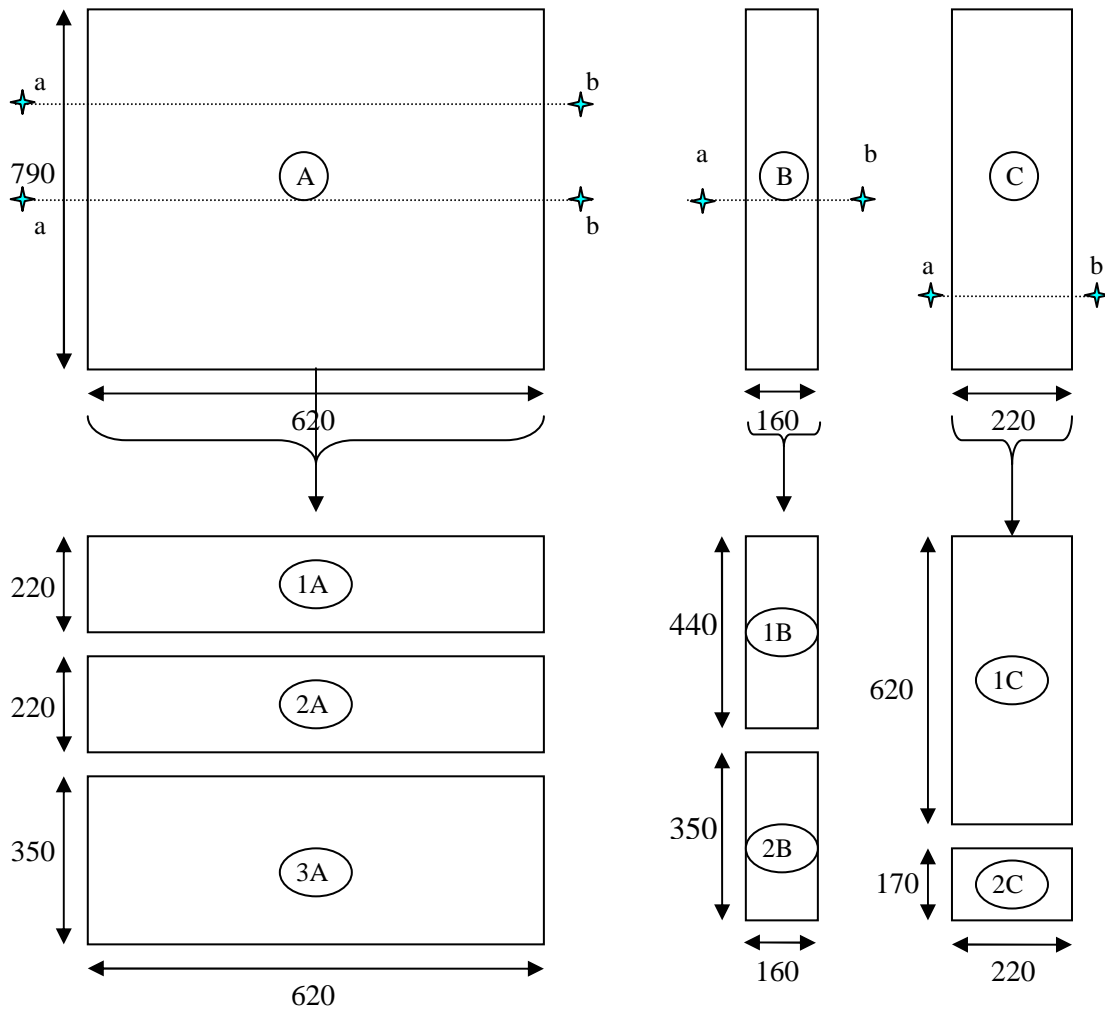


Figure Annexe I) - 23 : Plan de découpe d'une plaque de l'acier 15-5PH. Etape n°2.

Les plaques (1A), (2A) et (1C) sont des éprouvettes M (T) $W = 200$. A partir des sections (3A), (1B), (2B) et (2C) les éprouvettes CT $W = 75$, CT $W = 40$, les éprouvettes plates et cylindriques sont prélevées.

Annexe II : Données expérimentales

Par souci de lisibilité, le chapitre n°2 ne fournit que les résultats expérimentaux pour un matériaux et non pas pour les quatre. Cette partie regroupe donc l'ensemble des courbes expérimentales obtenues durant cette étude sur les quatre matériaux. Elles sont classées par essai et puis par matériau. La présentation des essais et l'interprétation des résultats sont réalisées dans le corps du texte principal, chapitre n°2, et ne sont pas reprises ici.

I) Essais de qualification

1 Essais de ténacité

1-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351

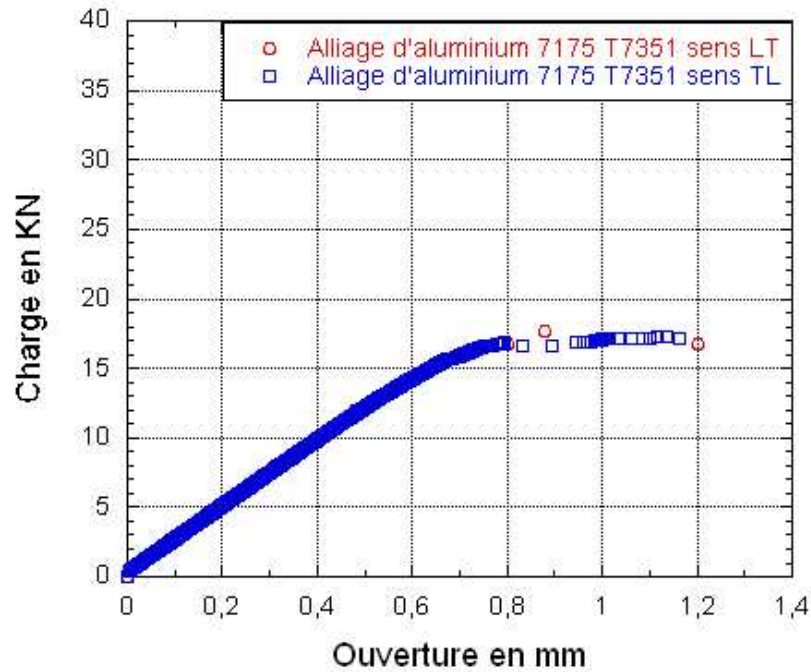


Figure Annexe II) - 1 : Courbes des essais de ténacité réalisés sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans les sens de prélèvement LT et TL.

1-2 Alliage d'aluminium 2024 T351

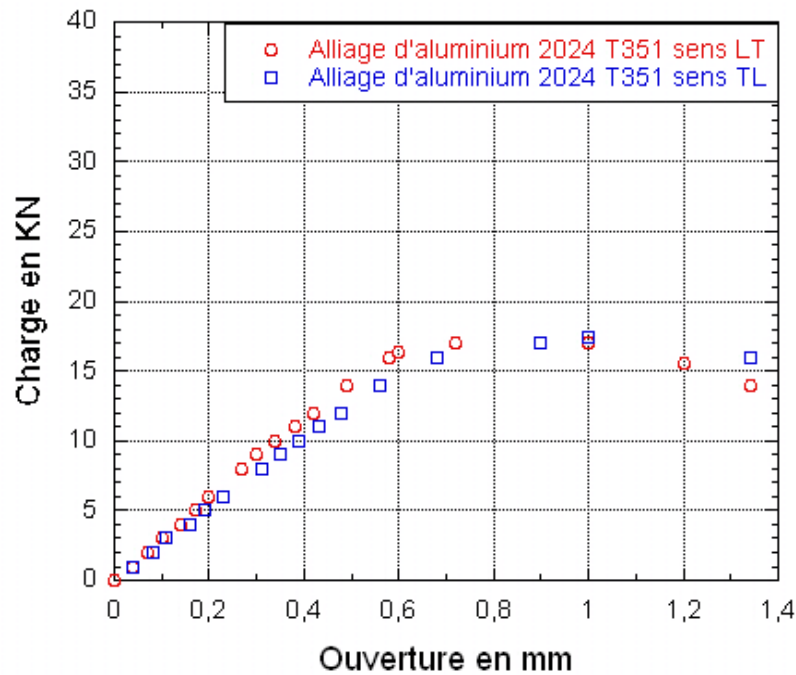


Figure Annexe II) - 2 : Courbes des essais de ténacité réalisés sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans les sens de prélèvement LT et TL.

1-3 Alliage Ti-6Al-4V

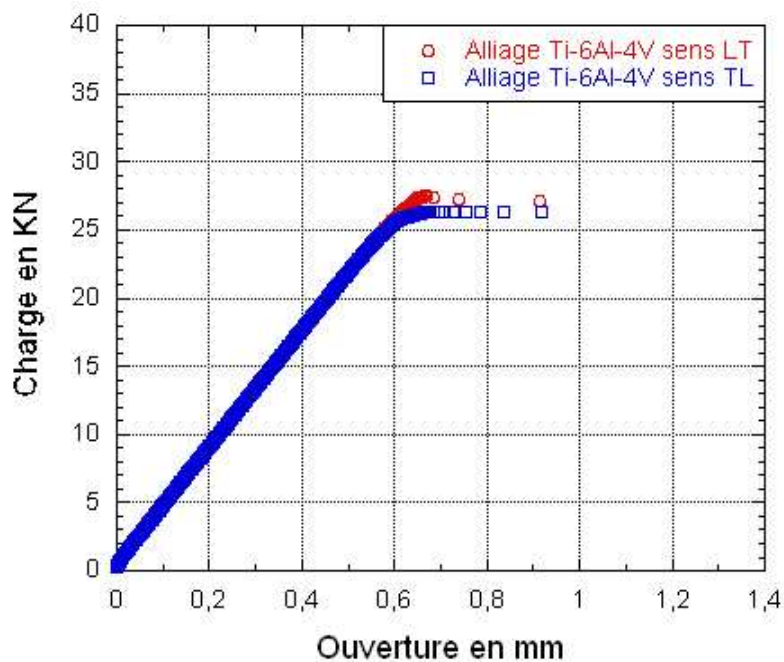


Figure Annexe II) - 3 : Courbes des essais de ténacité réalisés sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans les sens de prélèvement LT et TL.

1-4 Résultats

Tableau Annexe II) - 1 : Valeurs de la ténacité pour les alliages d'aluminiums et l'alliage de Ti-6Al-4V.

	K_{IC} en $MPa\sqrt{m}$		
	Alliage d'aluminium 7175 T7351	Alliage d'aluminium 2024 T351	Ti-6Al-4V
Sens LT	$36,2 \pm 0.4$	37 ± 0.7	60.4 ± 1
Sens TL	$35,7 \pm 0.6$	$37,2 \pm 0.3$	61.4 ± 0.5

2 Essais de Courbe R

2-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351

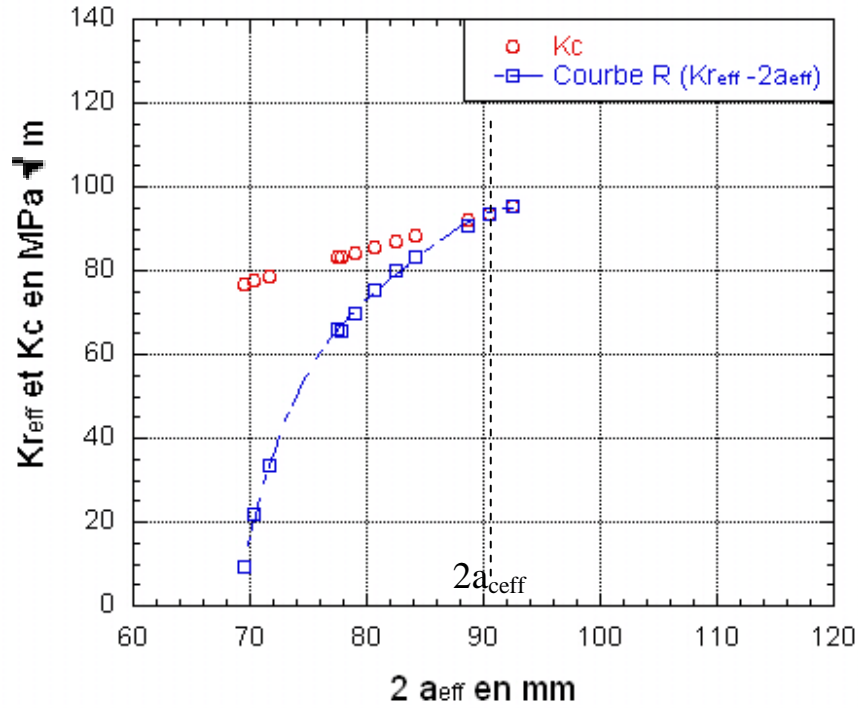


Figure Annexe II) - 4 : Courbe R réalisée sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT. Eprouvette M (T) W = 200.

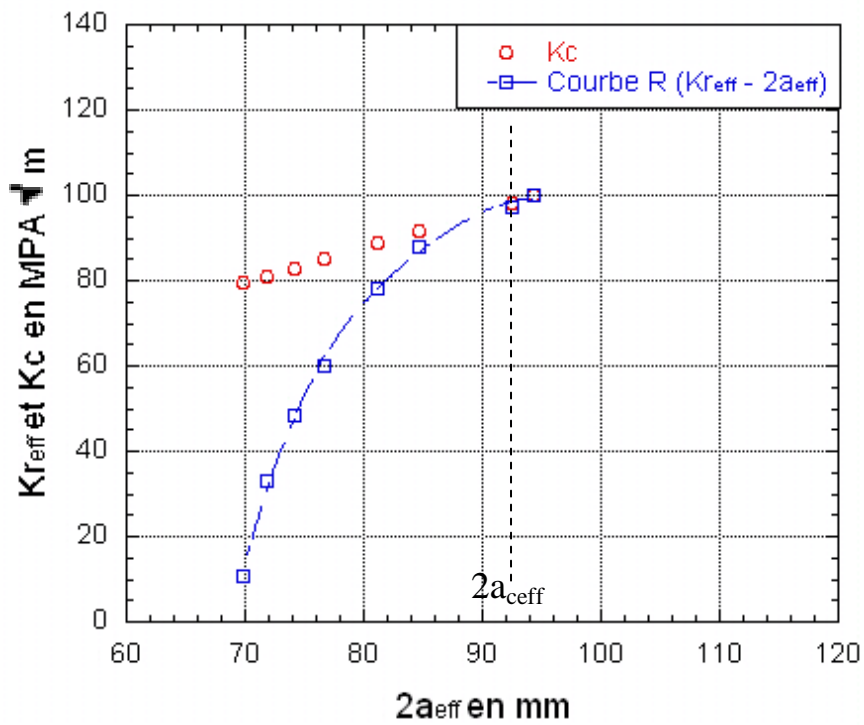


Figure Annexe II) - 5 : Courbe R réalisée sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens TL. Eprouvette M (T) W = 200.

2-2 Alliage d'aluminium 2024 T351

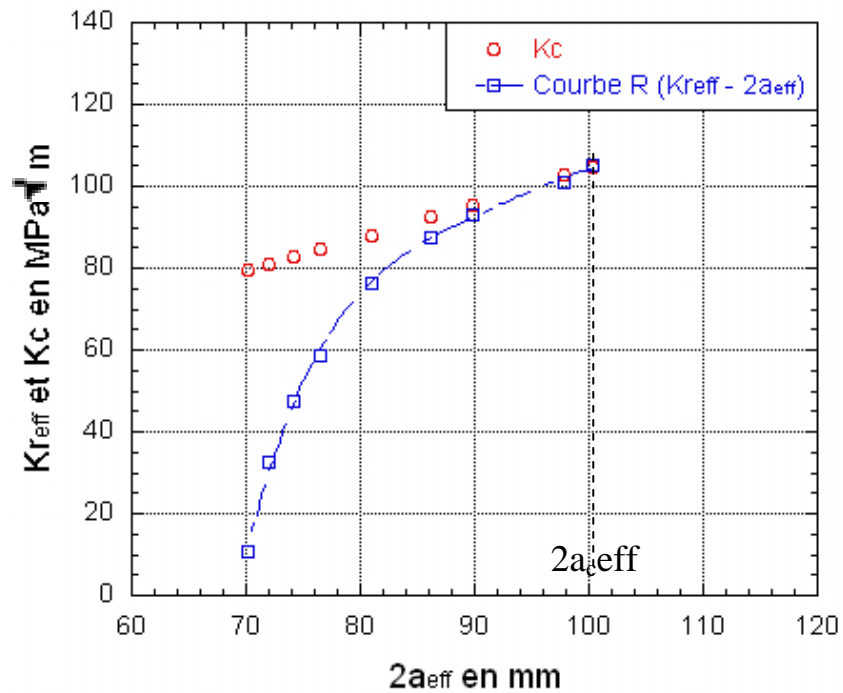


Figure Annexe II) - 6 : Courbe R réalisée sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens LT. Epreuve M (T) W = 200.

2-3 Alliage Ti-6Al-4V

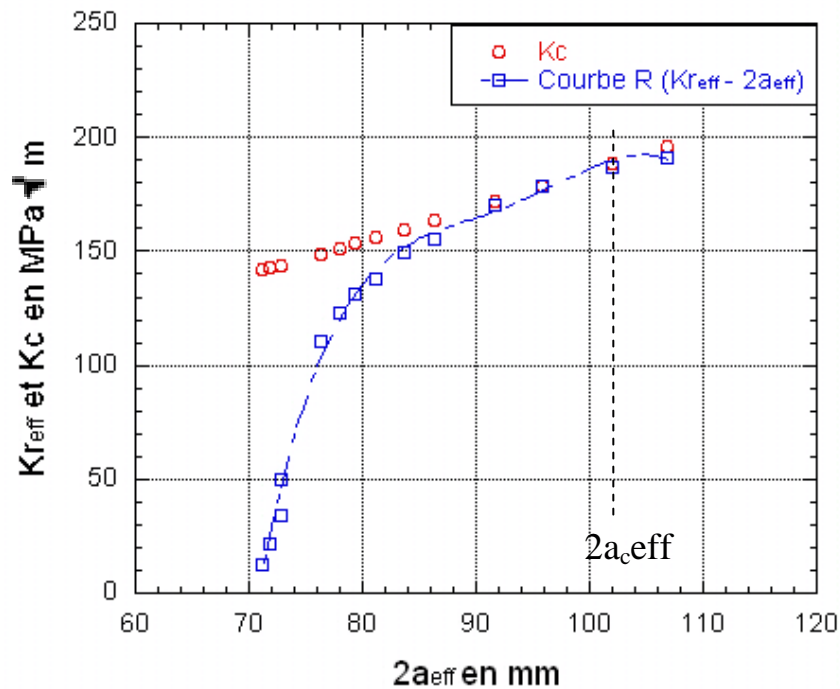


Figure Annexe II) - 7 : Courbe R réalisée sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens LT. Epreuve M (T) W = 200.

2-4 Aciers 15-5PH

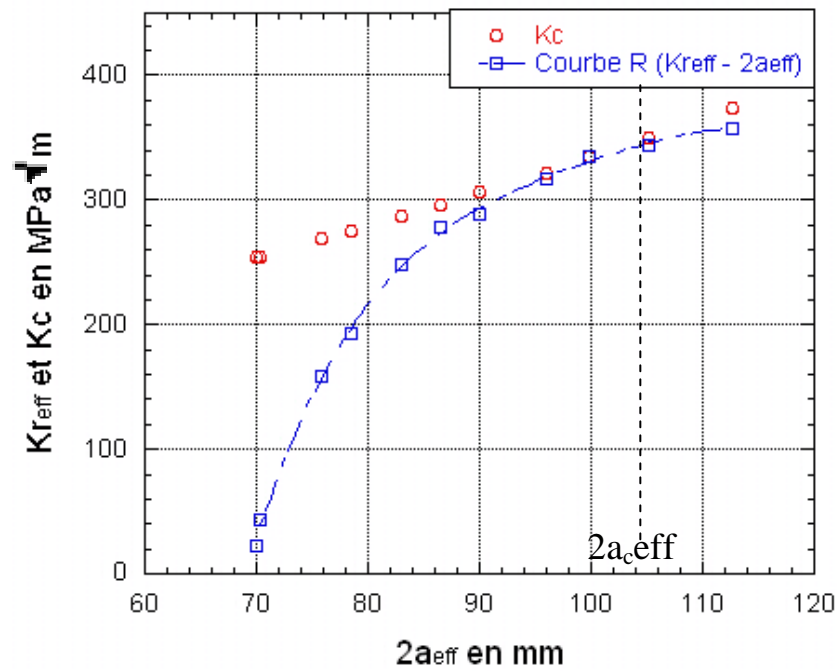


Figure Annexe II) - 8 : Courbe R réalisée sur l'acier 15-5PH dans le sens LT.

Eprouvette M (T) W = 200

2-5 Valeurs de K_c Tableau Annexe II) - 2 : Valeurs de K_c .

	Alliage d'aluminium 7175 T7351		Alliage d'aluminium 2024	Ti-6Al-4V	15-5PH
	LT	TL	LT	LT	LT
K_c en $MPa\sqrt{m}$	95,5	100,1	105	178,4	334,7
$2a_{ceff}$ en mm	92,5	94,4	100,3	95,9	99,9

Les valeurs de K_c sont bien supérieures pour les deux alliages à haute résistance par rapport aux alliages d'aluminium comme pour les essais de ténacité. Toutefois, la détermination de K_c des alliages d'aluminium peut être critiquée par le fait que c'est le dernier point de mesure qui permet son obtention.

3 Essais de propagation de fissure à fort ΔK

3-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351

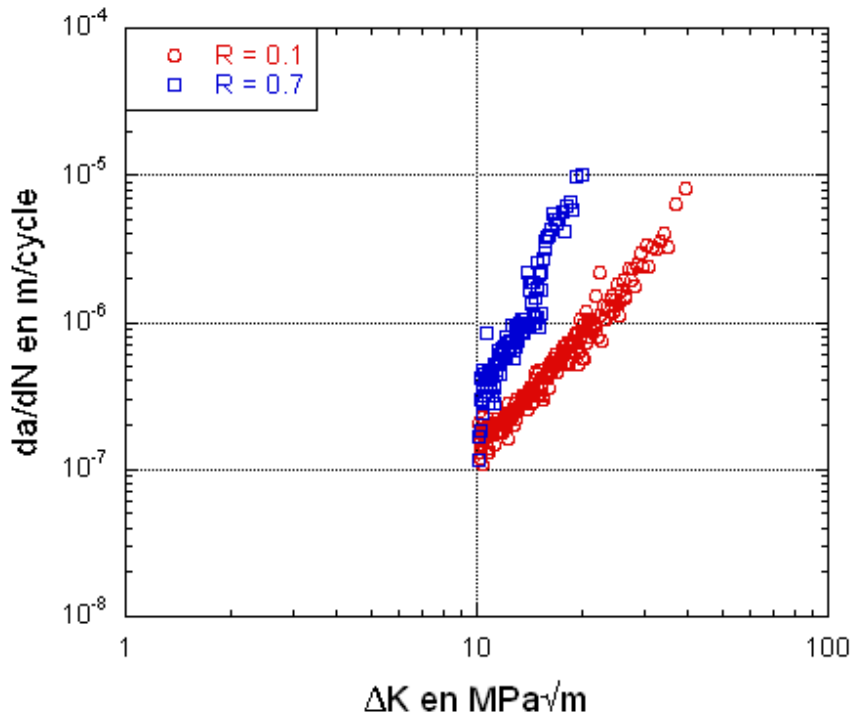


Figure Annexe II - 9 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

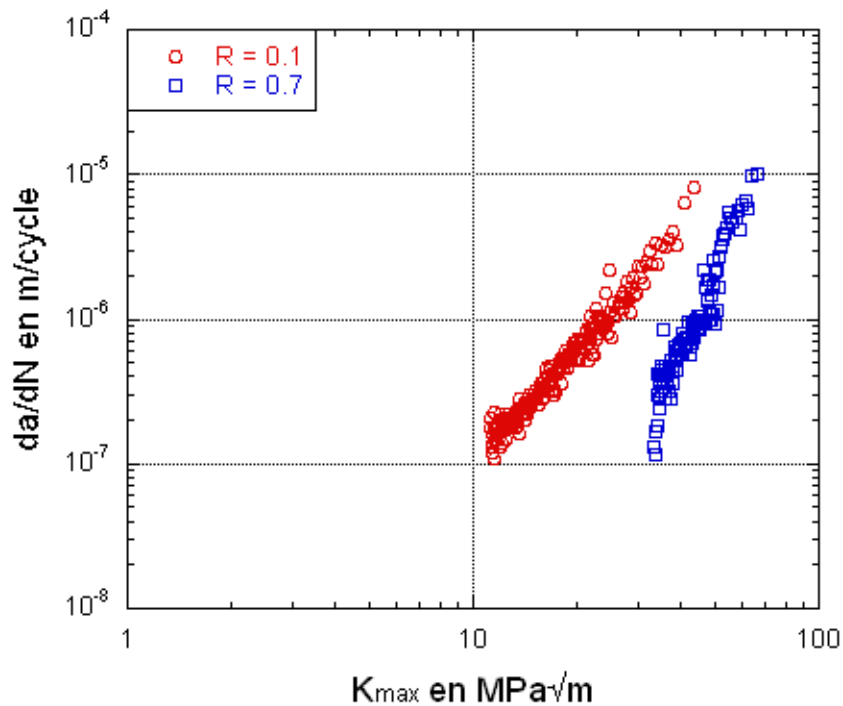


Figure Annexe II - 10 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

Les courbes sont moins précises que dans le corps du texte car elles ont été obtenues à partir d'une mesure optique et non pas à partir d'un relevé informatique effectué par le capteur COD. A faible

valeur de ΔK , les courbes $\frac{da}{dN}$ à $R = 0.1$ et $R = 0.7$ confondues, Figure Annexe II) - 9. Nous en déduisons que le paramètre ΔK contrôle l'essai à faible vitesse de propagation de fissure. A fort ΔK , la conclusion est moins satisfaisante car les courbes $\frac{da}{dN}$ à $R = 0.1$ et $R = 0.7$ se rapprochent mais ne coïncident pas, Figure Annexe II) - 10. Donc K_{max} n'est pas le seul paramètre qui pilote l'essai à forte vitesse de propagation de fissure. Deux mécanismes coexistent, décrits au chapitre n°2 I) 3-3.

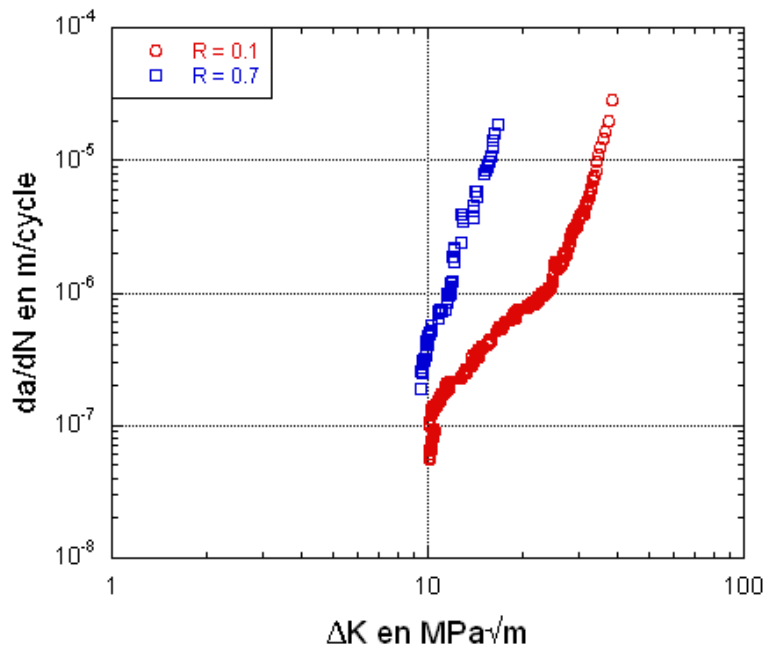


Figure Annexe II) - 11 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

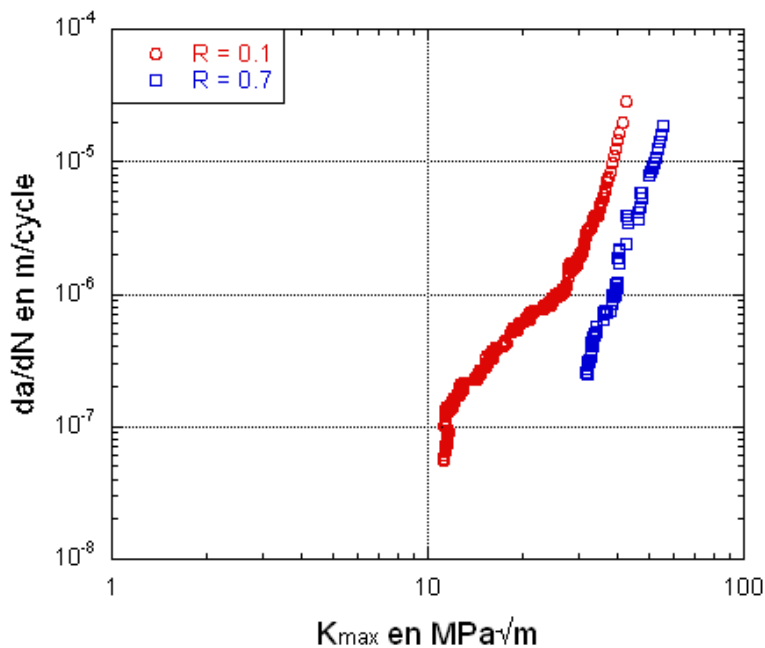


Figure Annexe II) - 12 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

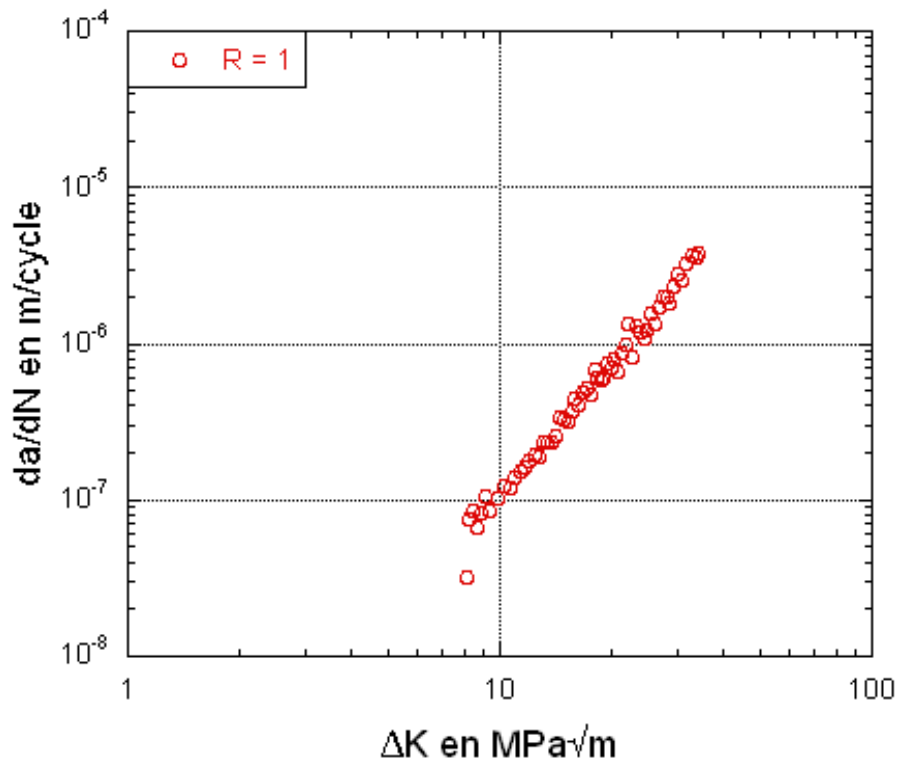


Figure Annexe II – 13 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes M (T) $W = 160$.

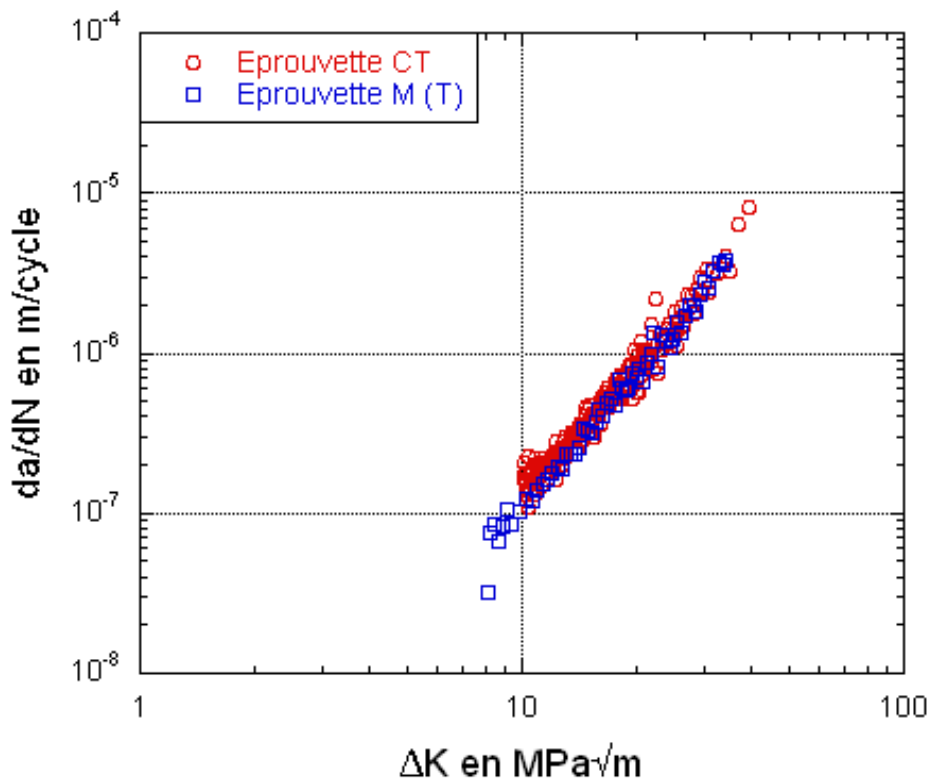


Figure Annexe II) - 14 : Comparaison des essais sur des éprouvettes CT et M (T) pour l'alliages d'aluminiums 7175 T7351 sens LT à $R = 0,1$.

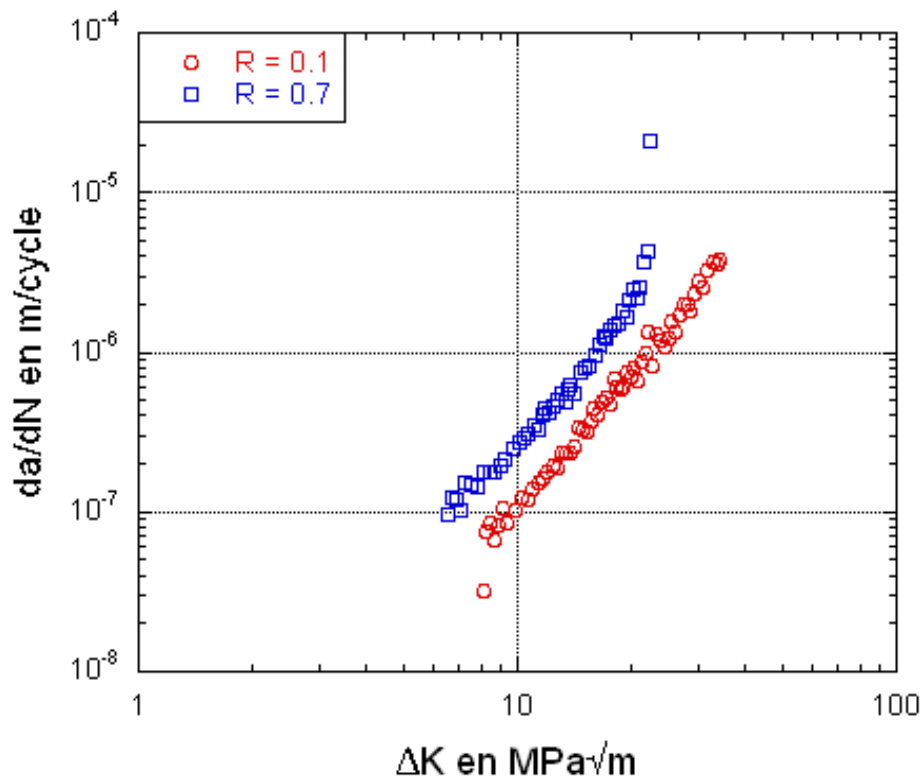


Figure Annexe II) - 15 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes M (T) $W = 200$.

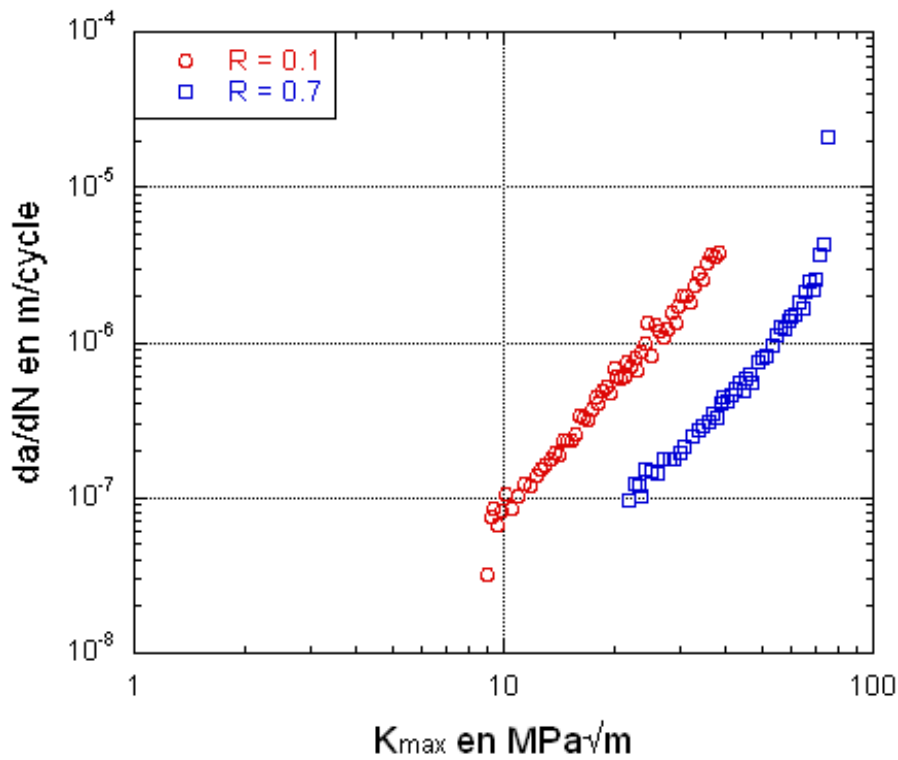


Figure Annexe II) - 16 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT réalisés sur des éprouvettes M (T) $W = 200$.

Les conclusions faites pour les essais réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$, vis-à-vis des paramètres influençant l'essai de propagation de fissure à fort ΔK , ne s'appliquent pas aux essais sur M (T) car les courbes $\frac{da}{dN}$ à $R = 0.1$ et $R = 0.7$ sont très écartées. La présence de fermeture peut en être la cause.

3-2 Alliage d'aluminium 2024 T351

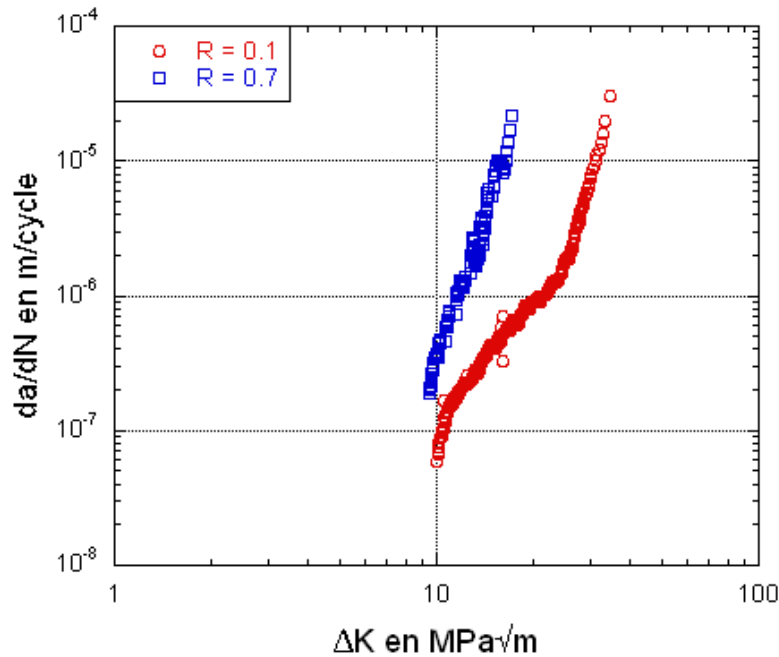


Figure Annexe II) - 17 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

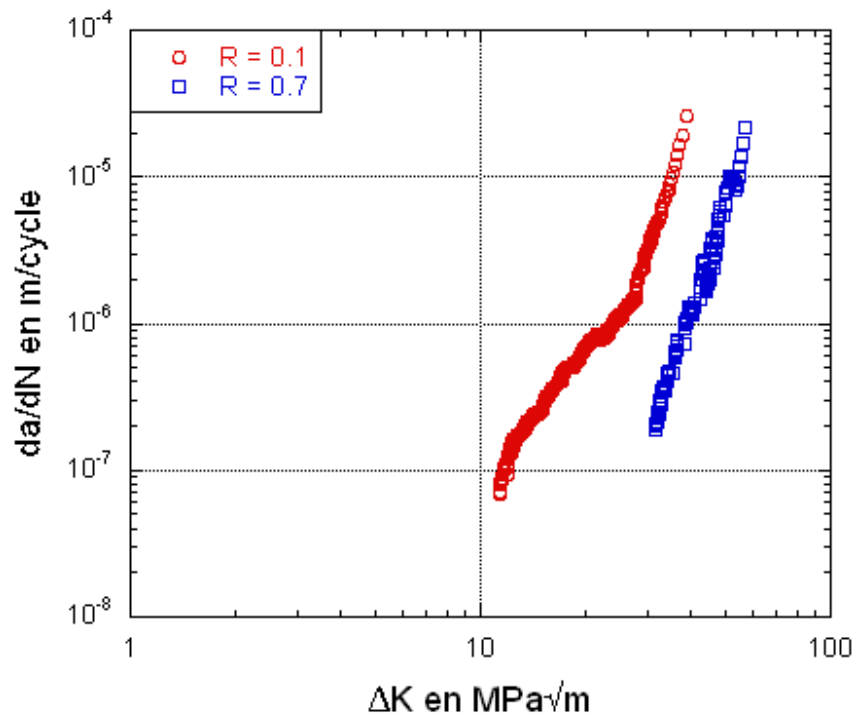


Figure Annexe II) - 18 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

L'effet de K_{\max} est moins marqué pour ce matériau que le cas précédant car les courbes sont plus écartées sur la Figure Annexe II) - 18 que sur la Figure Annexe II) - 10.

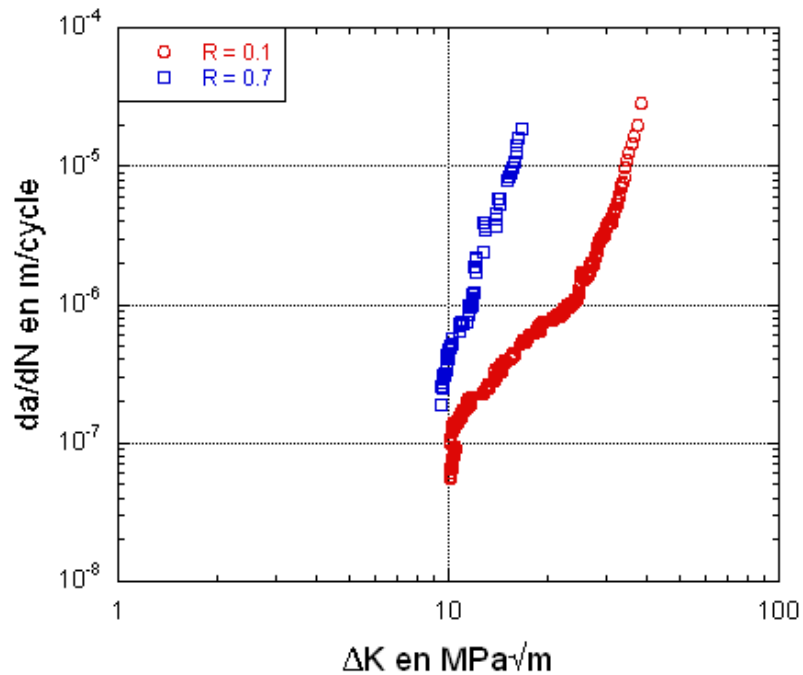


Figure Annexe II) - 19 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

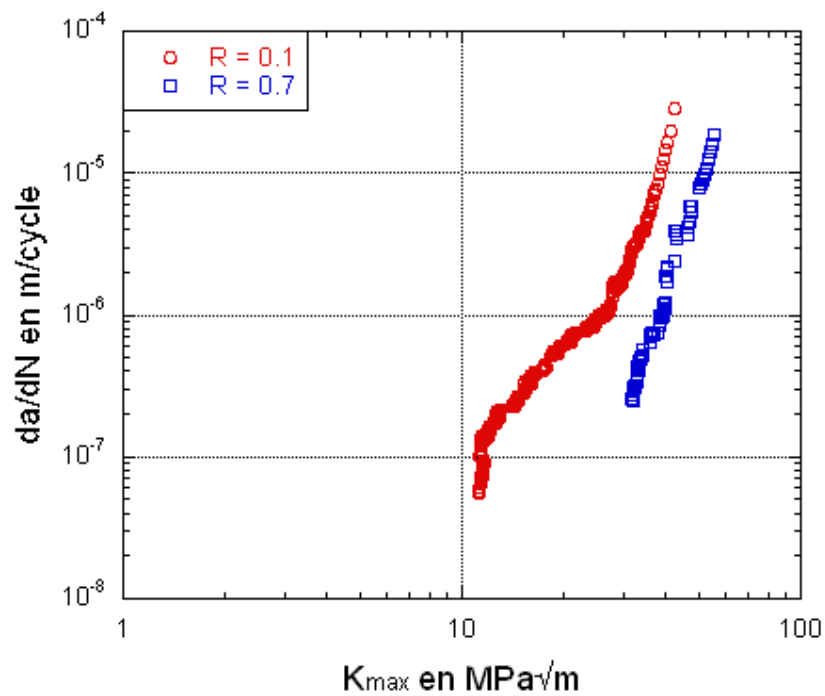


Figure Annexe II) - 20 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{\max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

Annexe II : Données expérimentales

Des différences apparaissent entre les sens de prélèvement LT et TL. Certes, elles restent faibles mais il est intéressant de noter que ce matériau présente les plus grandes variations entre les sens LT et TL.

Sur la Figure Annexe II) - 20, les courbes $\frac{da}{dN}$ à $R = 0.1$ et $R = 0.7$ sont confondues à forte valeur de ΔK . L'influence de K_{max} est plus marquée pour cet alliage.

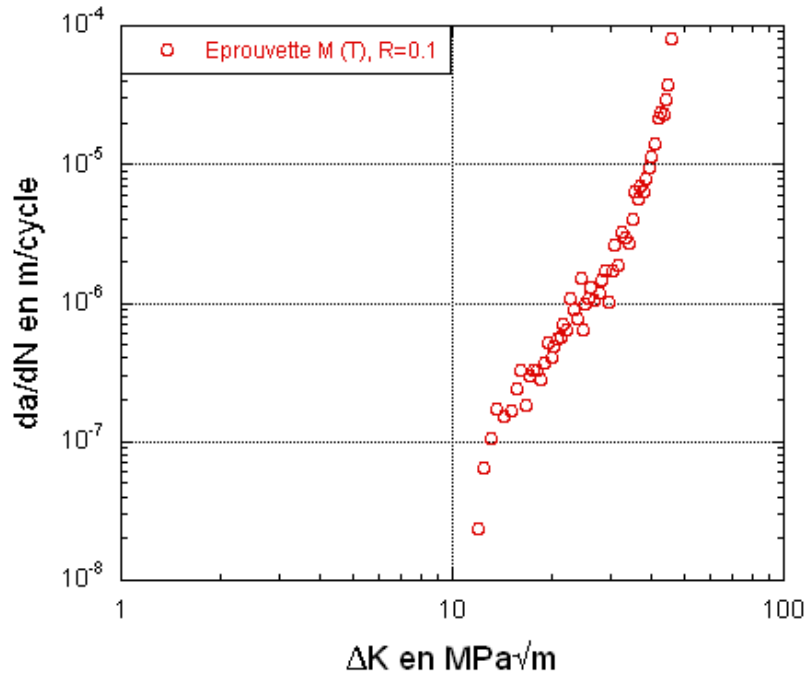


Figure Annexe II) – 21 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT réalisés sur des éprouvettes M (T) $W = 160$.

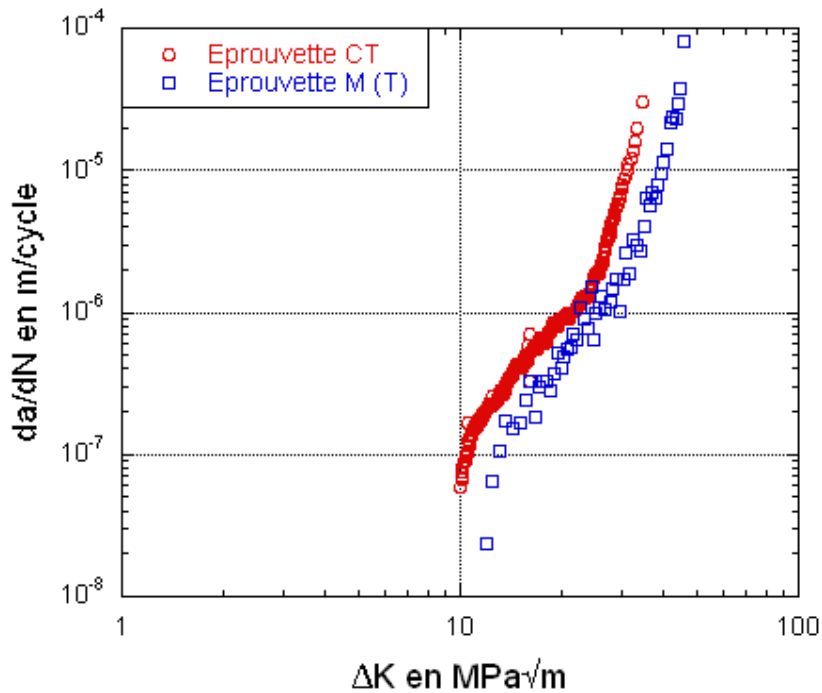


Figure Annexe II) - 22 : Comparaison des essais sur des éprouvettes CT et M (T) pour l'alliages d'aluminiums 2024 T351 sens LT à $R = 0,1$.

3-3 Alliage Ti-6Al-4V

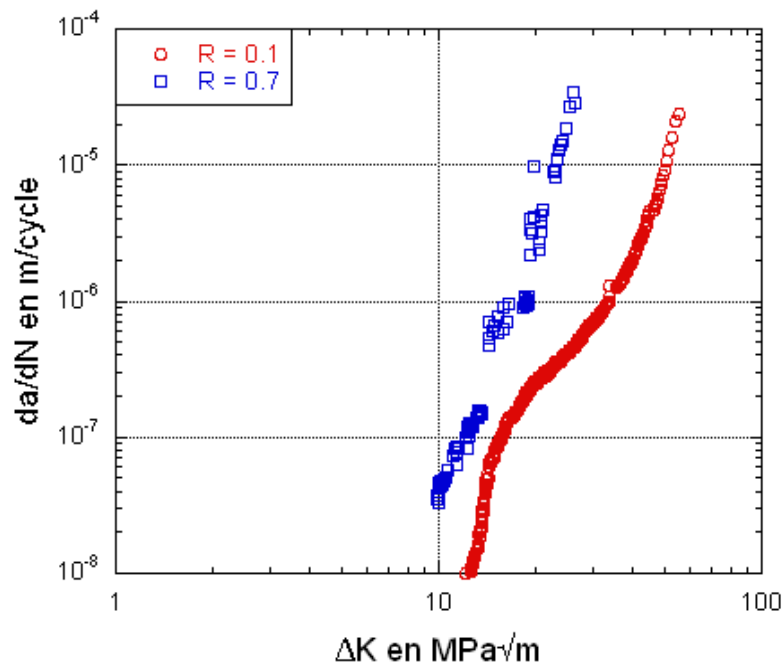


Figure Annexe II) - 23 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

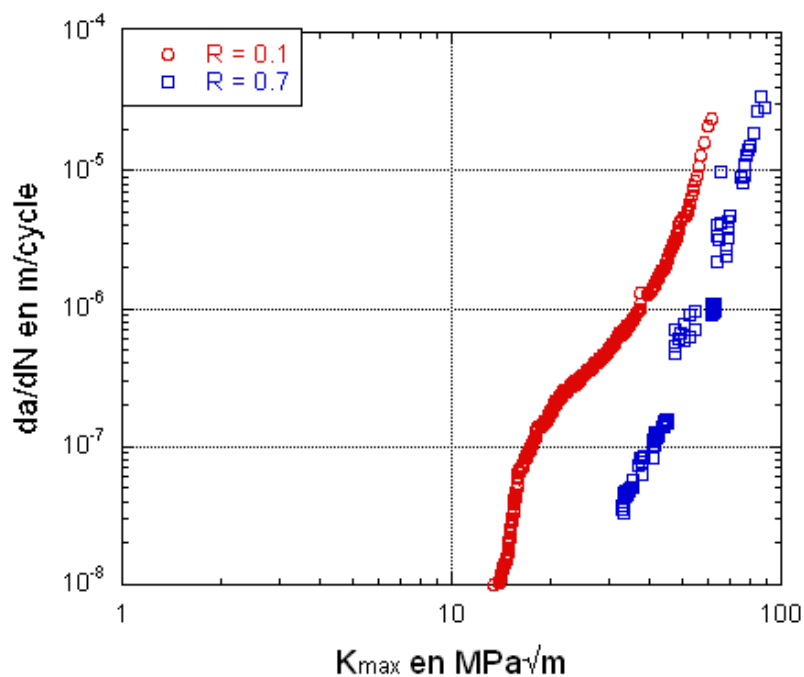


Figure Annexe II) - 24 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

La Figure Annexe II) - 24 ne permet pas de conclure sur l'effet de K_{max} pour l'alliage Ti-6Al-4V dans le sens LT. Cette courbe a été obtenue à partir de mesure optique à l'aide d'une binoculaire. Elle n'est pas assez précise. Il est nécessaire d'étudier la courbe dans le sens TL.

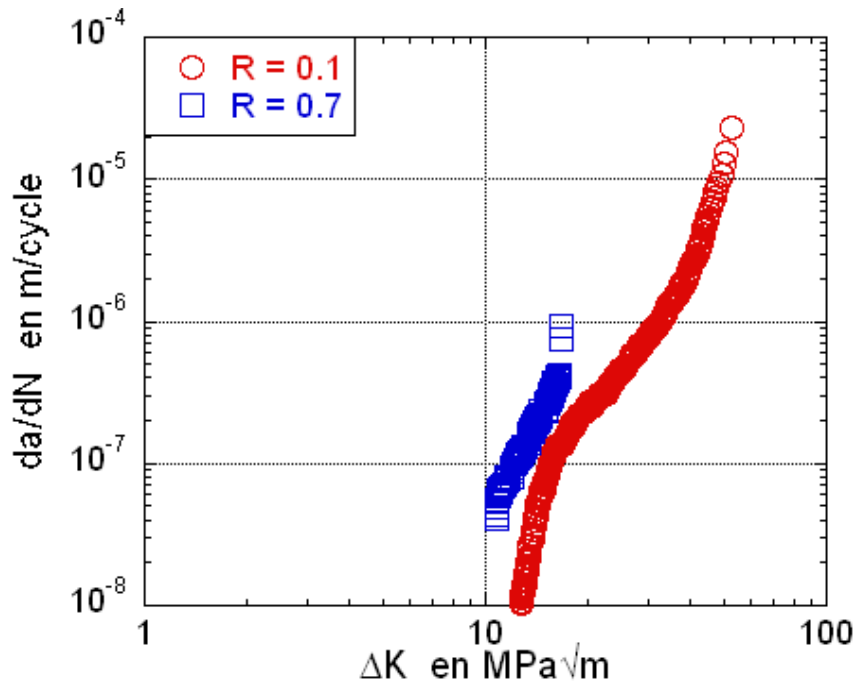


Figure Annexe II) - 25 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

Un écart important apparaît entre les deux courbes pour le sens TL, Figure Annexe II) - 25 et Figure Annexe II) - 26. A faible et forte valeur de ΔK , les courbes ne coïncident pas. Dans aucun cas, un mécanisme n'intervient seul. Ce résultat s'éloigne des observations sous MEB, annexe III, où deux types de surface sont visibles sur les surfaces de rupture, comme pour les trois autres matériaux.

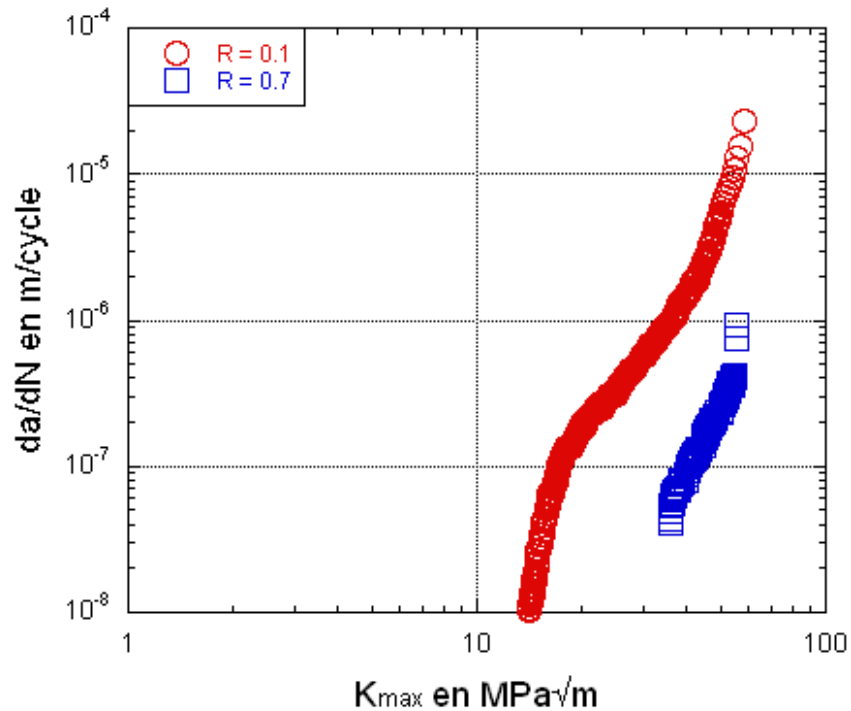


Figure Annexe II) - 26 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

3-4 Acier 15-5PH

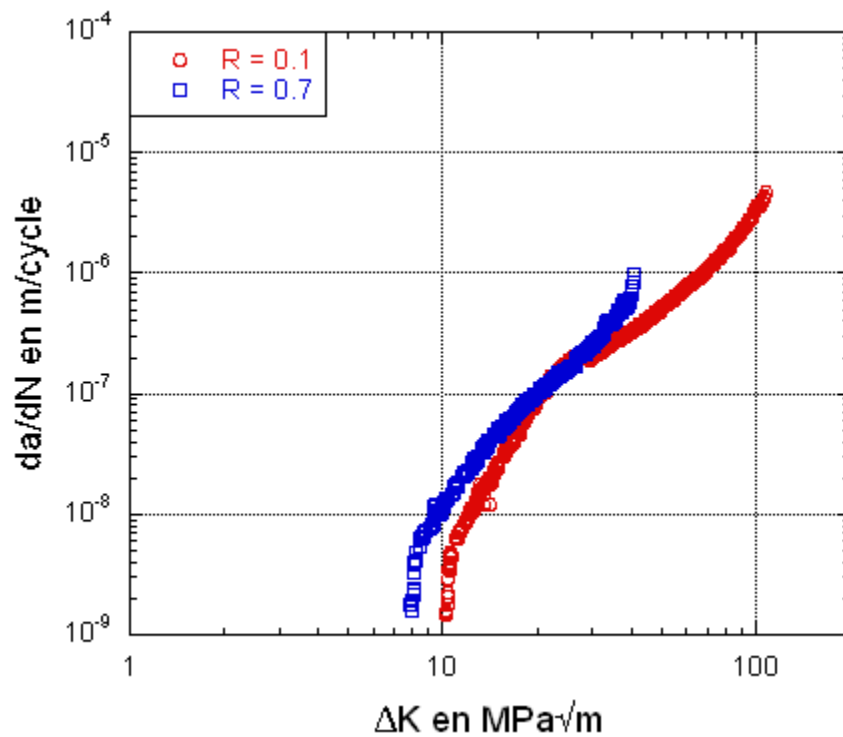


Figure Annexe II) - 27 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'acier 15-5PH sens LT réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

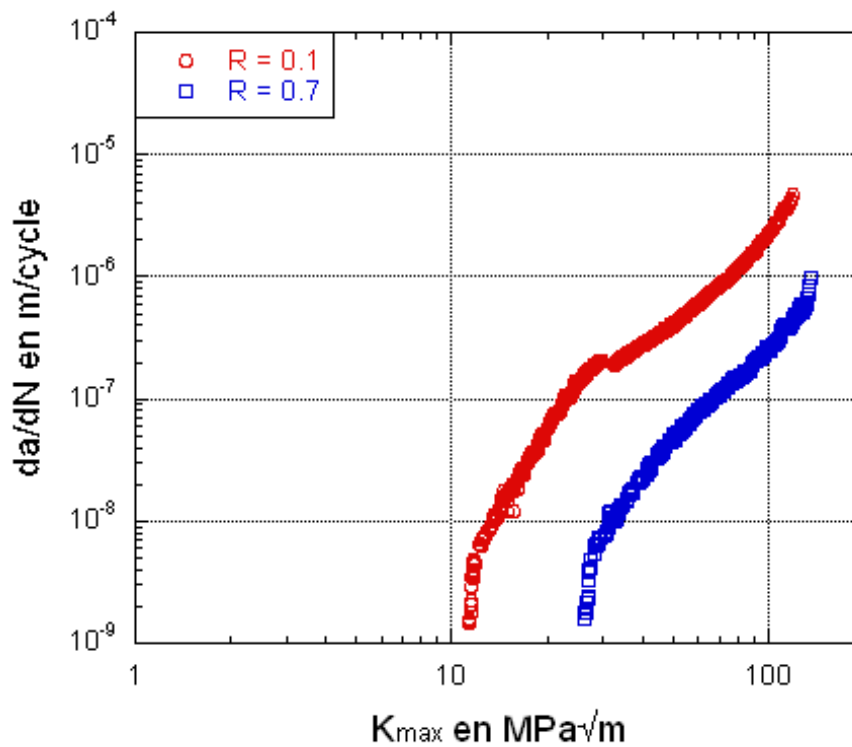


Figure Annexe II) - 28 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'acier 15-5PH sens LT réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

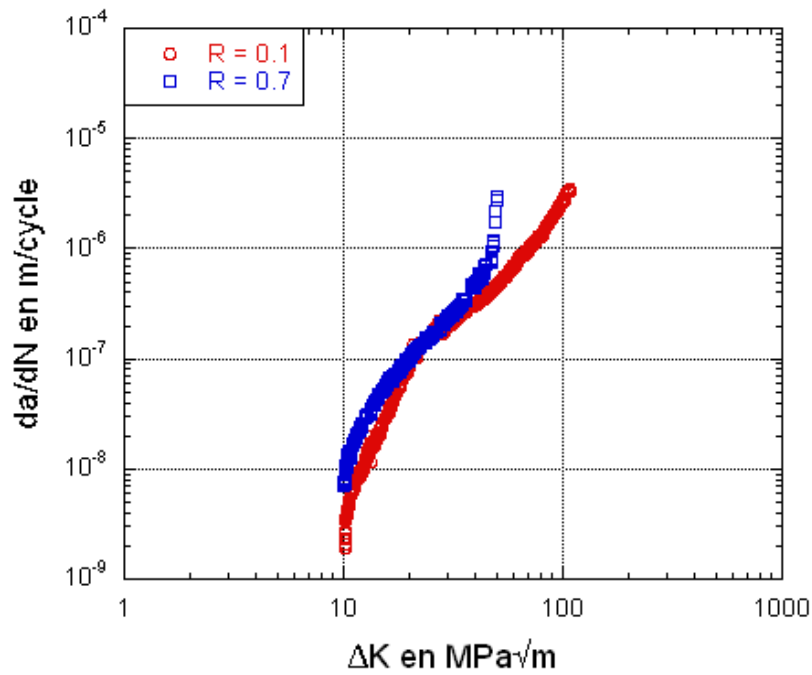


Figure Annexe II) - 29 : Courbes de propagation da/dN en fonction de ΔK à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'acier 15-5PH sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

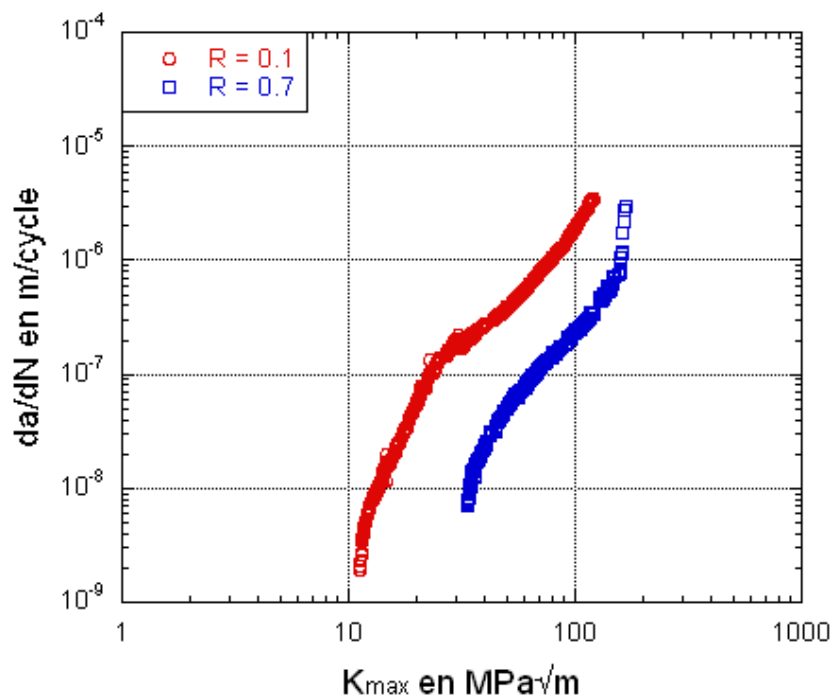


Figure Annexe II) - 30 : Courbes de propagation da/dN en fonction de K_{max} à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sur l'acier 15-5PH sens TL réalisés sur des éprouvettes CT $W = 75$.

La Figure Annexe II) - 29 montre que les courbes $\frac{da}{dN}$ à $R = 0,1$ et $R = 0,7$ sont proche tout au long de l'essai même si un écart apparaît à la toute fin. Ainsi, l'effet de ΔK est plus prononcé que celui de K_{max} . Cette remarque concorde avec les observations faites en annexe III, où les faciès de quasi-clivage perdurent plus longtemps que pour les trois autres matériaux.

II) Essais d'identification

1 Comportement cyclique

1-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351

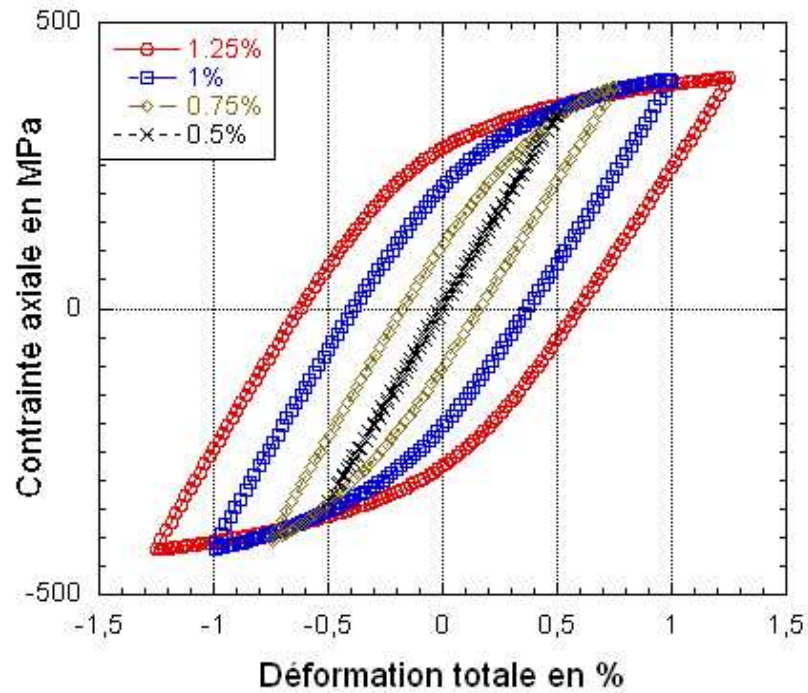


Figure Annexe II) - 31 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT.

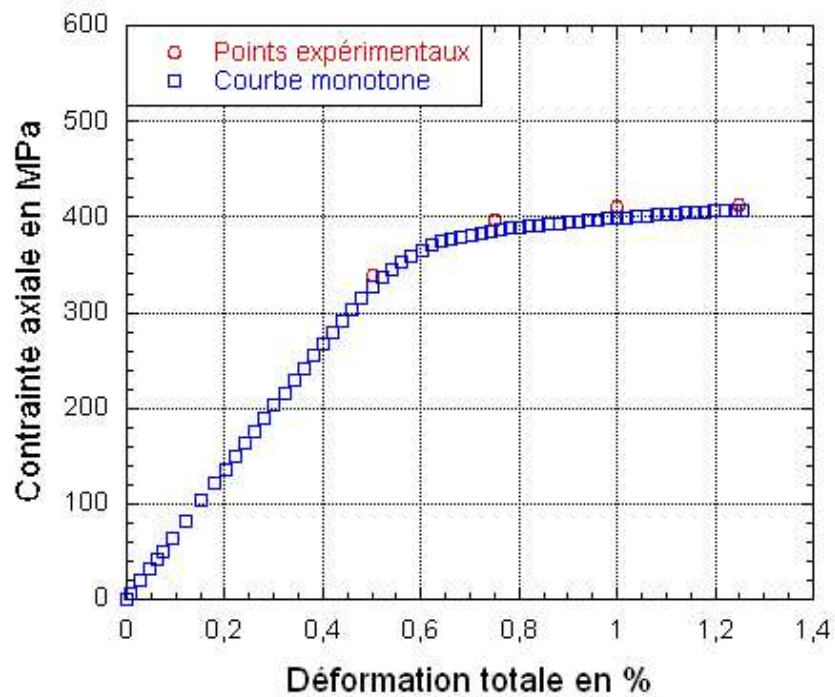


Figure Annexe II) - 32 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT.

Annexe II : Données expérimentales

Les deux courbes sont proches. La Figure Annexe II) - 32 tend à montrer que l'alliage d'aluminium 7175 T7351 à un comportement durcissant. Il est difficile d'en déduire réellement le comportement cyclique de cet alliage car la détermination des paramètres d'écroutissage isotrope laisse à penser que le matériau adoucit au cours de l'essai, Figure Annexe II) - 33. La frontière entre les deux comportements est très mince pour cet alliage.

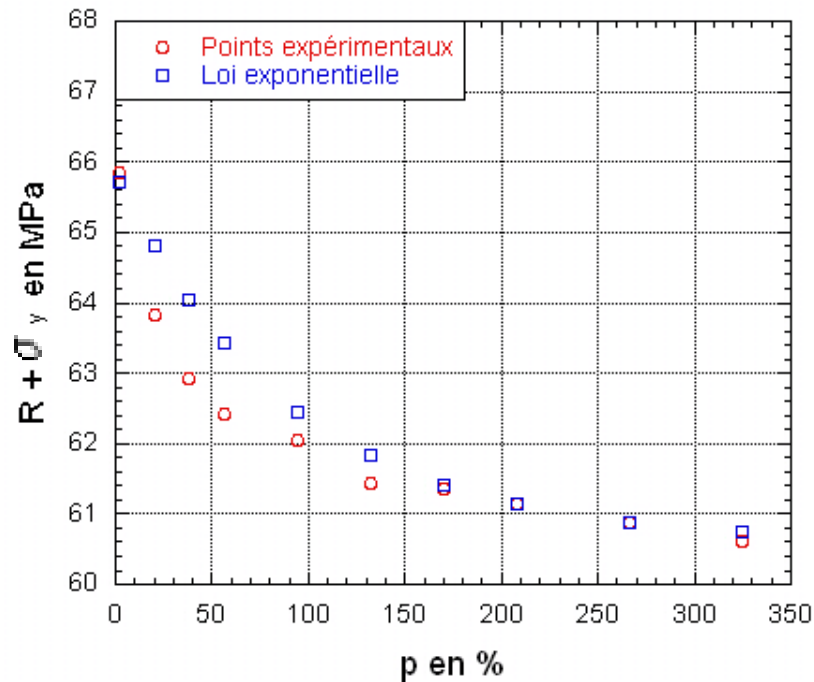


Figure Annexe II) - 33 : Détermination des coefficients d'écroutissage isotrope pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

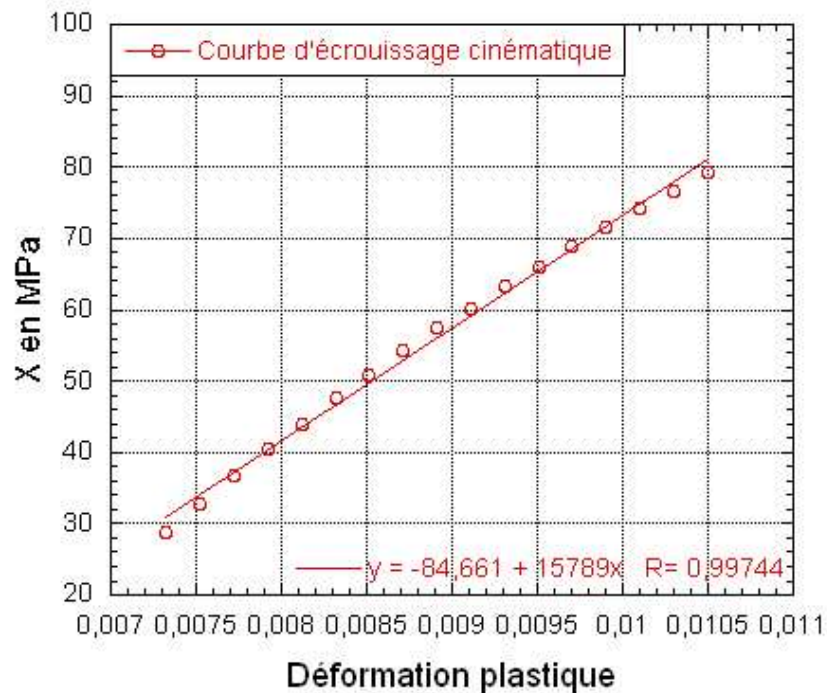


Figure Annexe II) - 34 : Détermination des paramètres d'écroutissage cinématique pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

L'hypothèse d'écroutissage cinématique linéaire semble justifiée pour ce matériau, Figure Annexe II) - 34.

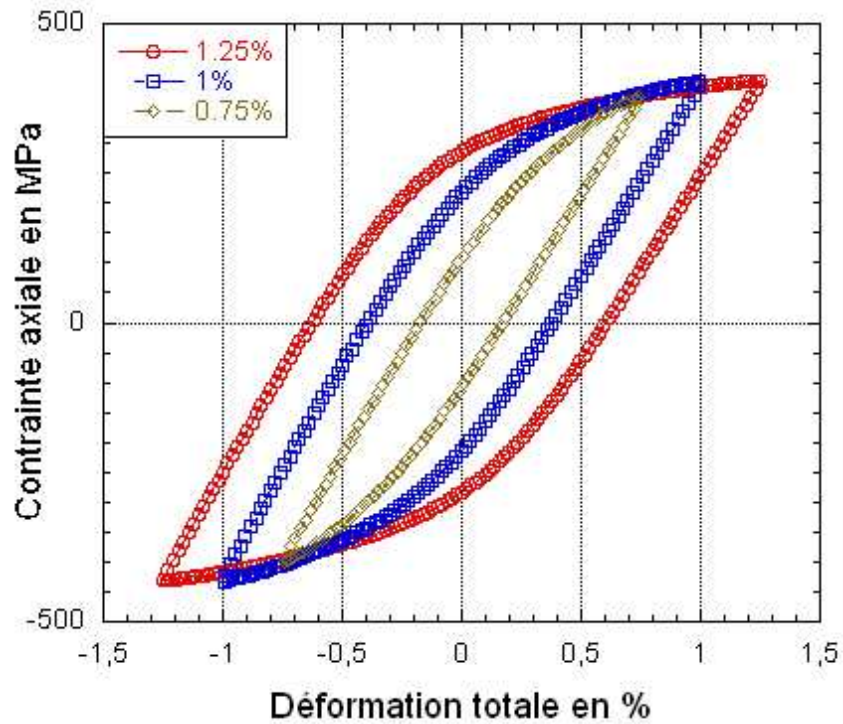


Figure Annexe II) - 35 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL.

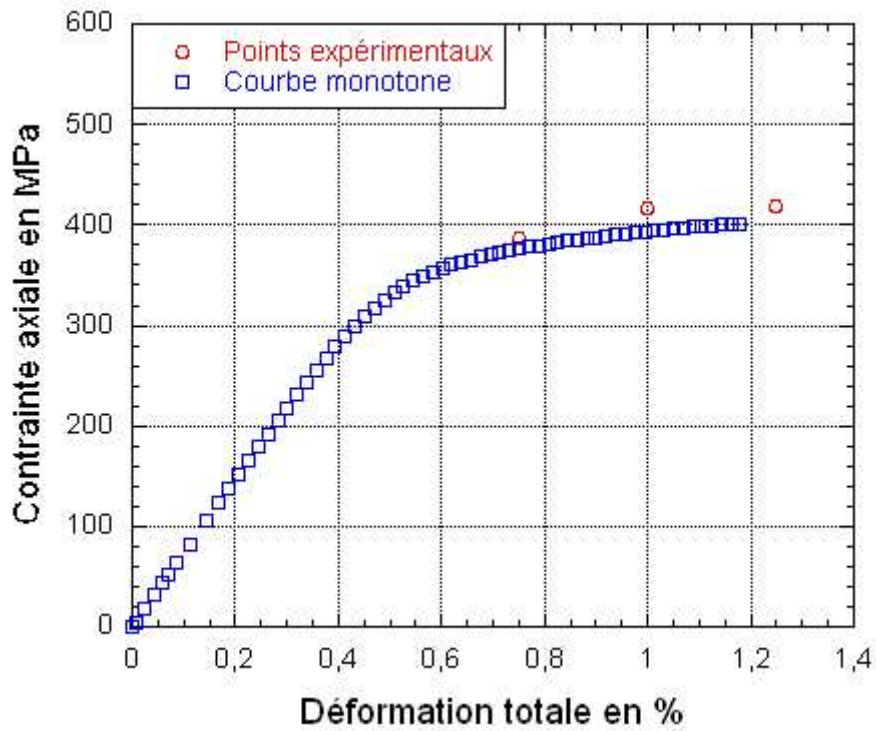


Figure Annexe II) - 36 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL.

Les mêmes remarques que précédemment peuvent être faites pour ce sens de prélèvement, Figure Annexe II) - 36 et Figure Annexe II) - 37.

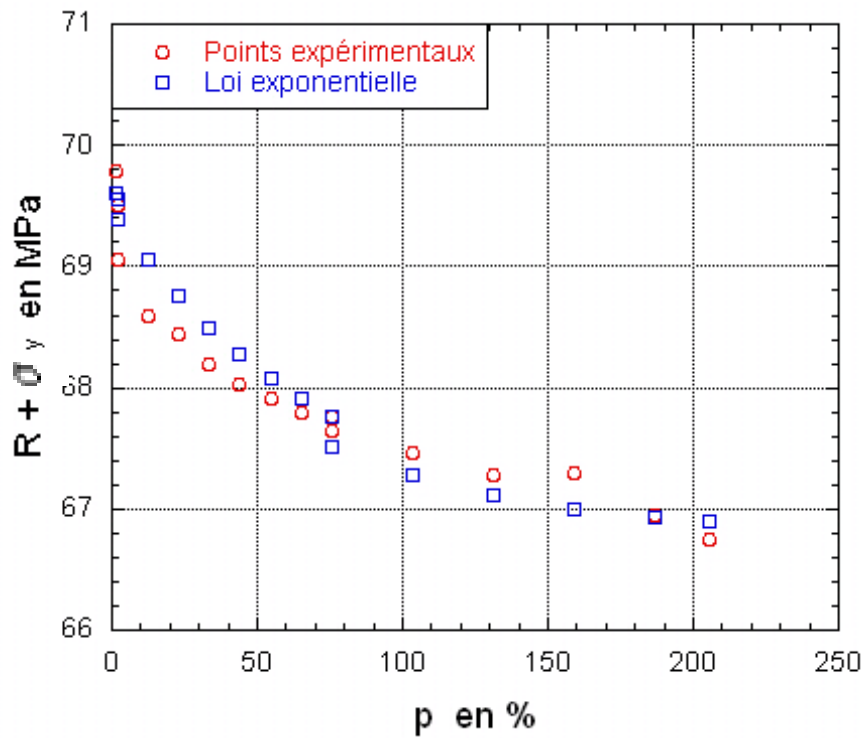


Figure Annexe II) - 37 : Détermination des coefficients d'érouissage isotrope pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

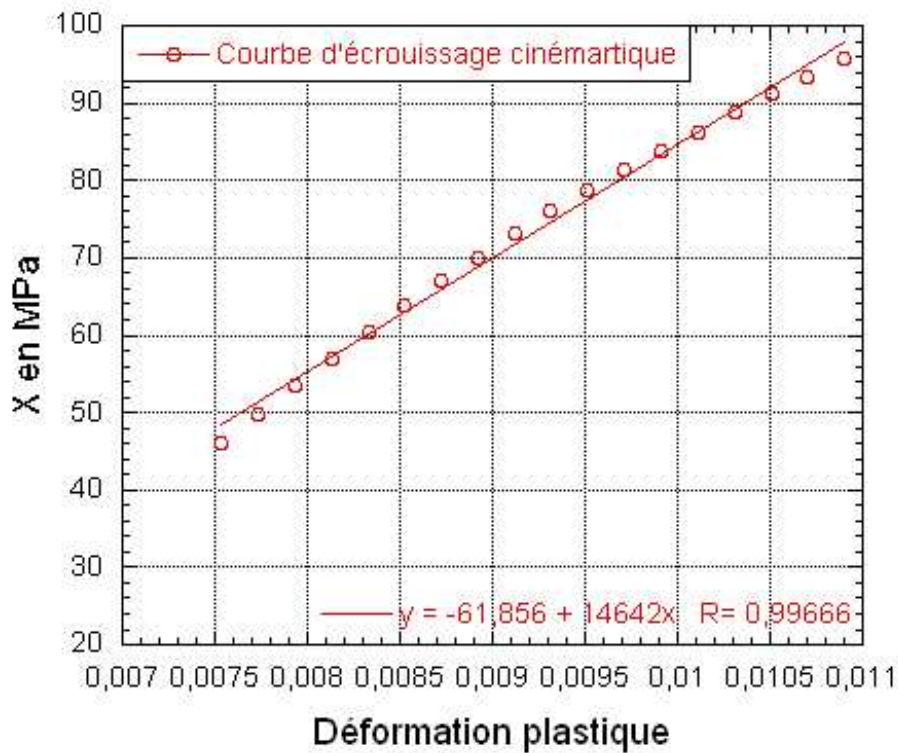


Figure Annexe II) - 38 : Détermination des paramètres d'érouissage cinématique pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

1-2 Alliage d'aluminium 2024 T351

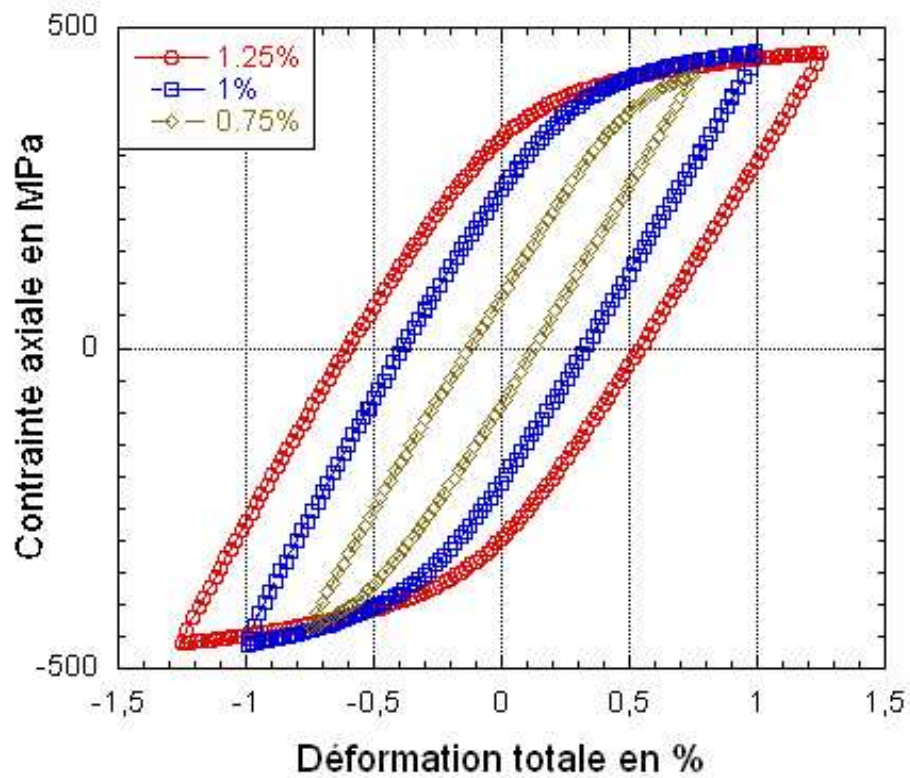


Figure Annexe II) - 39 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT.

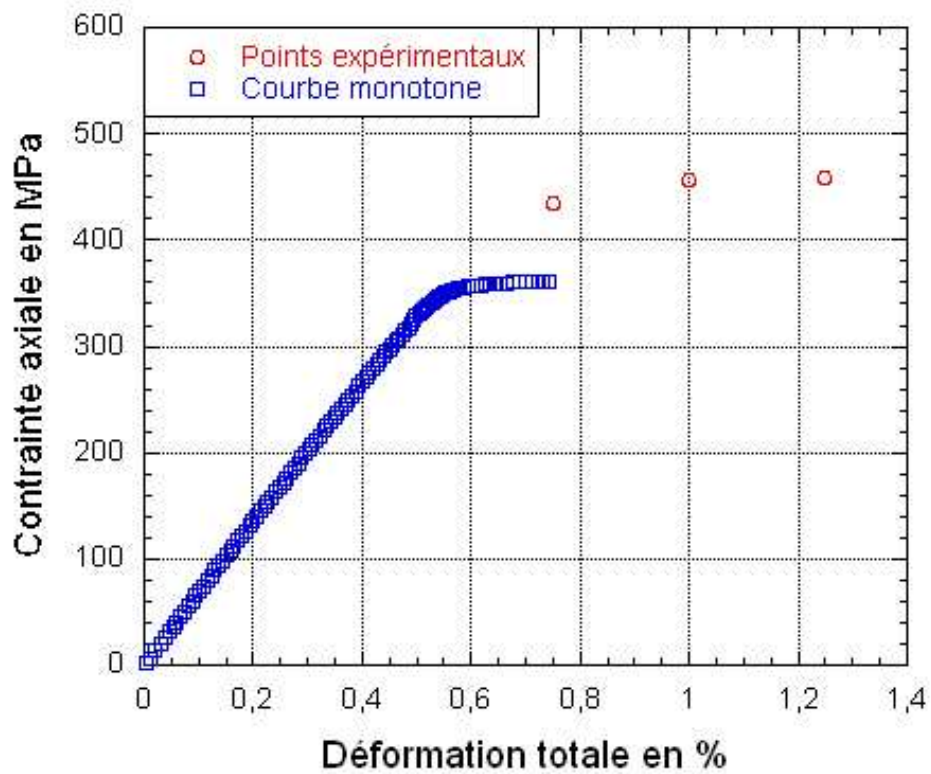


Figure Annexe II) - 40 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT.

Le caractère durcissant de l'alliage d'aluminium 2024 T351 est beaucoup plus marqué que pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351, Figure Annexe II) - 40. Ce résultat est cohérent avec les valeurs des paramètres d'érouissage isotrope obtenues à l'aide de la Figure Annexe II) - 41.

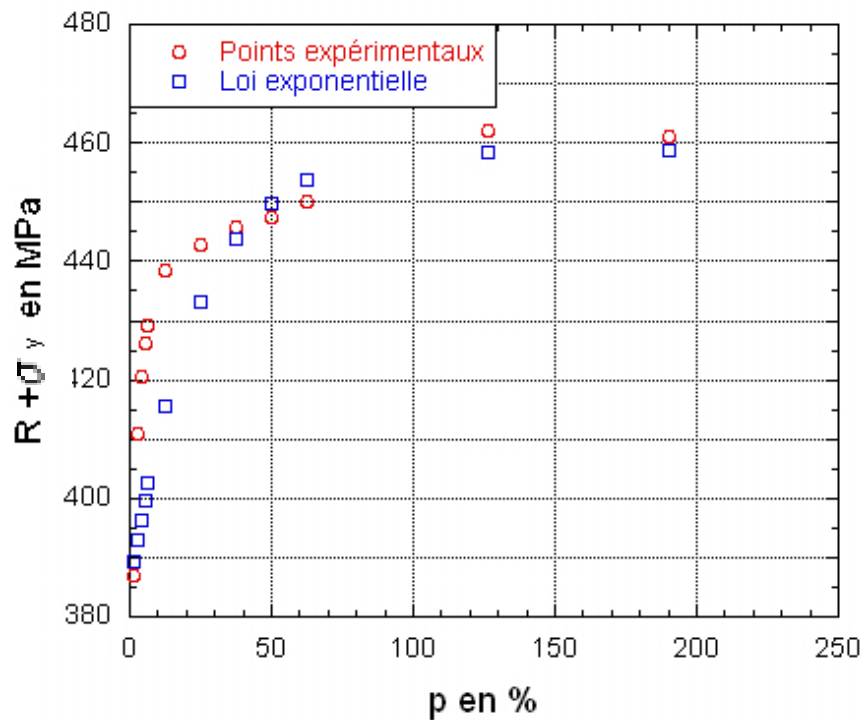


Figure Annexe II) - 41 : Détermination des coefficients d'érouissage isotrope pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

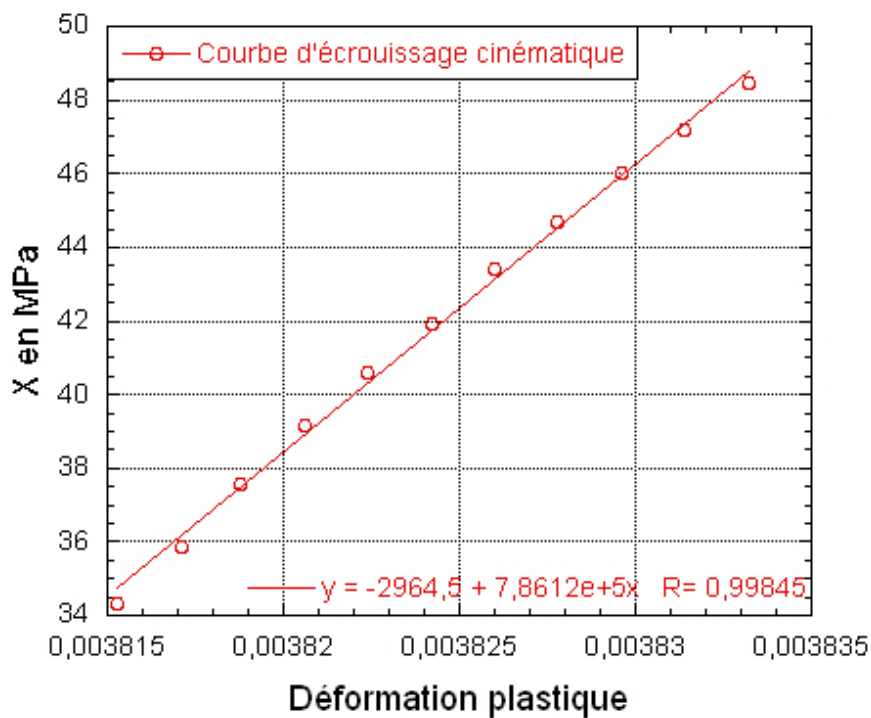


Figure Annexe II) - 42 : Détermination des paramètres d'érouissage cinématique pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

L'hypothèse d'érouissage cinématique linéaire n'est pas absurde au vu des résultats de la Figure Annexe II) - 42

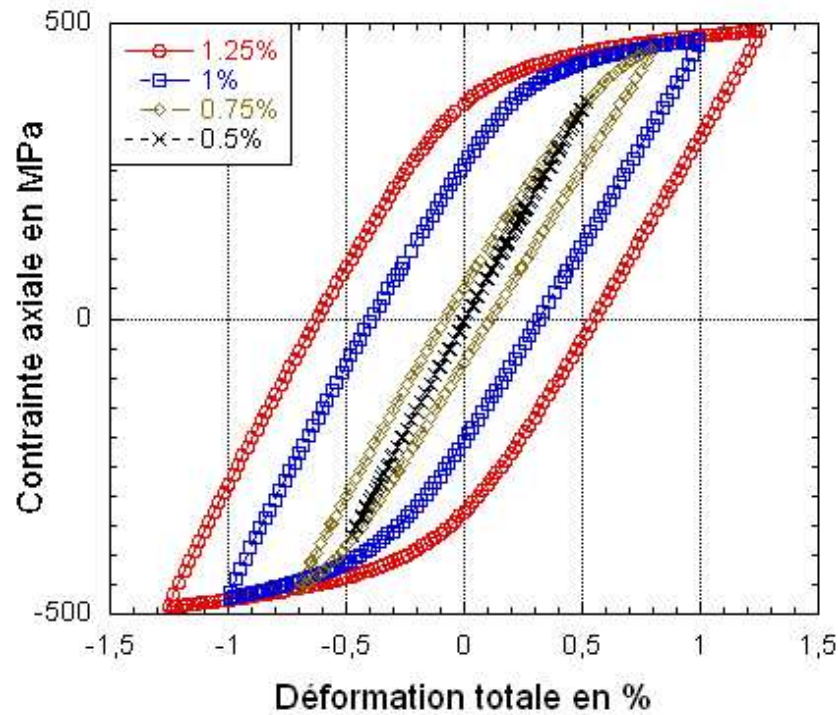


Figure Annexe II) - 43 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL.

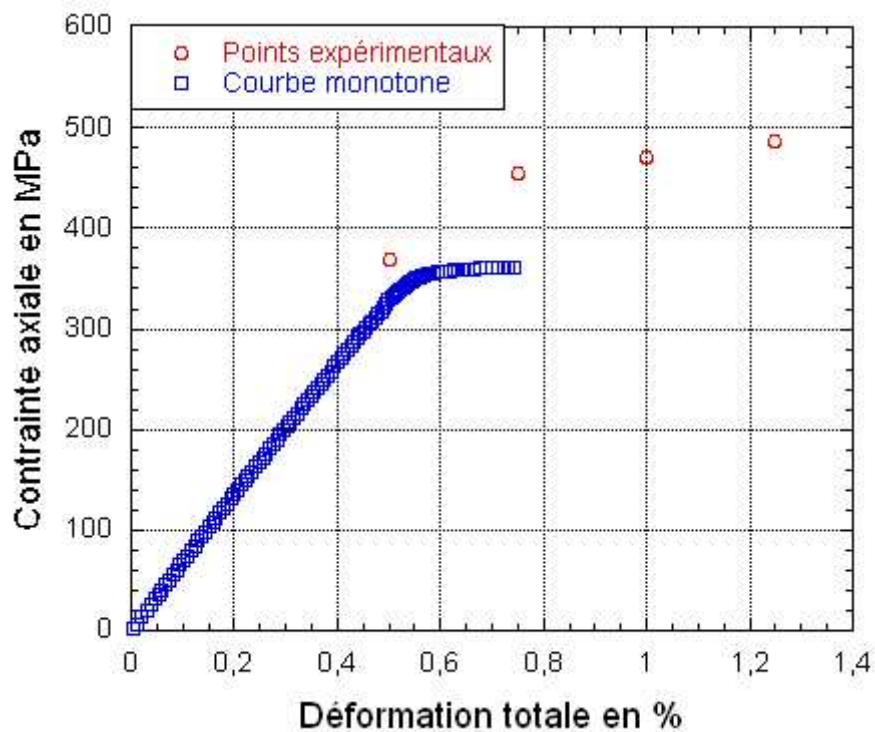


Figure Annexe II) - 44 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL.

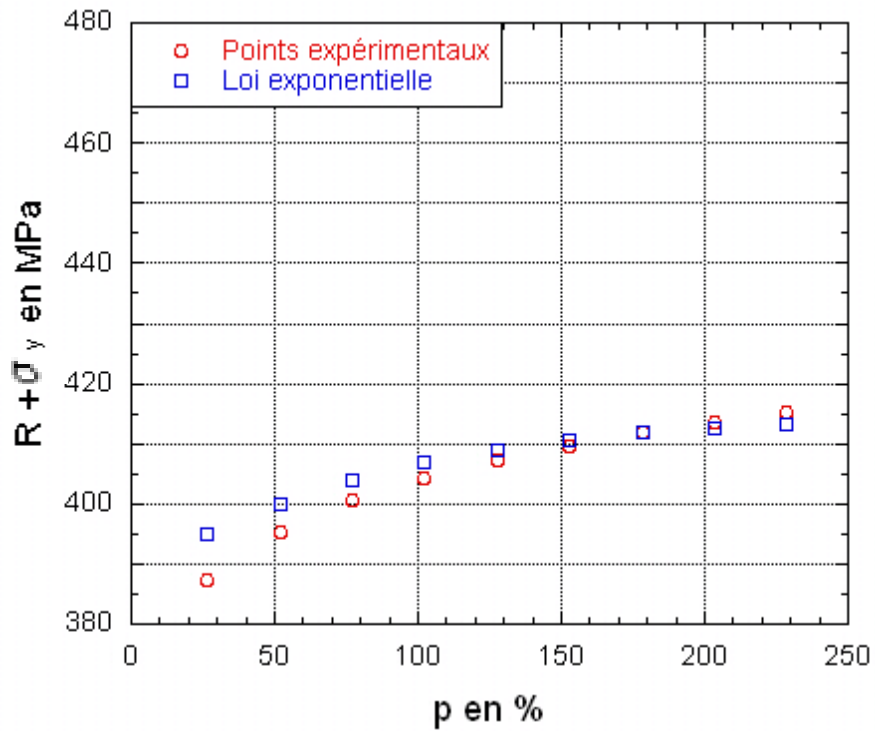


Figure Annexe II) - 45 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

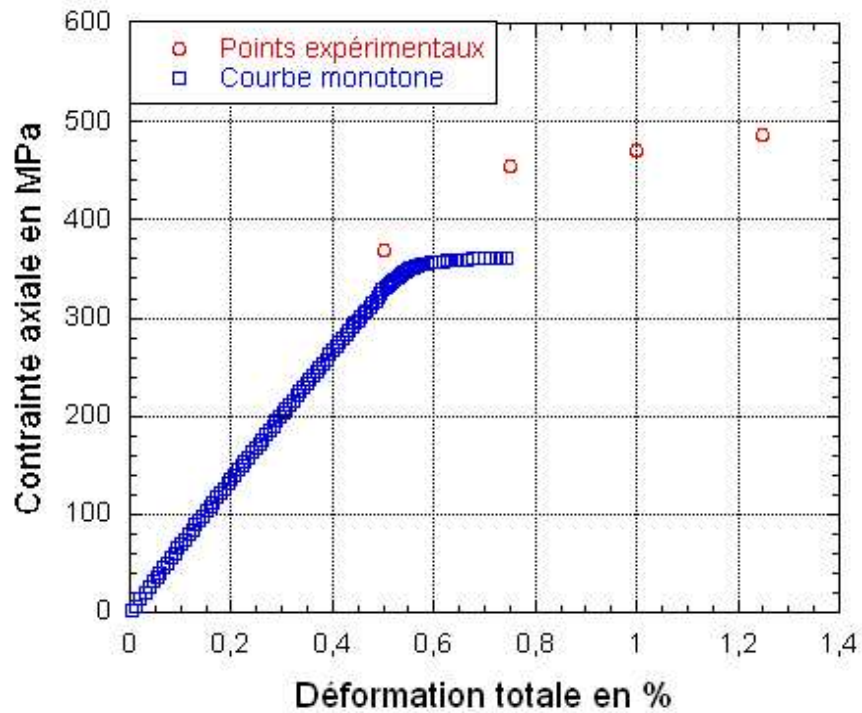


Figure Annexe II) - 46 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

1-3 Alliage Ti-6Al-4V

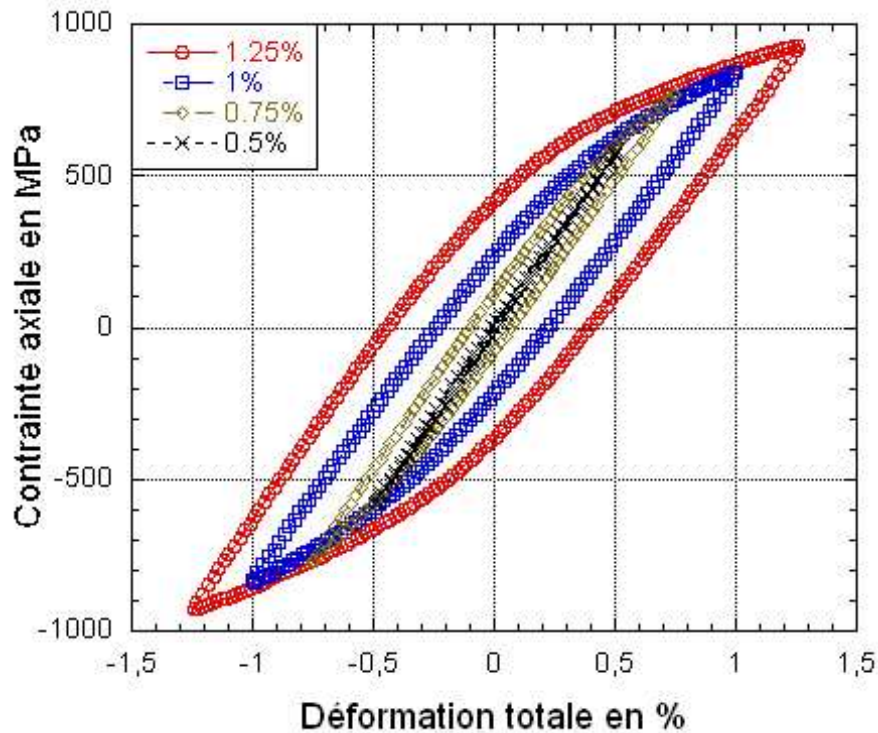


Figure Annexe II) - 47 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT.

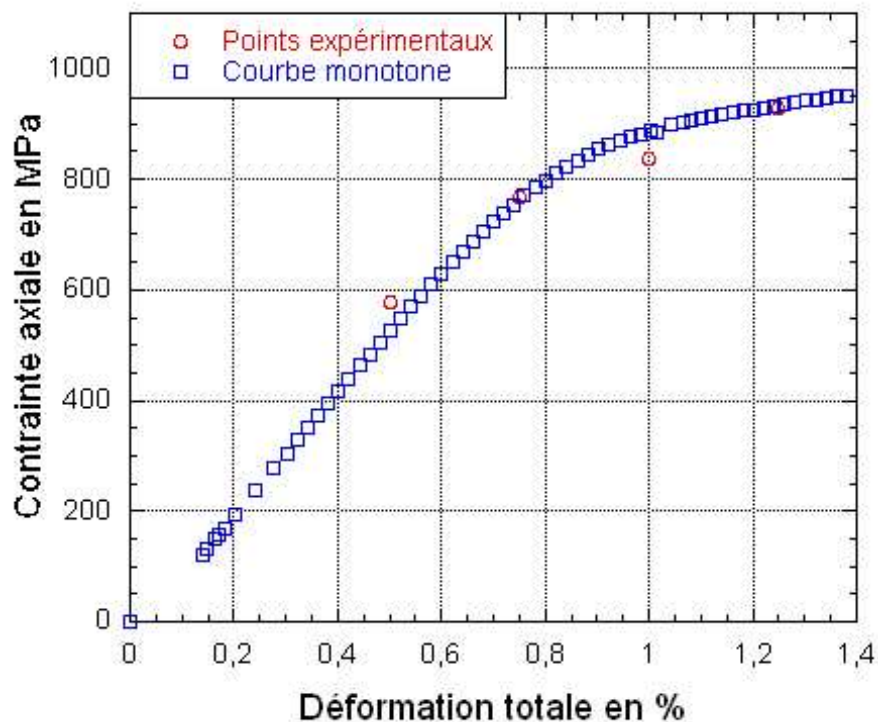


Figure Annexe II) - 48 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT.

Contrairement aux alliages d'aluminium, la courbe de consolidation de l'alliage de Ti-6Al-4V est située en dessous de la courbe monotone, Figure Annexe II) - 48. Ainsi, ce matériau présente un

caractère adoucissant. Ce résultat est validé par les valeurs des paramètres d'écroutissage isotrope obtenues à partir de la Figure Annexe II) - 49.

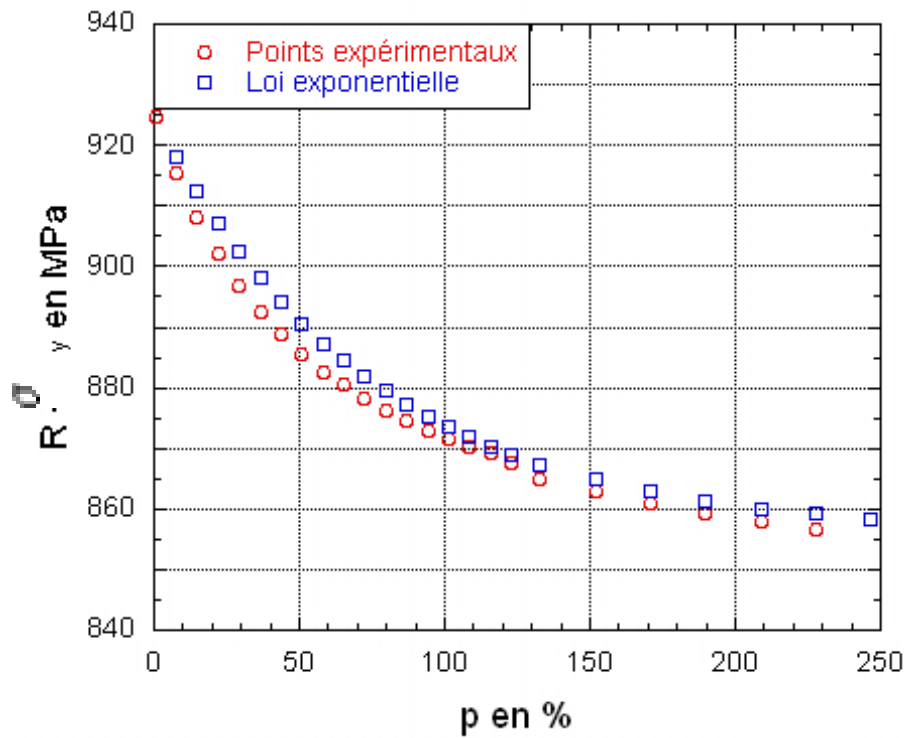


Figure Annexe II) - 49 : Détermination des coefficients d'écroutissage isotrope pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

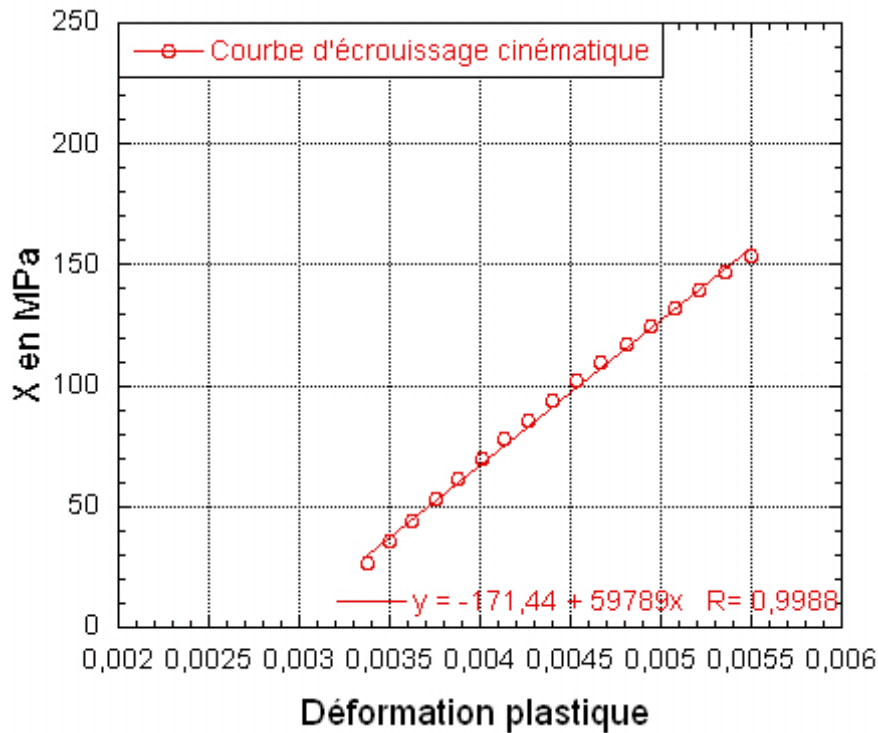


Figure Annexe II) - 50 : Détermination des paramètres d'écroutissage cinématique pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

L'hypothèse d'érouissage cinématique linéaire semble être validée, Figure Annexe II) - 50.

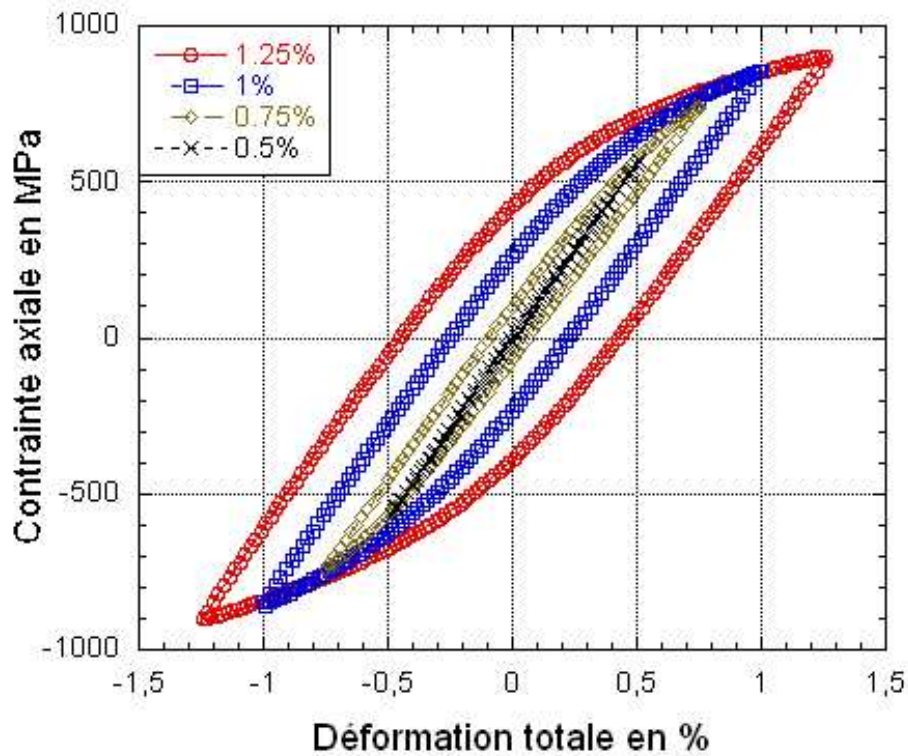


Figure Annexe II) - 51 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans sens TL.

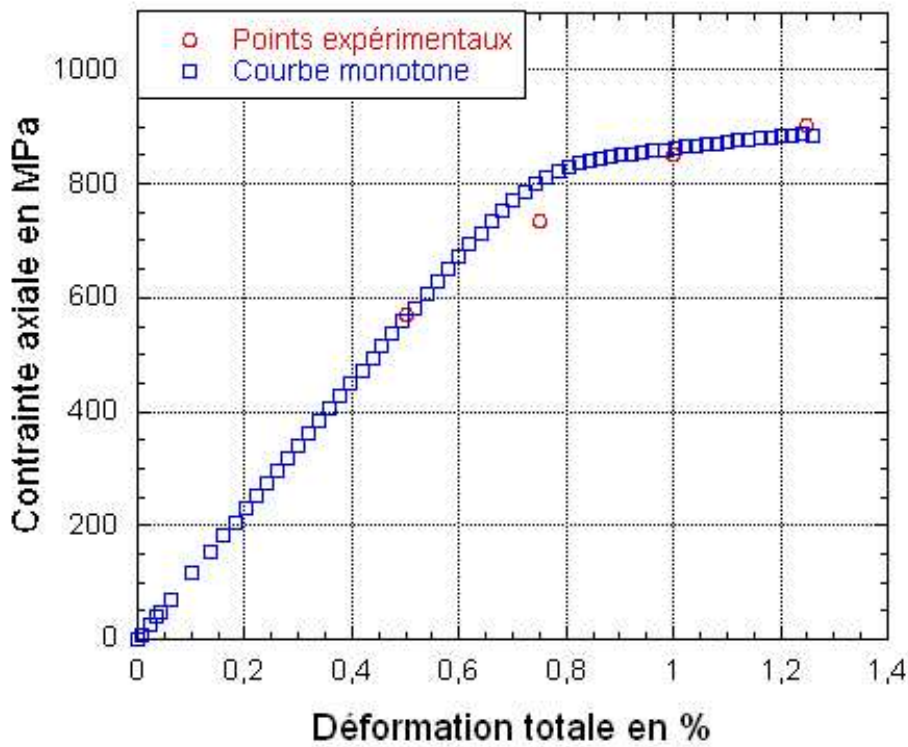


Figure Annexe II) - 52 : Courbe de consolidation cyclique de l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens TL.

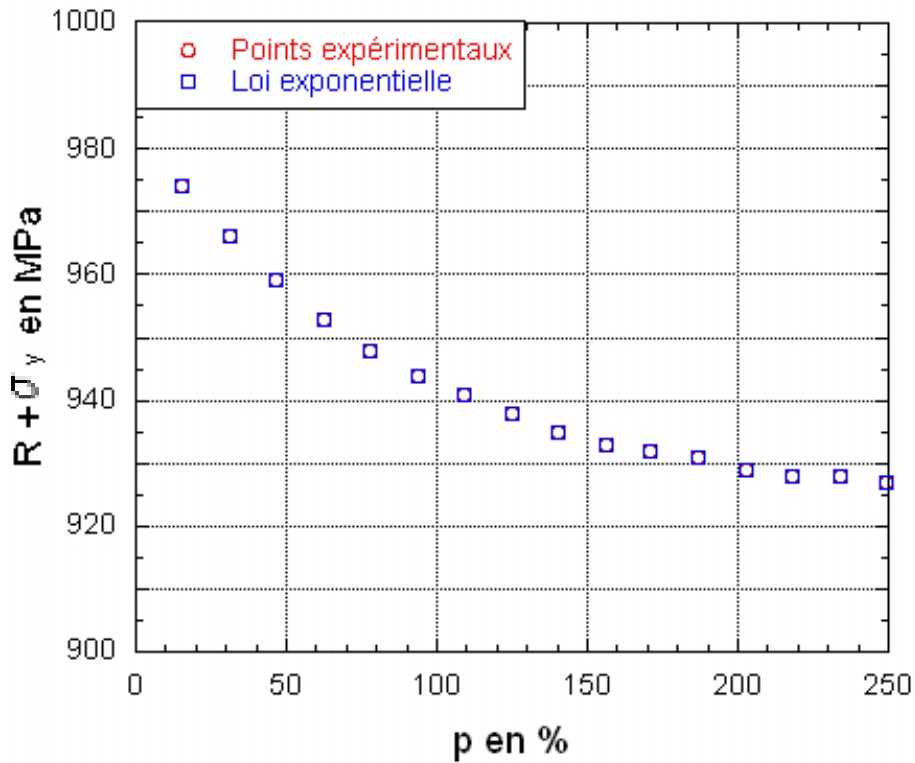


Figure Annexe II) - 53 : Détermination des coefficients d'écroissage isotrope pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens TL à partir d'un essai à 1.% de déformation totale imposée.

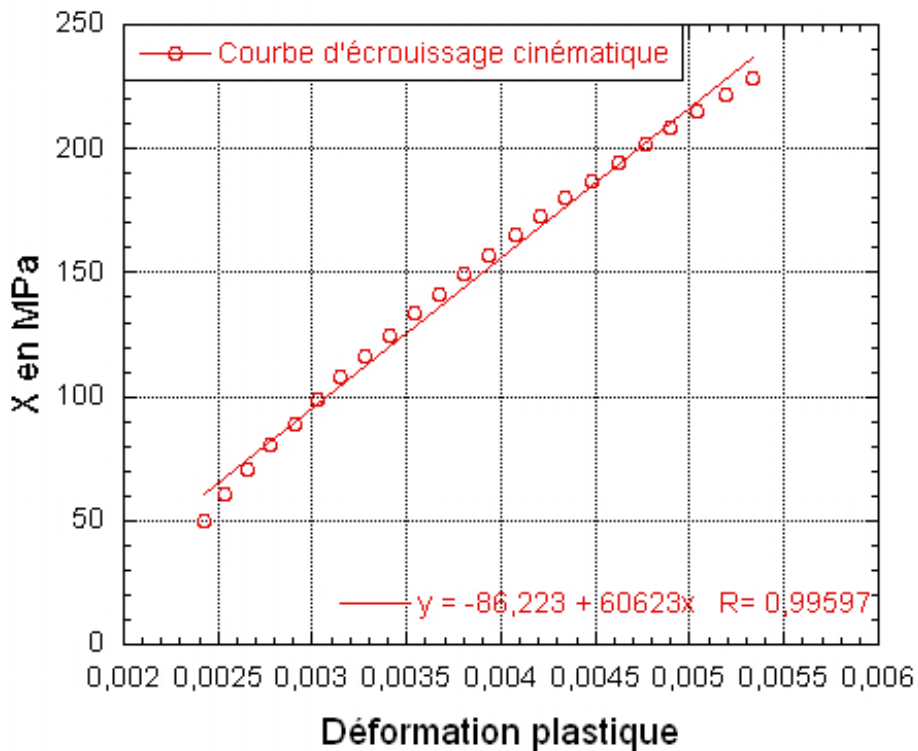


Figure Annexe II) - 54 : Détermination des paramètres d'écroissage cinématique pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

1-4 Acier 15-5PH

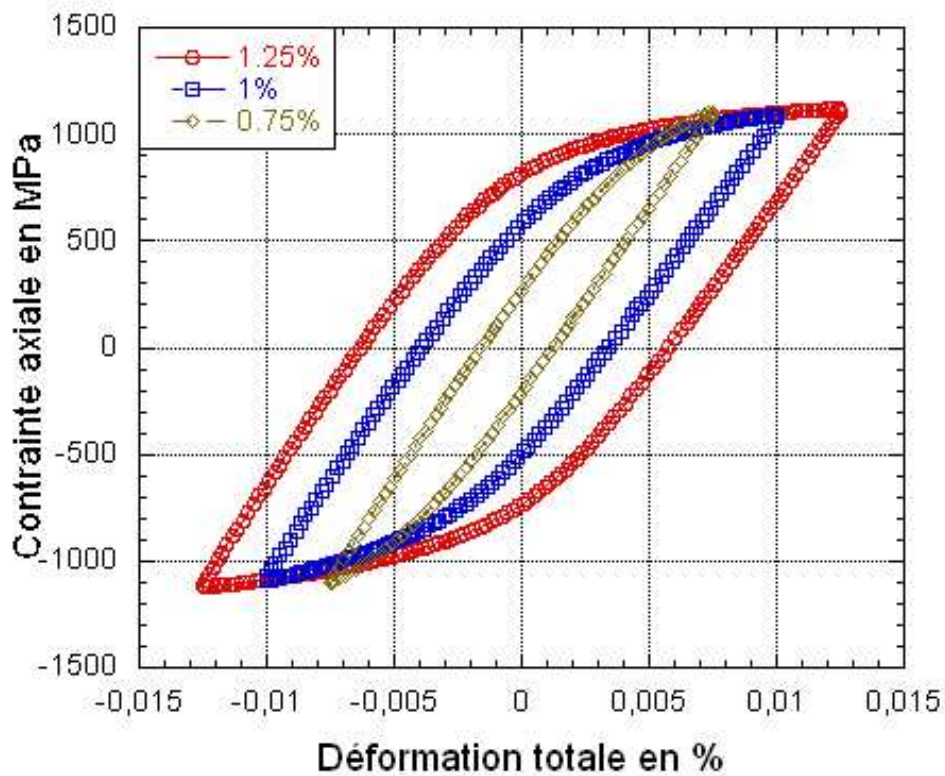


Figure Annexe II) - 55 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'acier 15-5PH dans le sens LT.

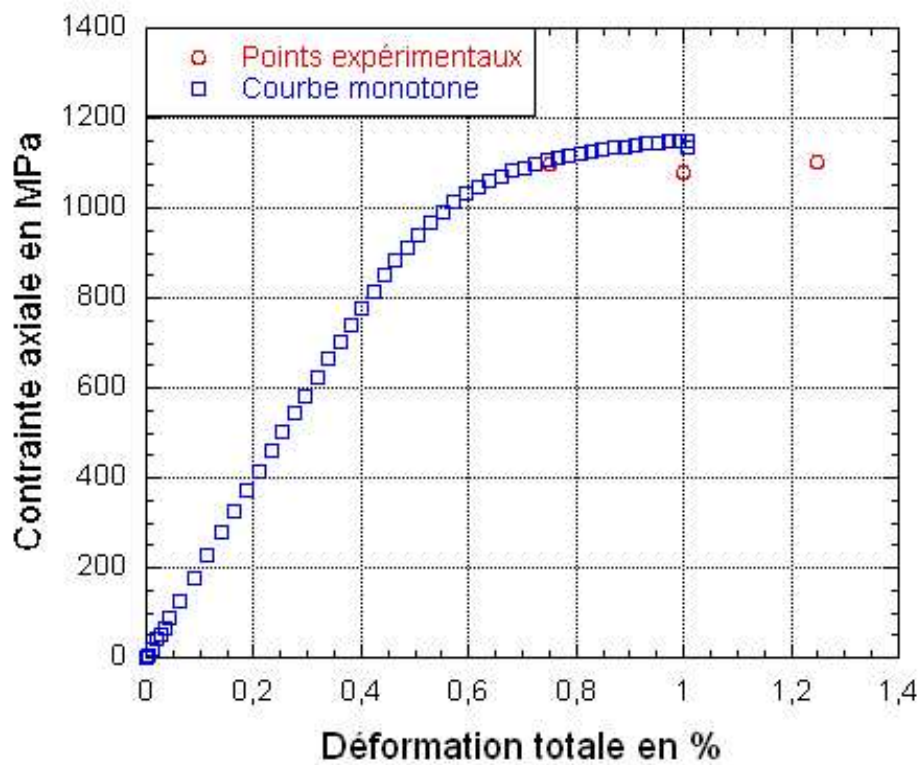


Figure Annexe II) - 56 : Courbe de consolidation cyclique de l'acier 15-5PH dans le sens LT.

Annexe II : Données expérimentales

L'acier 15-5PH se comporte comme l'alliage de Ti-6Al-4V c'est-à-dire qu'il a un comportement adoucissant, Figure Annexe II) - 56 et Figure Annexe II) - 57.

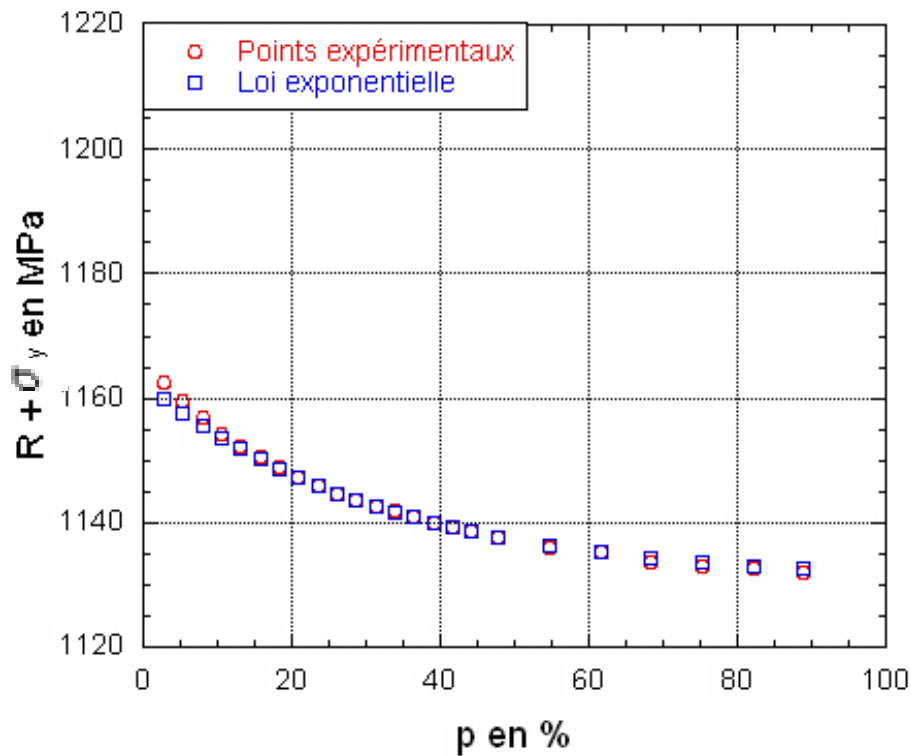


Figure Annexe II) - 57 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'acier 15-5PH dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

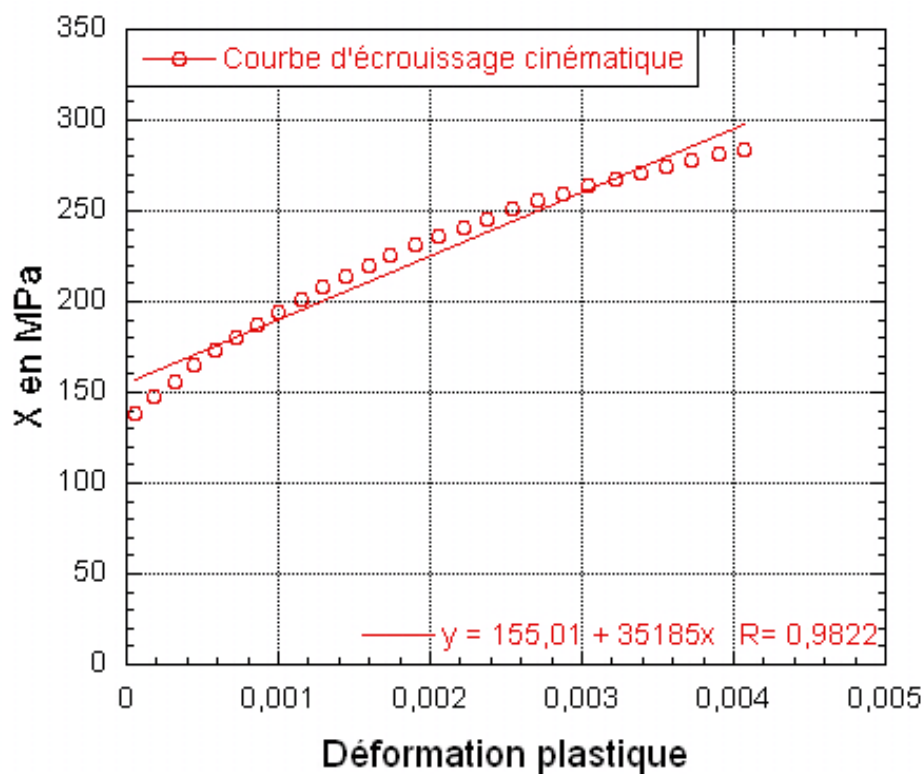


Figure Annexe II) - 58 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'acier 15-5PH dans le sens LT à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

Pour l'acier 15-5PH, l'hypothèse d'érouissage cinématique linéaire semble être trop forte, Figure Annexe II) - 58. Par ailleurs, les résultats obtenus pour les essais de traction, annexe II 2-4, confortent cette idée car la courbe force – déplacement se scinde en deux parties, laissant supposer la présence de deux érouissages.

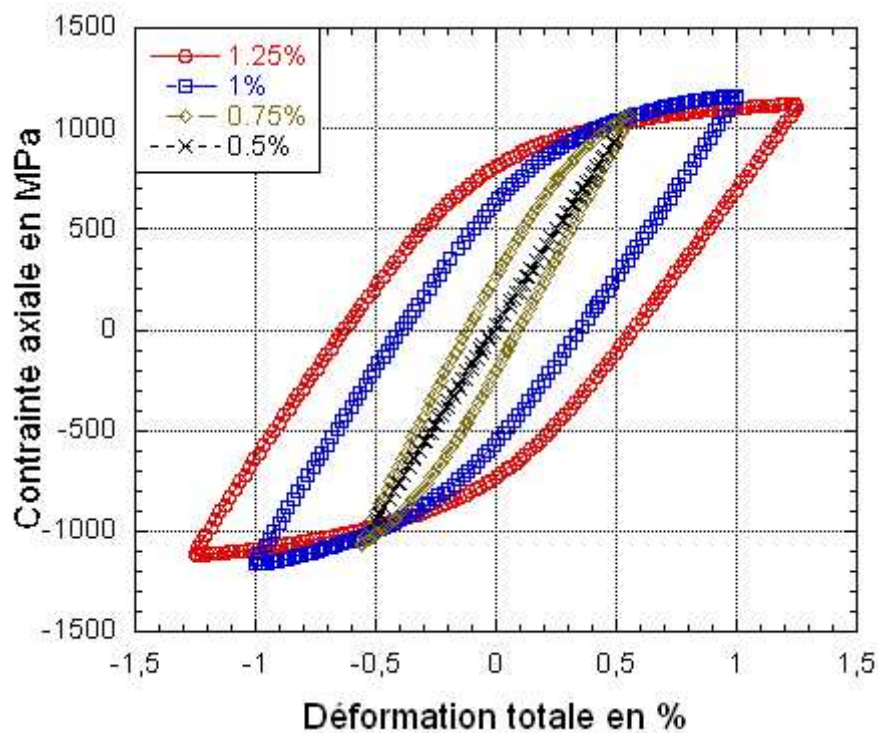


Figure Annexe II) - 59 : Cycles stabilisés sous différentes valeurs de déformation totale imposée au cours de l'essai sur l'acier 15-5PH dans sens TL.

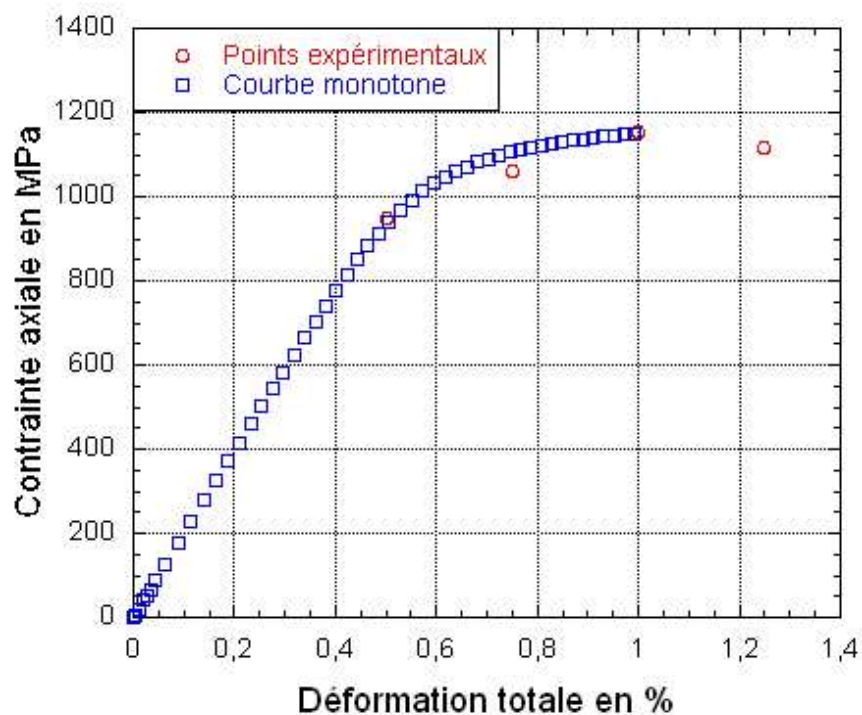


Figure Annexe II) - 60 : Courbe de consolidation cyclique de l'acier 15-5PH dans le sens TL.

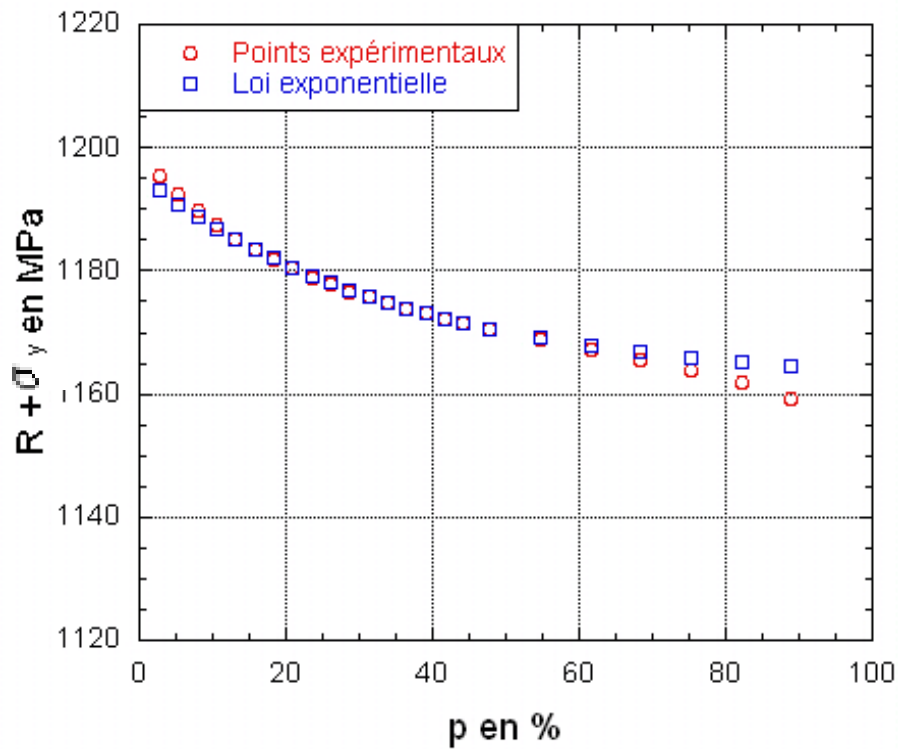


Figure Annexe II) - 61 : Détermination des coefficients d'écrouissage isotrope pour l'acier 15-5PH dans le sens TL à partir d'un essai à 1.% de déformation totale imposée.

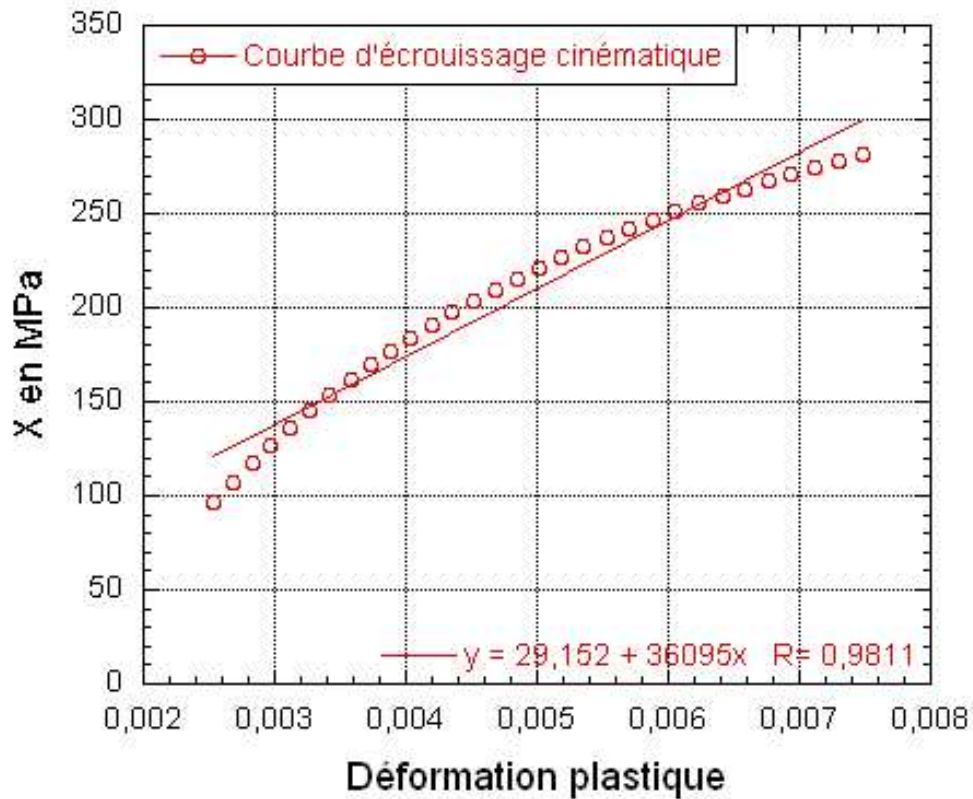


Figure Annexe II) - 62 : Détermination des paramètres d'écrouissage cinématique pour l'acier 15-5PH dans le sens TL à partir d'un essai à 1% de déformation totale imposée.

1-5 Valeurs des paramètres du comportement élastique et plastique

Tableau Annexe II) - 3 : Paramètres du comportement élastiques et plastiques.

	Alliage d'aluminium 7175 T7351		Alliage d'aluminium 2024 T351		Ti-6Al-4V		15-5PH	
	LT	TL	LT	TL	LT	TL	LT	TL
E en MPa	67619 ± 1614	68002 ± 2000	70315,2 ± 205	70430 ± 115	116007 ± 304	114689 ± 2665	175930 ± 1260	182600 ± 3200
σ_y en MPa	358 ± 7	353 ± 6	338 ± 4	334 ± 5	763 ± 10	747 ± 5	914 ± 8	959 ± 10
R_m en MPa	-1,7 ± 3	-5,1 ± 2,1	25,8 ± 2,2	29,6 ± 10,2	-78,3 ± 18,1	-66,7 ± 2,2	-28,5 ± 7	-33,7 ± 2
g	1,1 ± 1	0,42 ± 0,3	6,4 ± 3,2	9,6 ± 2,4	1,1 ± 0,1	1,2 ± 0,1	2,1 ± 0,8	3,4 ± 0,6
C en MPa	18644 ± 3355	17720 ± 3070	6994 ± 533	6995 ± 533	68447 ± 1788	64216 ± 2328	36860 ± 4964	32706 ± 2480

L'analyse des résultats est faite dans le chapitre n°2 II) 1-2

2 Essais de traction

2-1 Alliage d'aluminium 7175 T7351

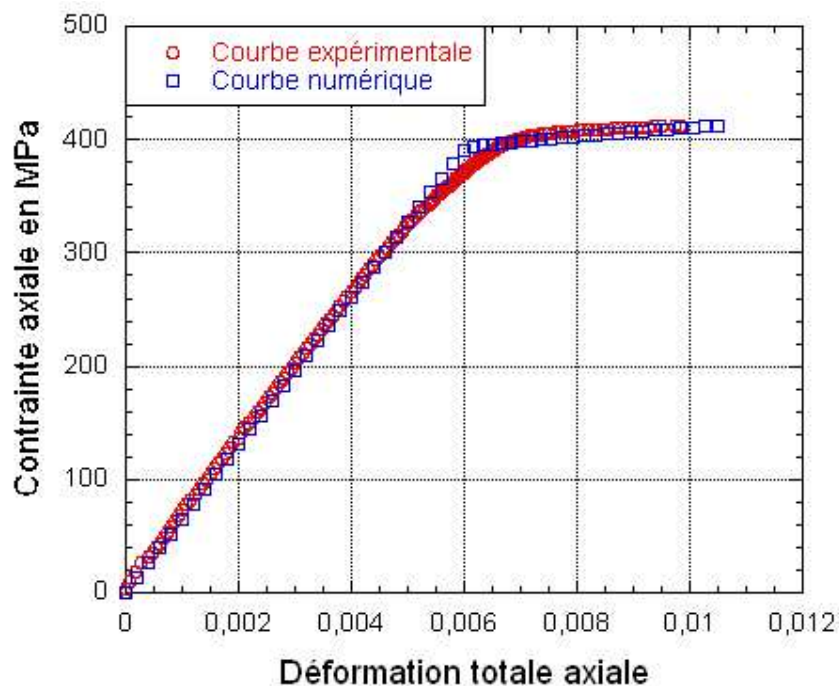


Figure Annexe II) - 63 : Comparaisons des mesures de l'extensomètre et des simulations numériques lors d'un essai de traction sur l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans le sens LT.

Plusieurs essais de traction ont été réalisés sur chaque matériau. Les courbes suivantes présentent les résultats les plus éloignés entre les sens LT et TL, Figure Annexe II) - 64. Généralement, elles sont proches. Par exemple la rupture s'opère à des valeurs de déplacement similaire. Les écarts peuvent

s'expliquer par le lieu de prélèvement des éprouvettes de traction plus ou moins éloigné de la surface de la plaque, annexes I 1-3.

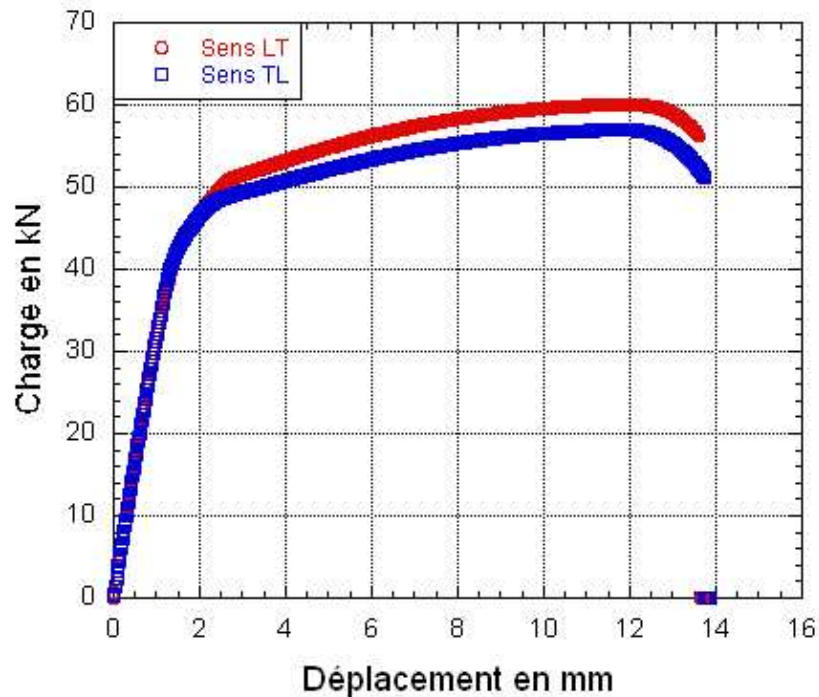


Figure Annexe II) - 64 : Courbes de traction, charge en fonction du déplacement, pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 dans les sens de prélèvement LT et TL.

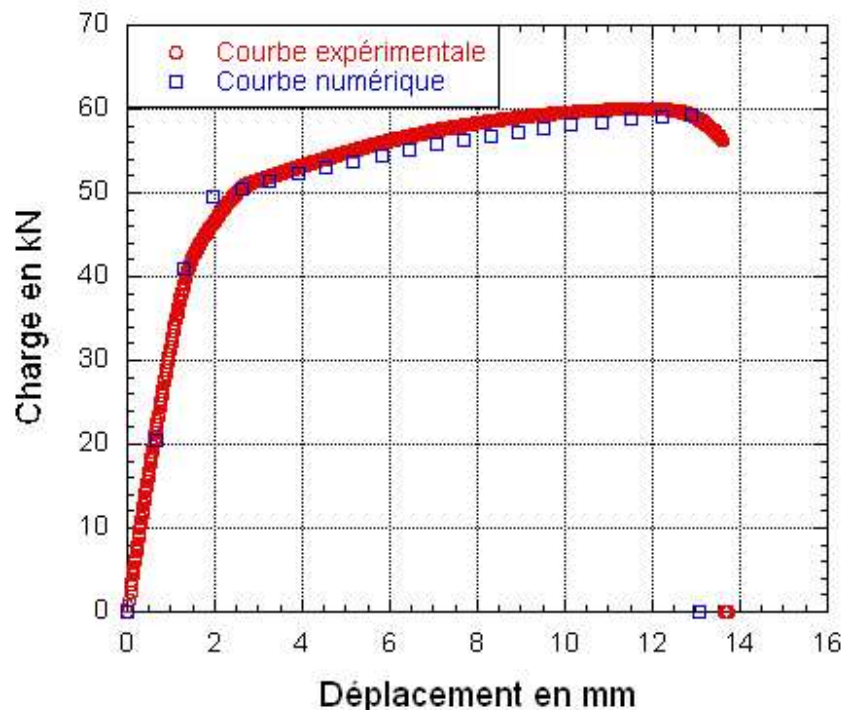


Figure Annexe II) - 65 : Comparaison des courbes de traction obtenues expérimentalement dans le sens LT et numériquement pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351.

Les moins bons résultats au niveau de la comparaison entre simulation et essais de traction correspondent à l'alliage d'aluminium 7175 T7351, Figure Annexe II) - 66. La rupture est prématurée

et le palier de radoucissement n'est pas visible par rapport aux autres simulations, Figure Annexe II) - 68.

2-2 Alliage d'aluminium 2024 T351

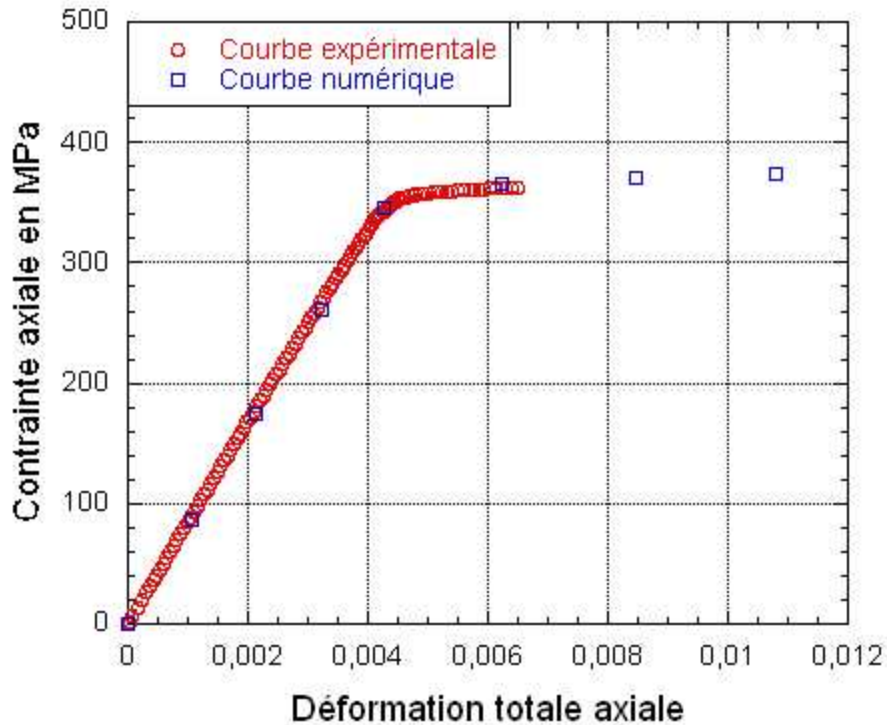


Figure Annexe II) - 66 : Comparaisons des mesures de l'extensomètre et des simulations numériques lors d'un essai de traction sur l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans le sens LT.

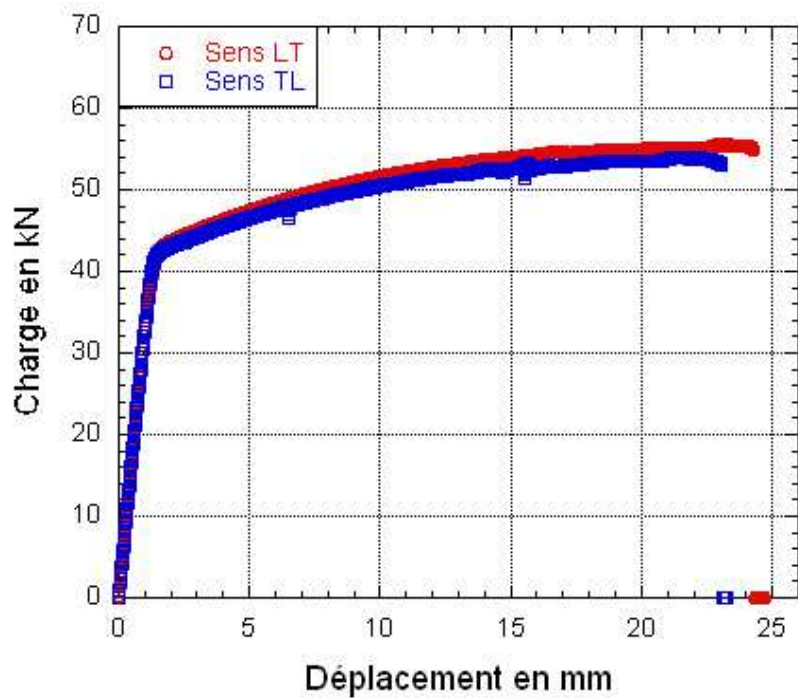


Figure Annexe II) - 67 : Courbes de traction, charge en fonction du déplacement, pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 dans les sens LT et TL.

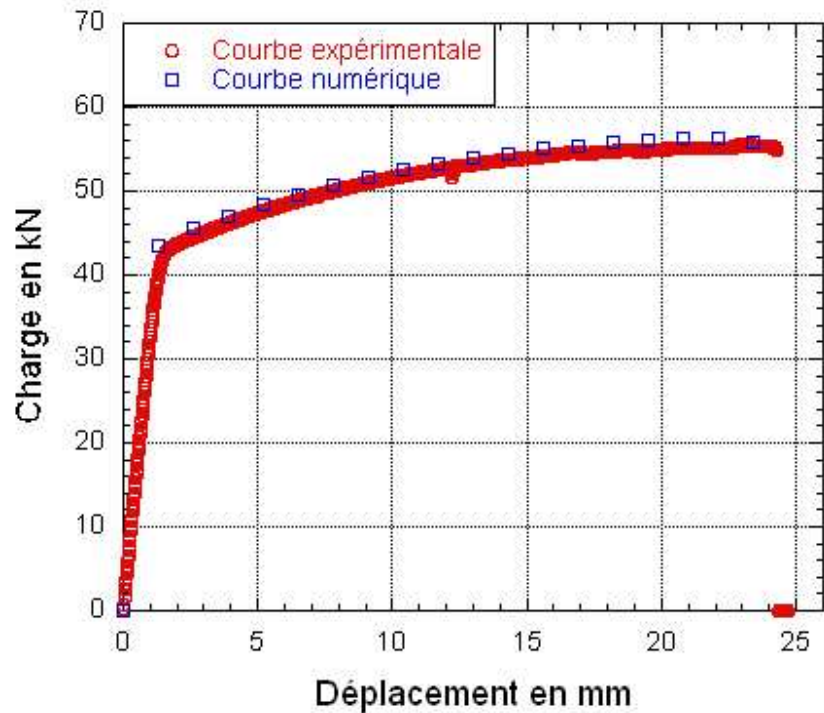


Figure Annexe II) - 68 : Comparaison des courbes de traction obtenues expérimentalement dans le sens LT et numériquement pour l'alliage d'aluminium 2024 T351.

Comme précédemment, la rupture est prématurée. Cependant, la diminution des contraintes est visible sur la Figure Annexe II) - 68 à la fin de l'essai.

2-3 Alliage Ti-6Al-4V

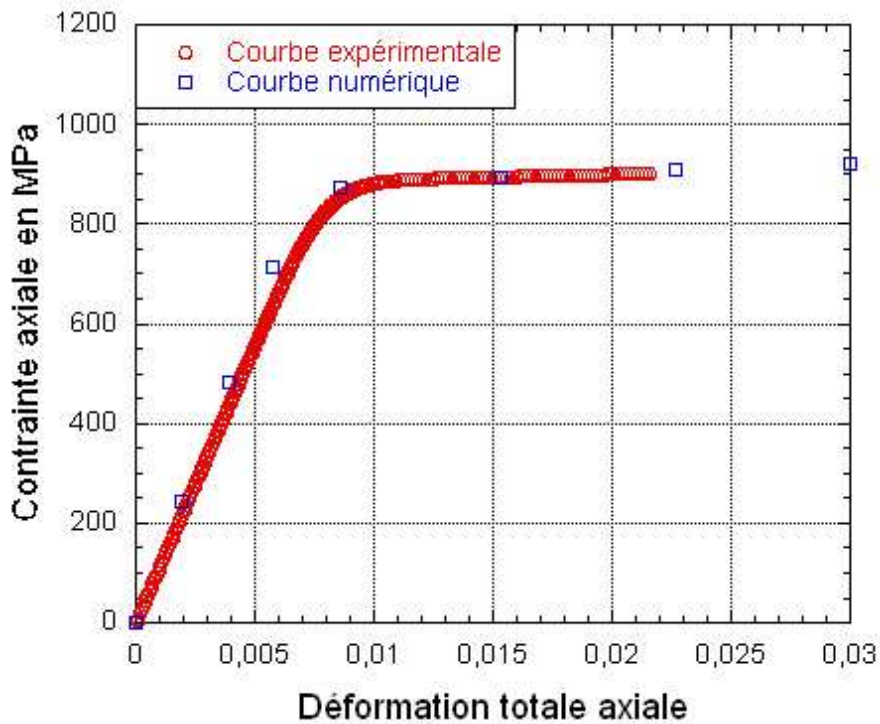


Figure Annexe II) - 69 : Comparaisons des mesures de l'extensomètre et des simulations numériques lors d'un essai de traction sur l'alliage Ti-6Al-4V dans le sens LT.

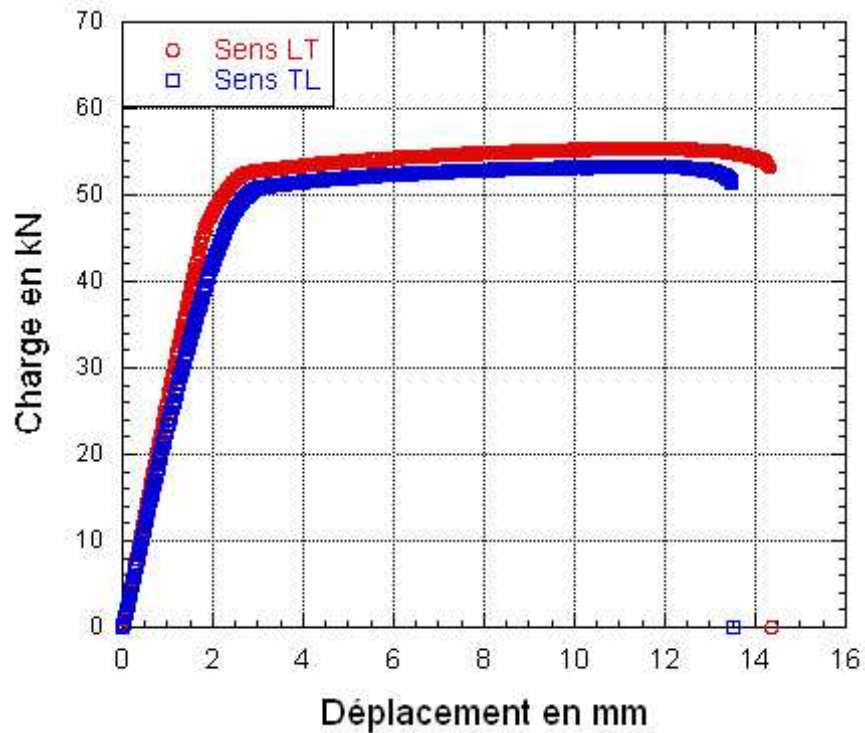


Figure Annexe II) - 70 : Courbes de traction, charge en fonction du déplacement, pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V dans les sens de prélèvement LT et TL.

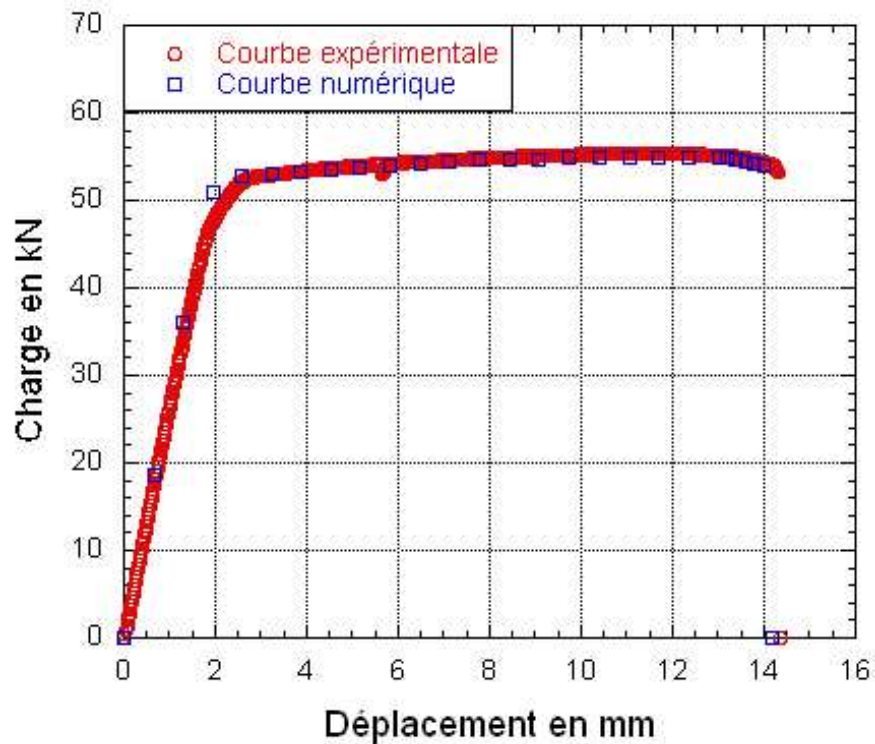


Figure Annexe II) - 71 : Comparaison des courbes de traction obtenues expérimentalement dans le sens LT et numériquement pour l'alliage Ti-6Al-4V.

La simulation de l'essai de traction pour l'alliage de Ti-6Al-4V est la plus proche des essais.

2-3 Acier 15-5PH

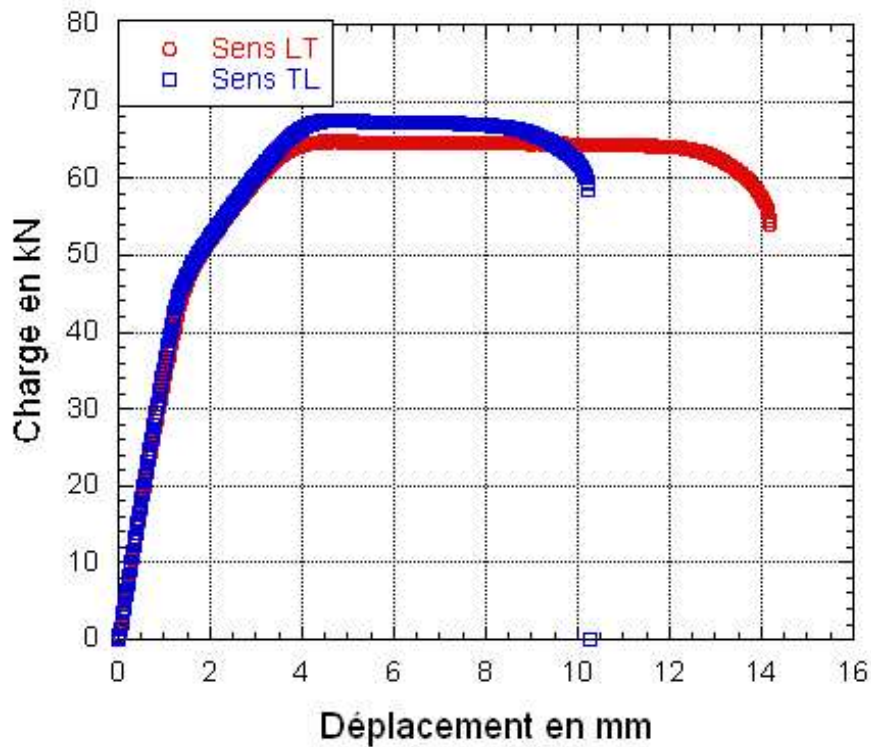


Figure Annexe II) - 72 : Courbes de traction, charge en fonction du déplacement, pour l'acier 15-5PH dans les sens de prélèvement LT et TL.

Cet écart important entre les deux courbes précédentes provient à priori d'un défaut de polissage car la rupture s'initie au niveau d'une rayure. Ainsi, le matériau est fragilisé et casse plus rapidement. Les essais ont été abandonnés sur ce matériau suite à l'allure générale de la courbe de traction, présentant un fort palier de radoucissement et aux échecs des simulations de cet essai.

2-4 Données numériques

La simulation d'un essai de traction sous le logiciel de calcul par éléments finis est effectuée à partir des paramètres temporels suivants :

Tableau Annexe II) - 4 : Paramètres de simulation d'un essai de traction.

Mass scaling	Δt	Scale factor	Temps de chargement
100	10 E-05 s	0,01	10 s

Les valeurs des paramètres matériau entrées sous le logiciel lors de ces simulations sont répertoriées dans le Tableau Annexe II) - 5.

Tableau Annexe II) - 5 : Paramètres matériau entrés sous Abaqus lors de la simulation d'un essai de traction.

	Alliage d'aluminium 7175 T7351	Alliage d'aluminium 2024 T351	Ti-6Al-4V
E en MPa	68005	72000	115608
σ_y en MPa	355	315	742
C en MPa	1100	2300	16300
s	0.93	0.1	0.08
S en MPa	2	3	1.5

III) Données théoriques

A titre de référence, le logiciel CES4 est utilisé pour connaître les valeurs théoriques des paramètres du comportement élastique mais aussi de la ténacité. Ce logiciel est couramment employé dans le monde de l'industrie pour choisir des matériaux lors des avants projet de conception. Cette partie ne redonne que les fiches fournies par le logiciel pour les alliages d'aluminium et l'alliage Ti-6Al-4V afin de montrer la cohérence des résultats obtenue au cours des essais au LMPM.

Annexe III : Microstructure

Cette partie traite des images des surfaces de rupture réalisées au cours de ce travail de recherche. Pour chaque essai appartenant à la famille des essais de qualification, des images sont prises des surfaces de rupture des éprouvettes afin d'identifier les phénomènes qui interviennent lors de la fissuration. L'interprétation des résultats est réalisée dans le chapitre n°2 pour chaque type d'essai. Seules les images sont redonnées dans se paragraphe.

I) Essais de ténacité

Les surfaces de rupture d'une éprouvette de ténacité, CT W = 40, sont observées en quatre points, situés sur la figure suivante. Seuls trois matériaux sont étudiés car le Alliage 15-5PH n'a pas subi d'essai de ténacité, chapitre n°2 I) 1-2.

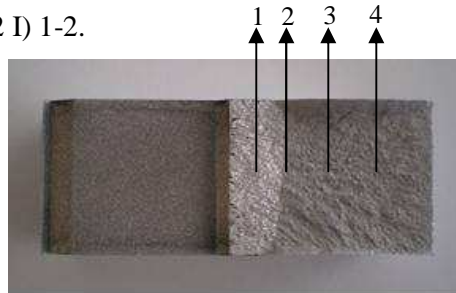


Figure Annexe III) - 1 : Localisation des points d'étude de la surface de rupture d'une éprouvette CT, W = 40, rompue lors d'un essai de ténacité.

☉ Sens LT :

← Sens de propagation de fissure.

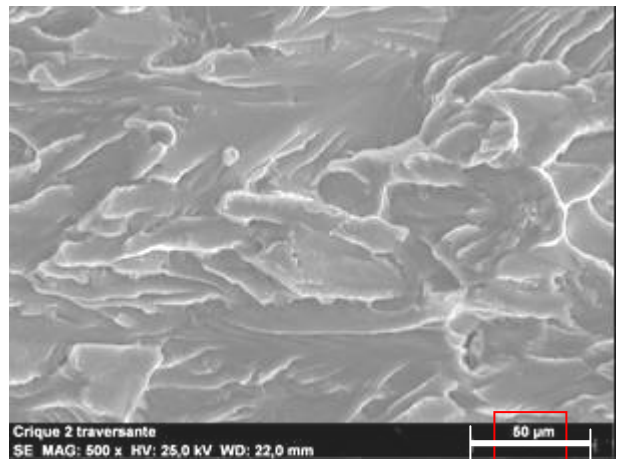
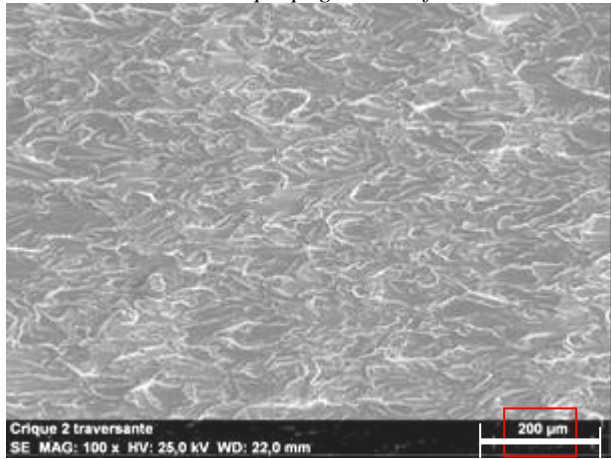


Figure Annexe III) - 2 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à deux grossissements différents.

↑ Sens de propagation de fissure.

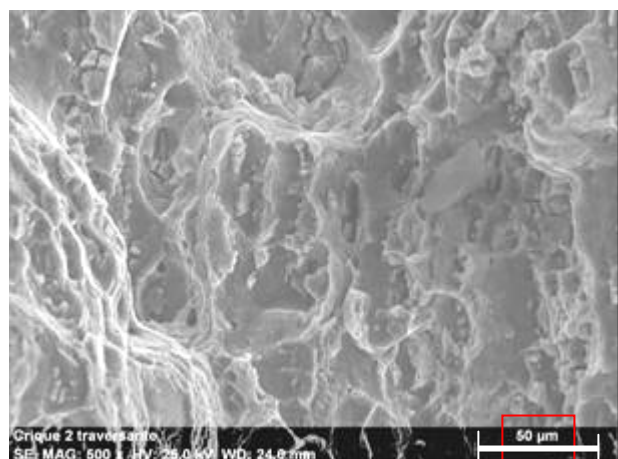
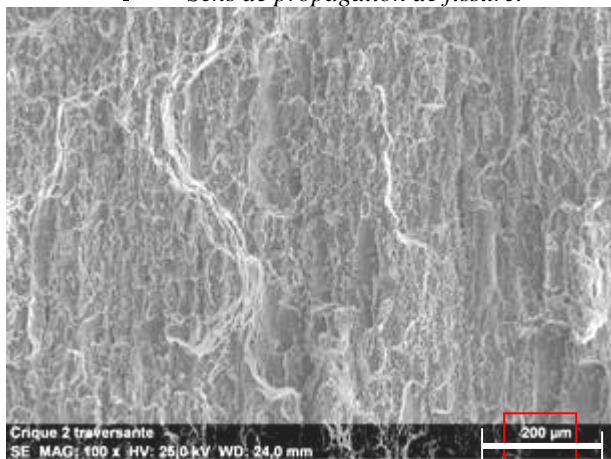


Figure Annexe III) - 3 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à deux grossissements différents.

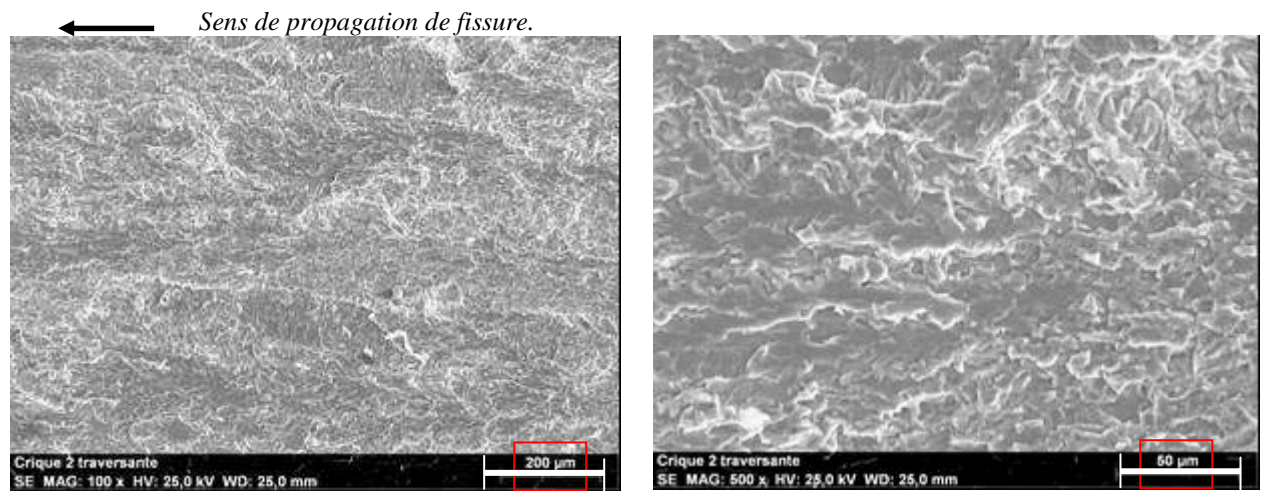


Figure Annexe III) - 4 : Point d'étude n°1 pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens LT à deux grossissements différents.

Le point n°1, Figure Annexe III) - 2 à Figure Annexe III) - 4 correspond à la zone de pré-fissuration à ΔK constant, chapitre n°2 I) 1-1. Nous observons des plages lisses correspondant à du quasi-clivage. Aucune cupule n'est présente. Ce résultat est valable pour les trois matériaux étudiés même si les zones sont moins étendues pour les alliages d'aluminium.

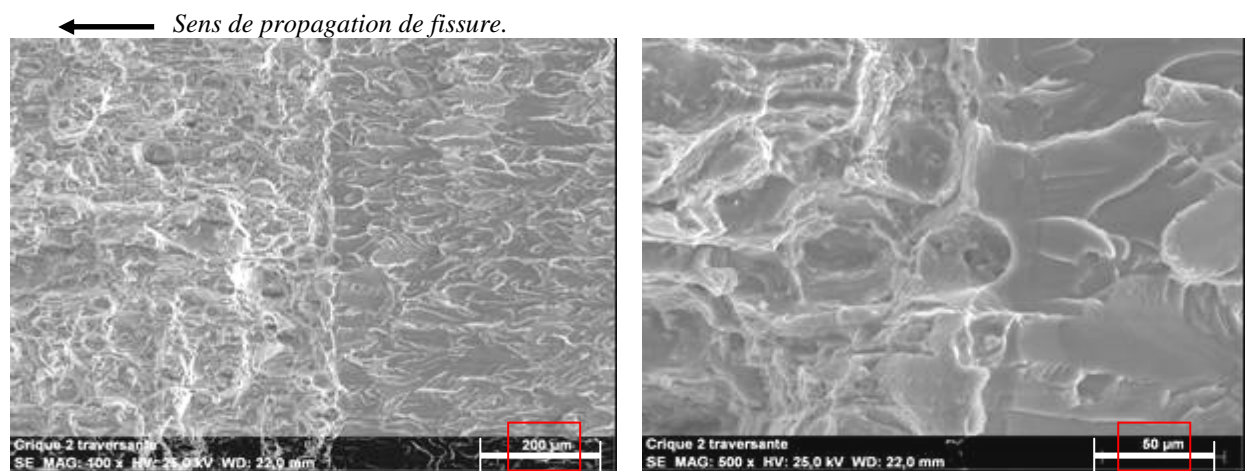


Figure Annexe III) - 5 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à deux grossissements différents.

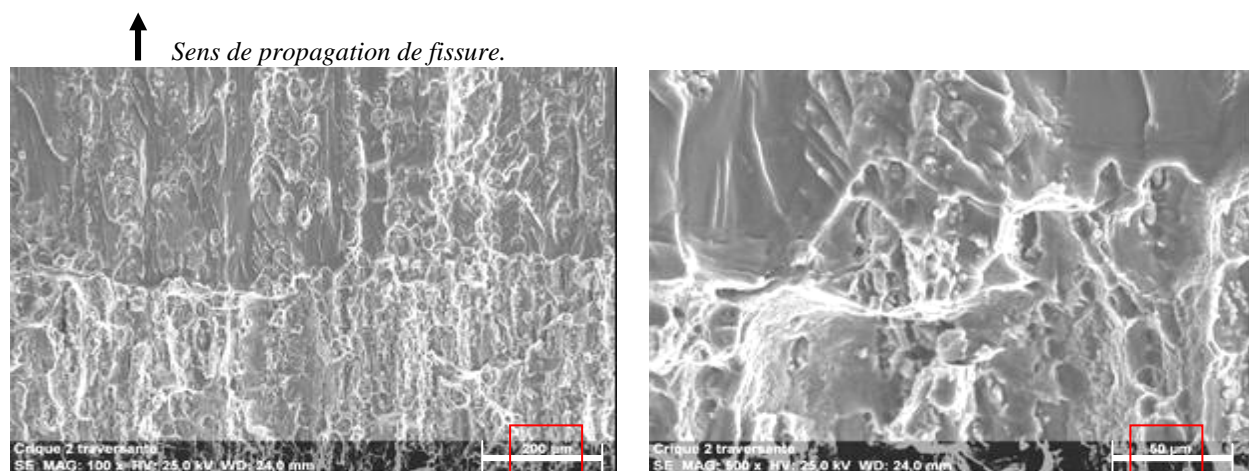


Figure Annexe III) - 6 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à deux grossissements différents.

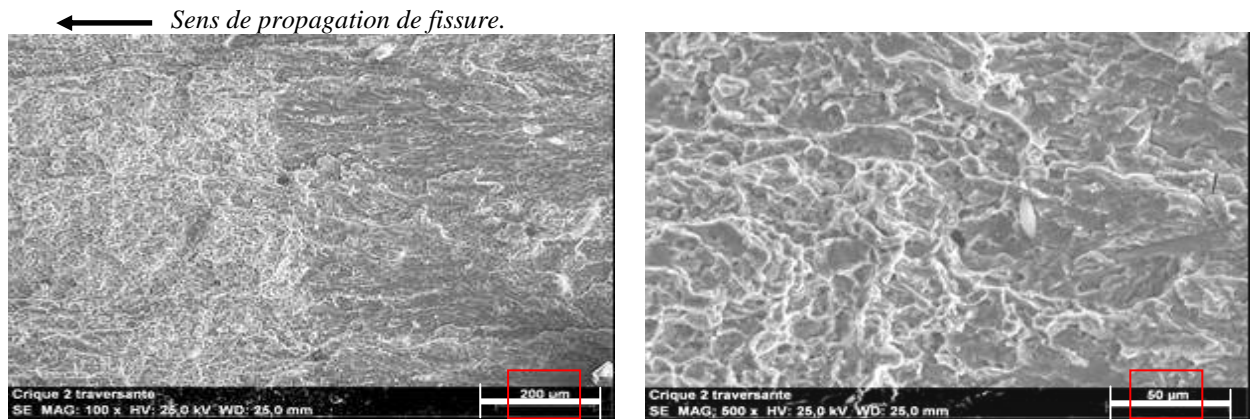


Figure Annexe III) - 7 : Point d'étude n°2 pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens LT à deux grossissements différents.

Le point n°2, Figure Annexe III) - 5 à Figure Annexe III) - 7 est choisi sur la frontière, visible à l'œil nu, entre la phase de pré-fissuration et celle de l'essai de ténacité en lui-même. Les surfaces sont bien distinctes car les plages lisses sont remplacées par des zones de déchirure accompagnées de quelques cupules.

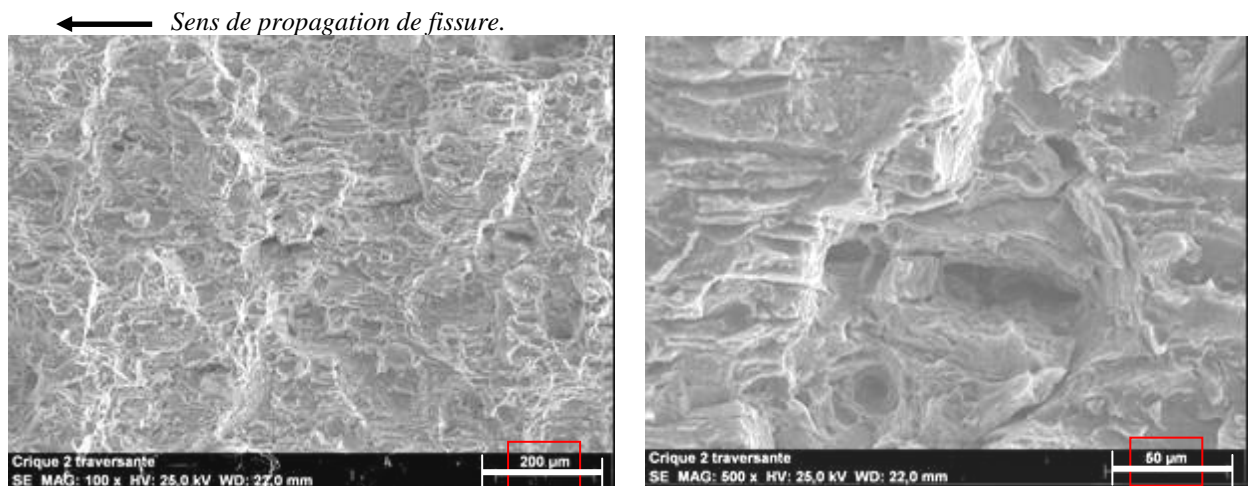


Figure Annexe III) - 8 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à deux grossissements différents.

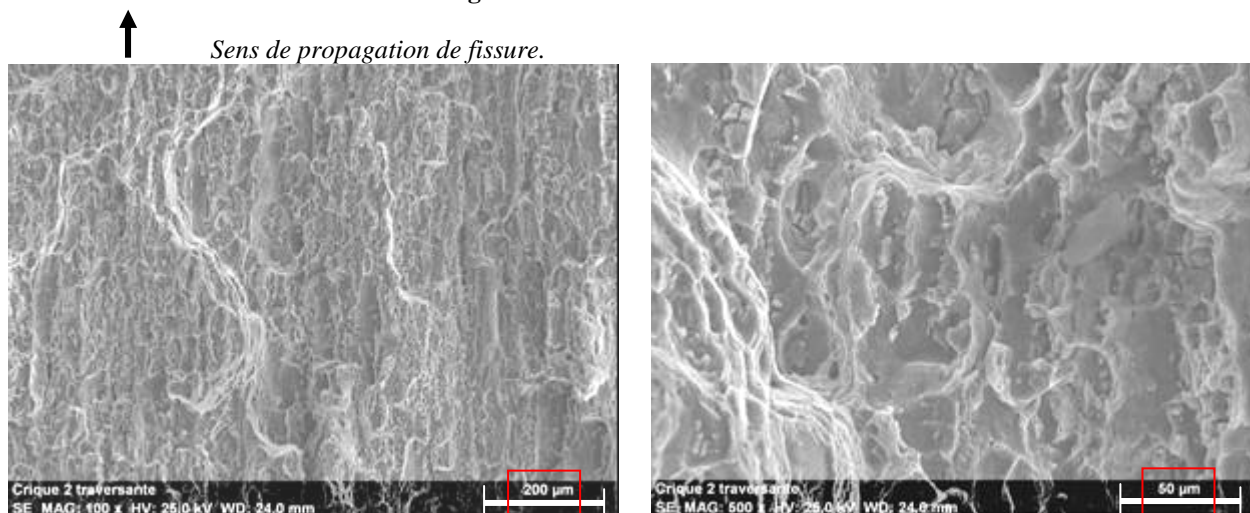


Figure Annexe III) - 9 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à deux grossissements différents.

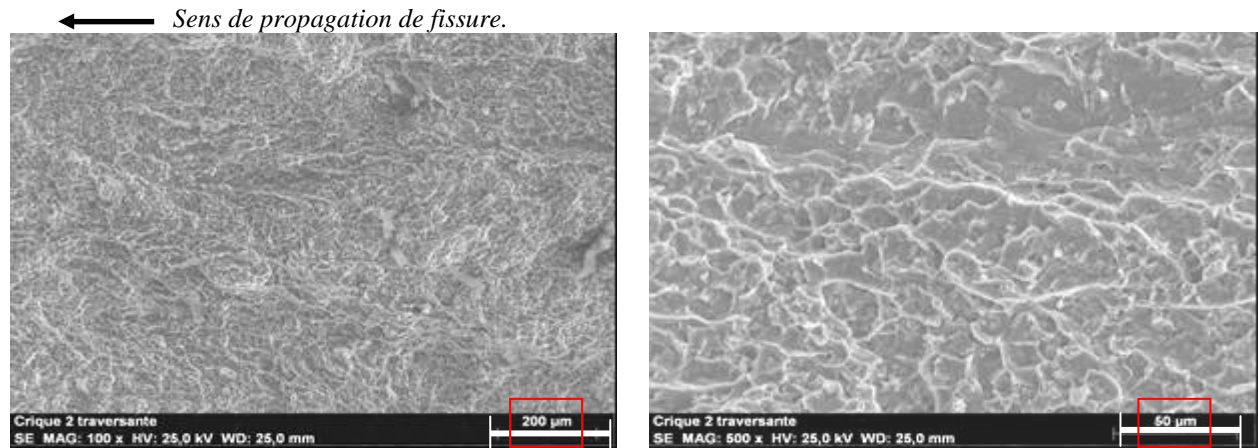


Figure Annexe III) - 10 : Point d'étude n°3 pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens LT à deux grossissements différents.

Ce point se situe après la frontière dans la zone correspondant à l'essai de ténacité, Figure Annexe III) - 8 à Figure Annexe III) - 10. Après la frontière la structure de la surface de rupture ne change presque pas pour les trois matériaux.

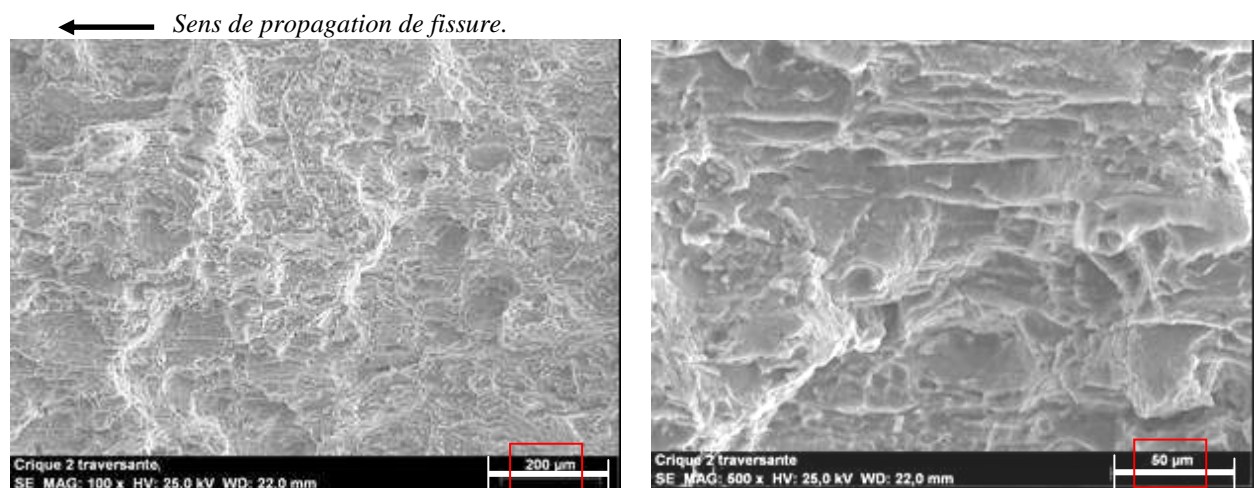


Figure Annexe III) - 11 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à deux grossissements différents.

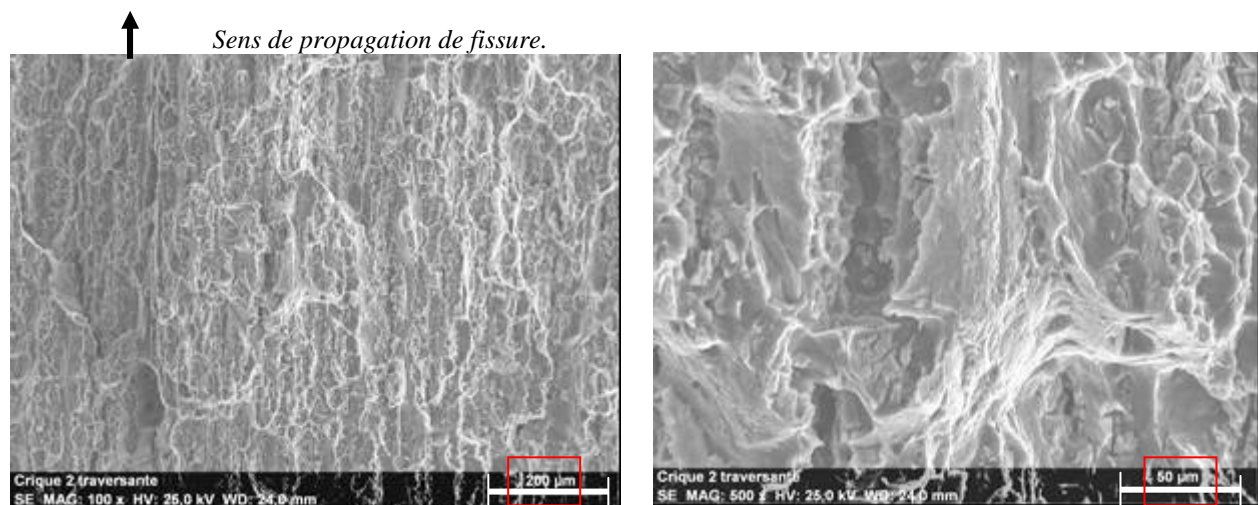


Figure Annexe III) - 12 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à deux grossissements différents.

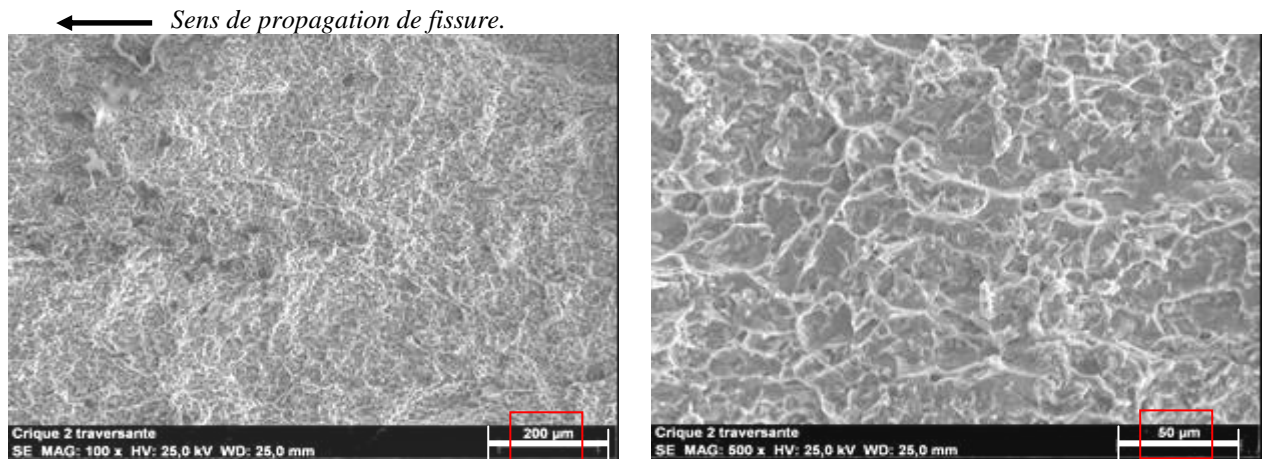


Figure Annexe III) - 13 : Point d'étude n°4 pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens LT à deux grossissements différents.

Au point n°4, Figure Annexe III) - 11 à Figure Annexe III) - 13, nous sommes à la rupture. Pour les trois matériaux, la concentration de cupule est un peu plus importante. La comparaison des surfaces de rupture d'un essai de propagation de fissure à forte valeur de ΔK avec ceux obtenus en ce point montre qu'elles sont très proches.

☉ Sens TL :

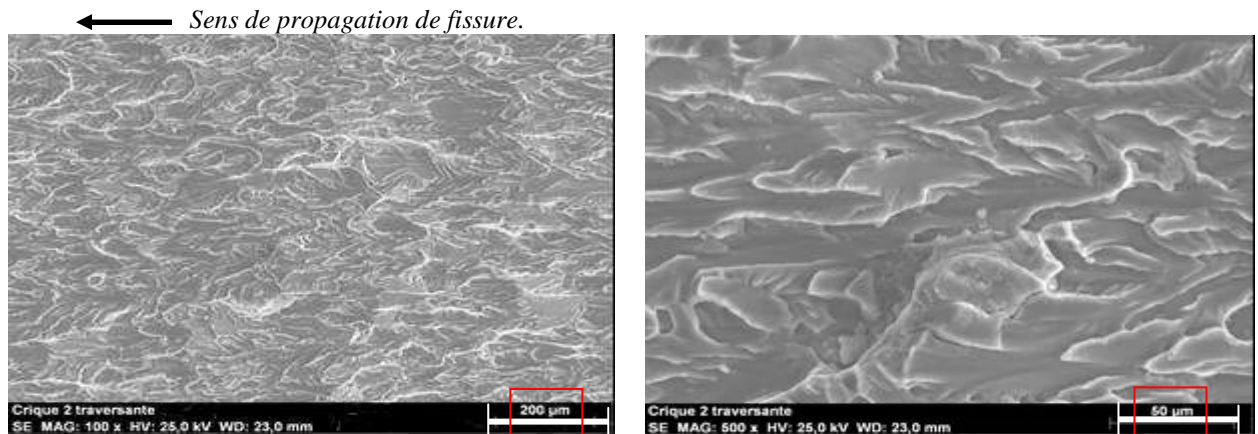


Figure Annexe III) - 14 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL à deux grossissements différents.

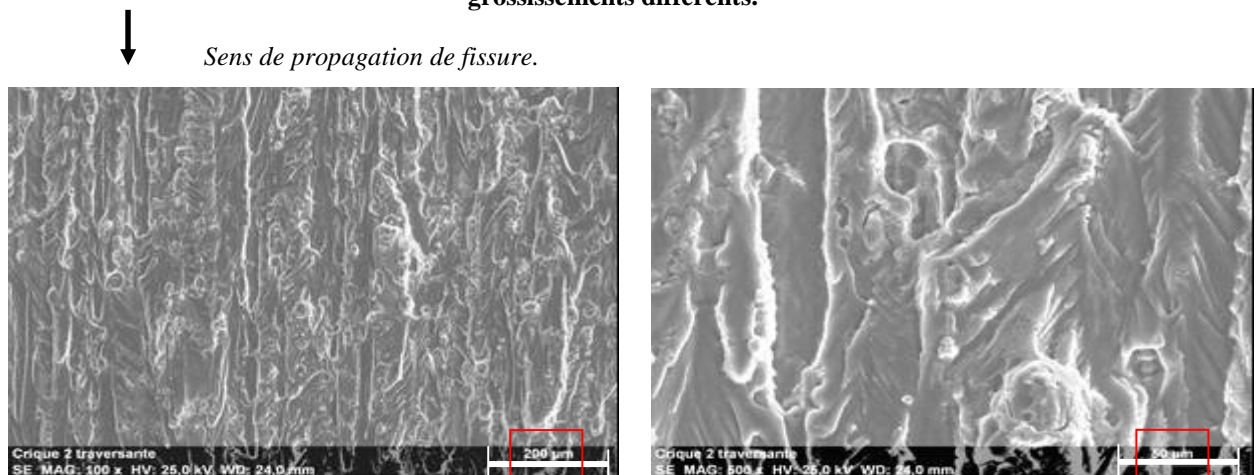


Figure Annexe III) - 15 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à deux grossissements différents.

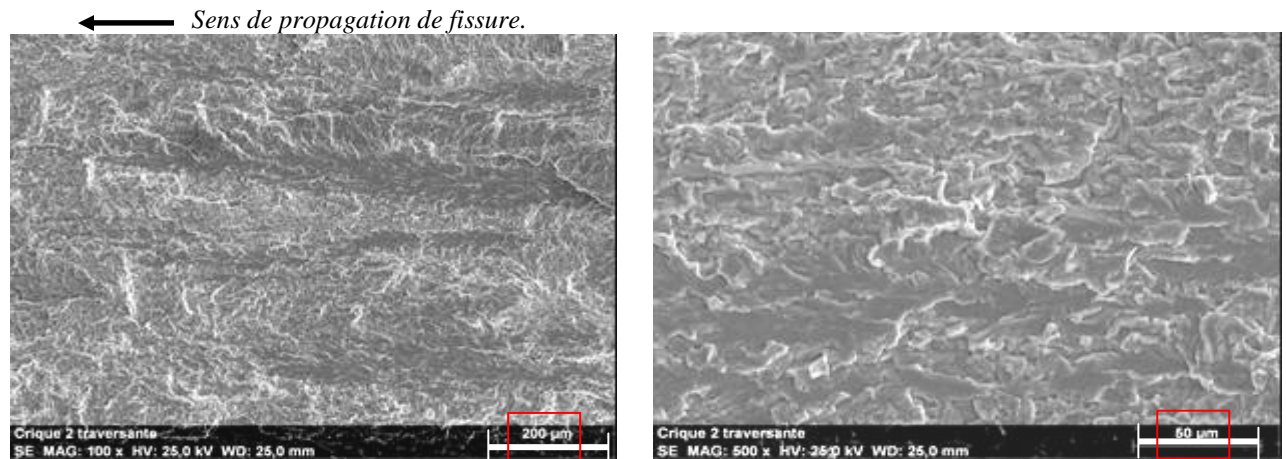


Figure Annexe III) - 16 : Point d'étude n°1 pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens TL à deux grossissements différents.

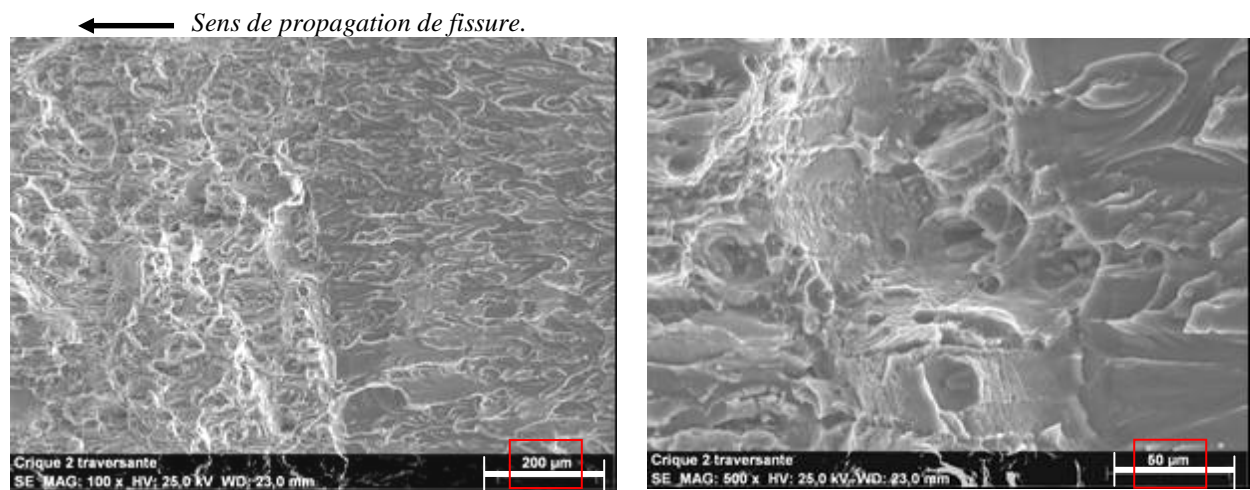


Figure Annexe III) - 17 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL à deux grossissements différents.

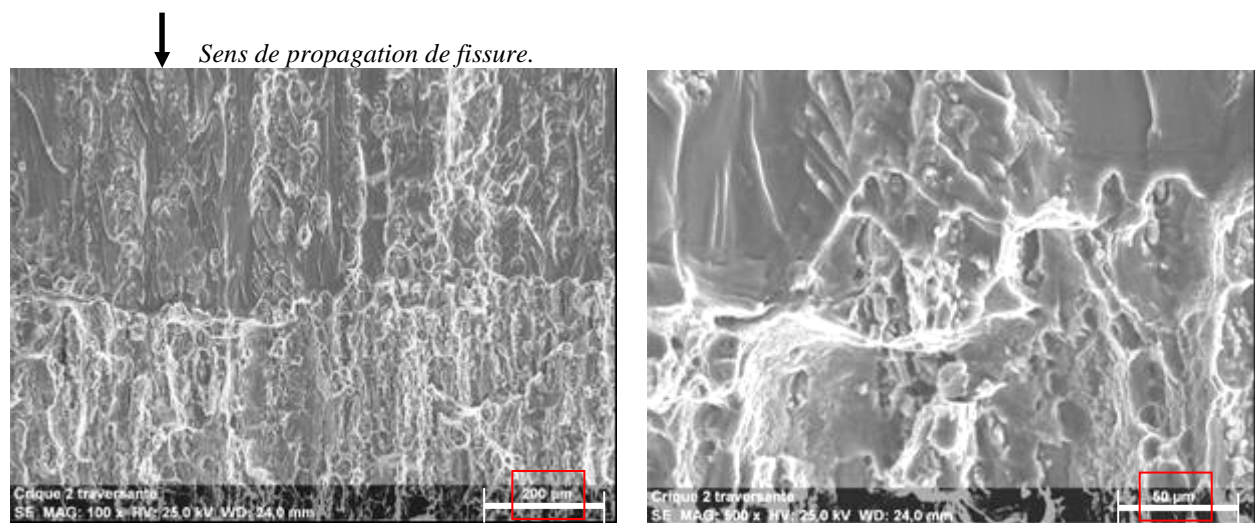


Figure Annexe III) - 18 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à deux grossissements différents.

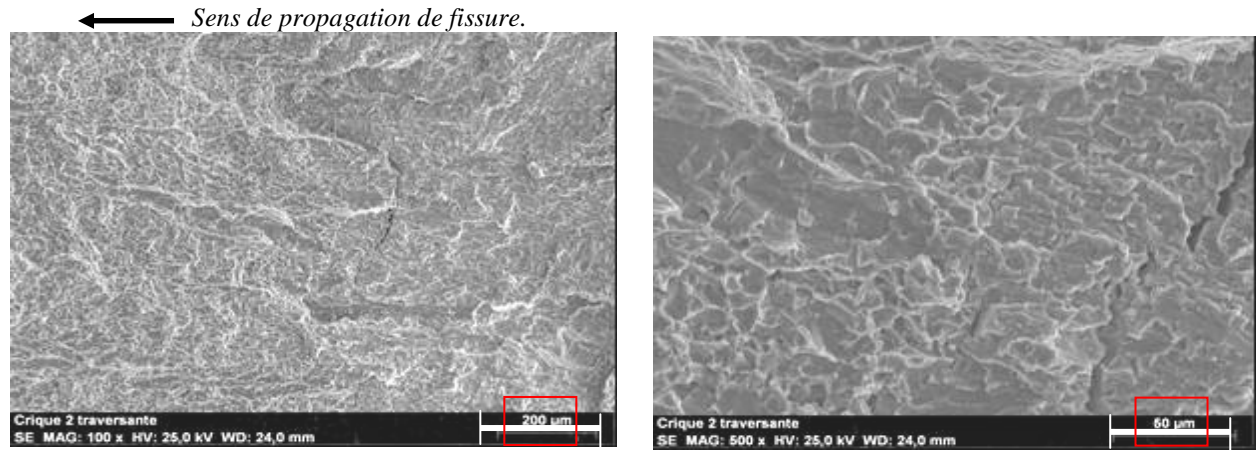


Figure Annexe III) - 19 : Point d'étude n°2 pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens TL à deux grossissements différents.

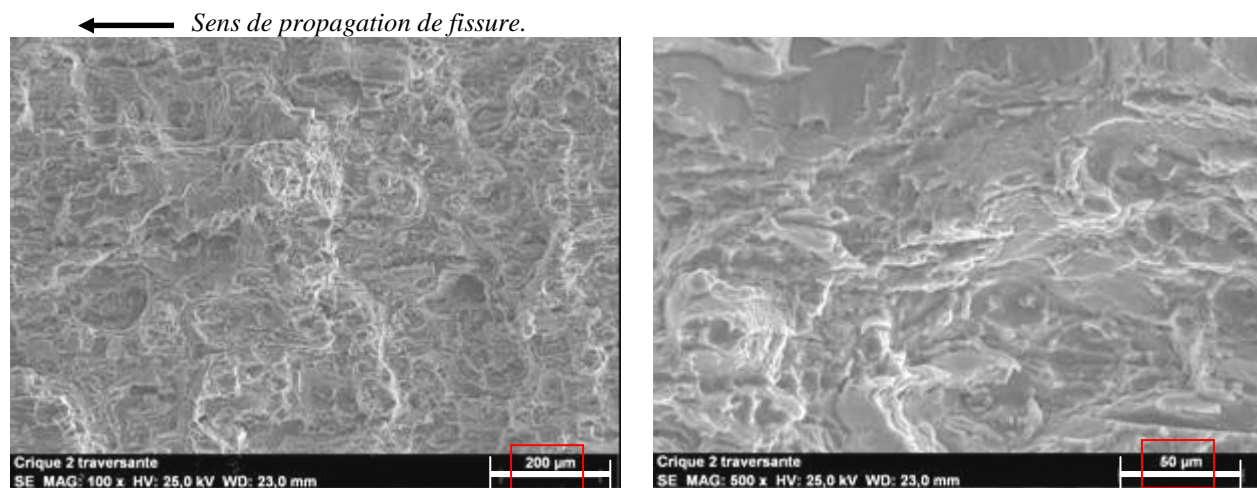


Figure Annexe III) - 20 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL à deux grossissements différents.

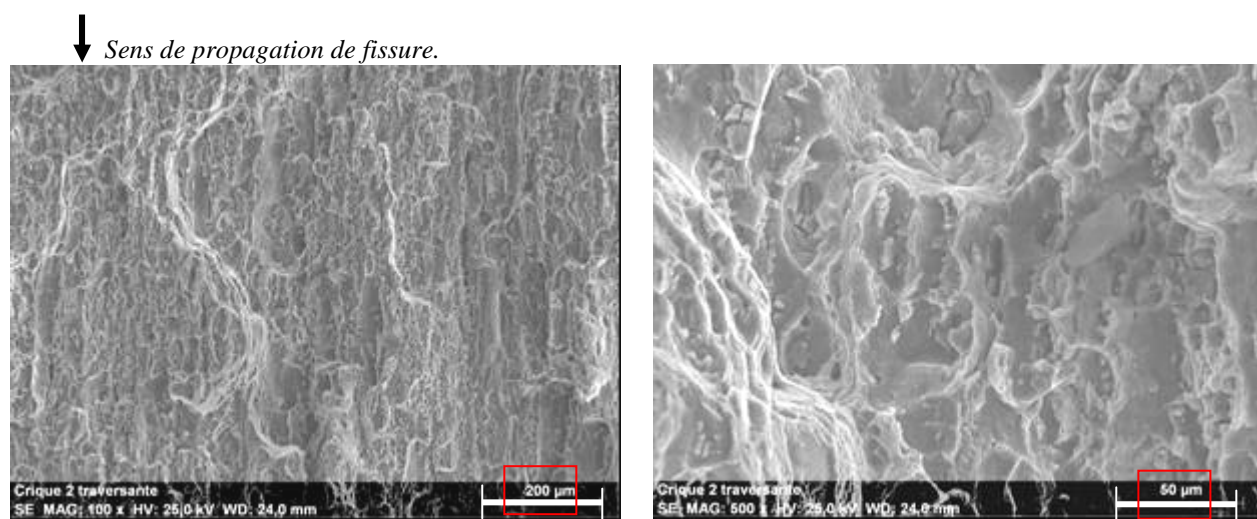


Figure Annexe III) - 21 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à deux grossissements différents.

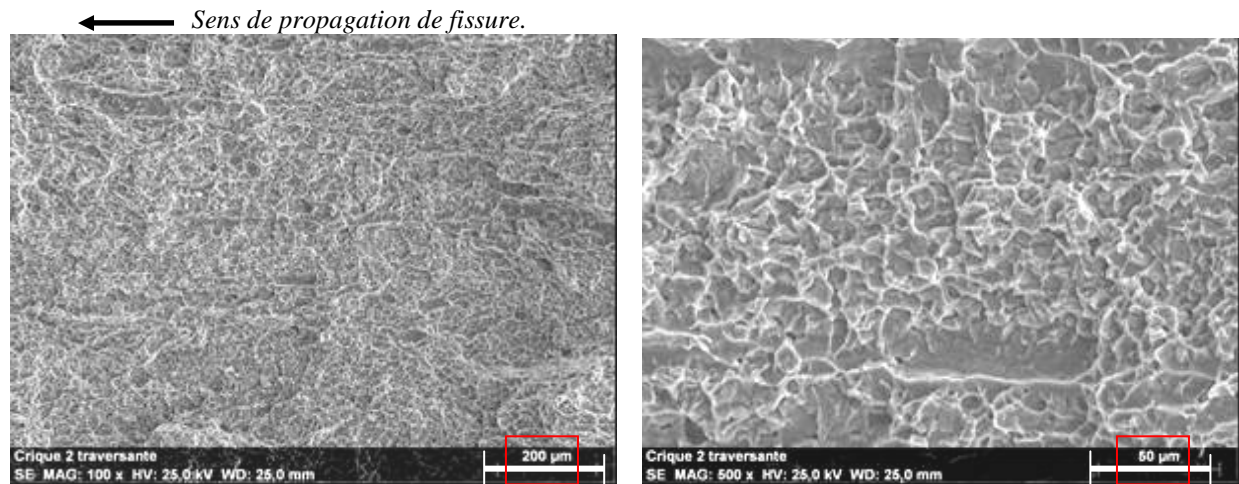


Figure Annexe III) - 22 : Point d'étude n°3 pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens TL à deux grossissements différents.

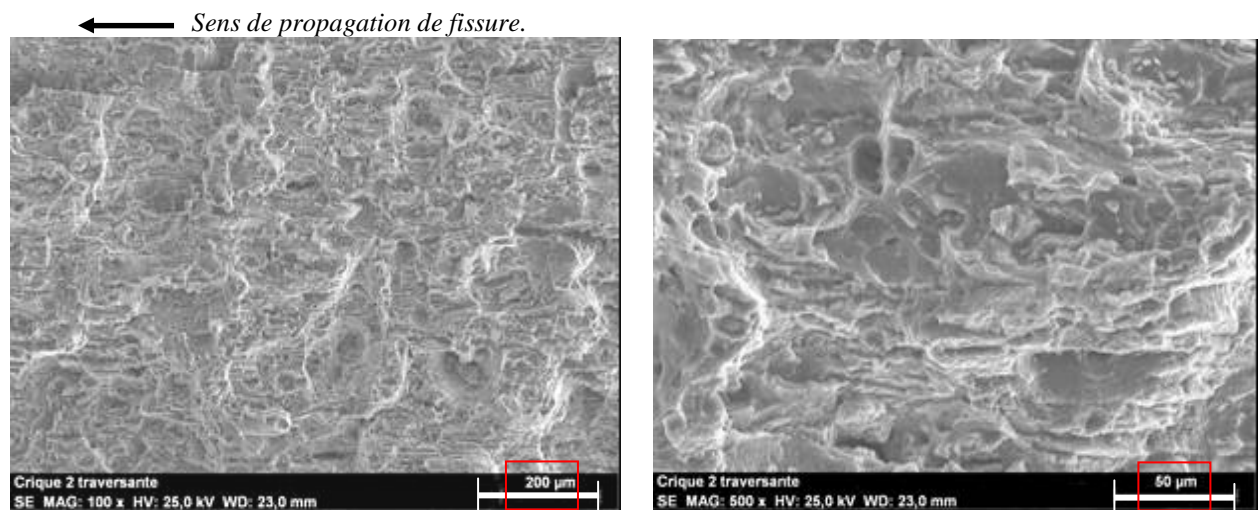


Figure Annexe III) - 23 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL à deux grossissements différents.

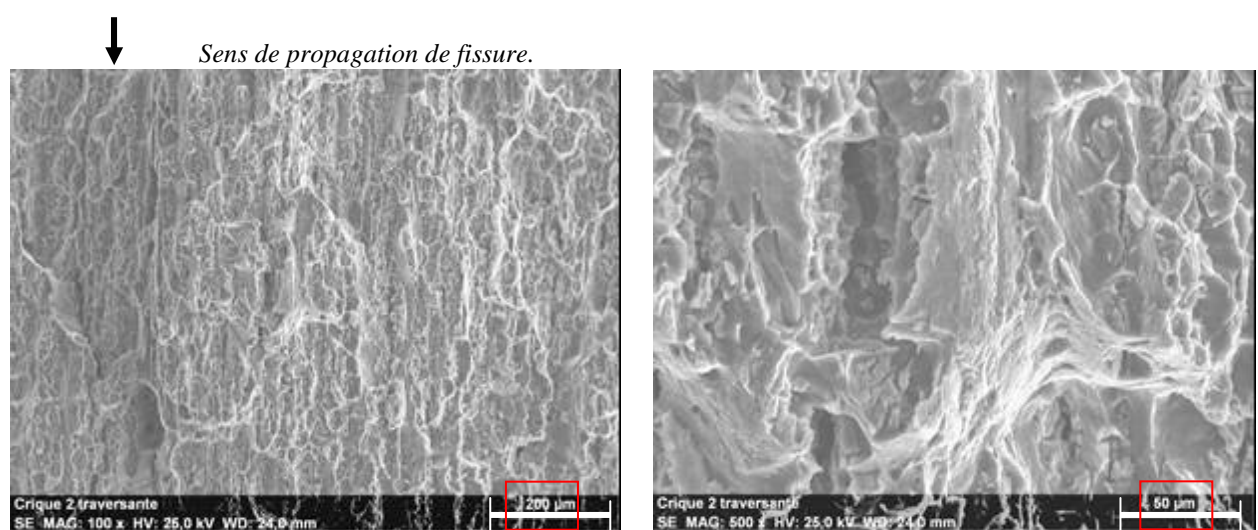


Figure Annexe III) - 24 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à deux grossissements différents.

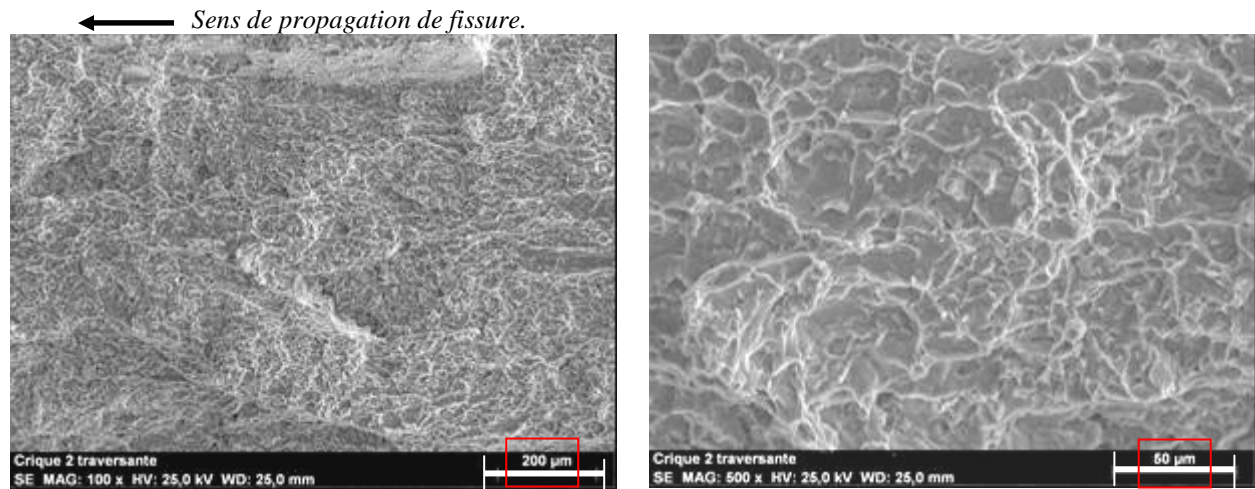


Figure Annexe III) - 25 : Point d'étude n°4 pour l'alliage de Ti-6Al-4V sens TL à deux grossissements différents.

II) Essais de courbe R

Seul un matériau est observé sous MEB : l'alliage d'aluminium 7175 T7351. Comme précédemment, 4 points sont relevés sur la surface de rupture, Figure Annexe III) - 26 :

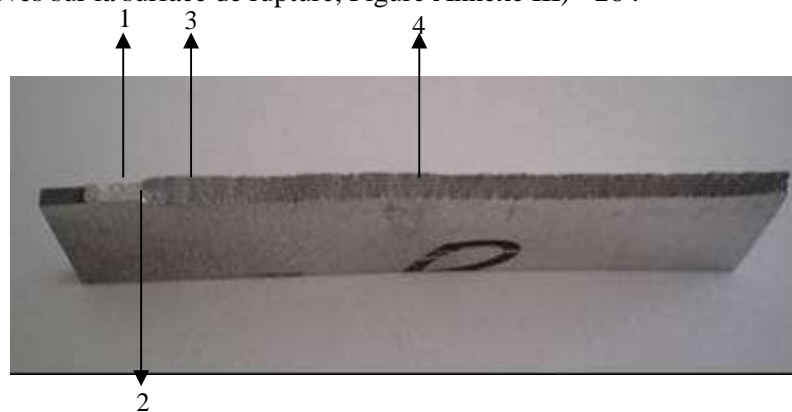


Figure Annexe III) - 26 : Localisation des points d'étude de la surface de rupture d'une éprouvette M (T), W = 200, rompue lors d'un essai de courbe R.

☉ Sens LT :

→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT.

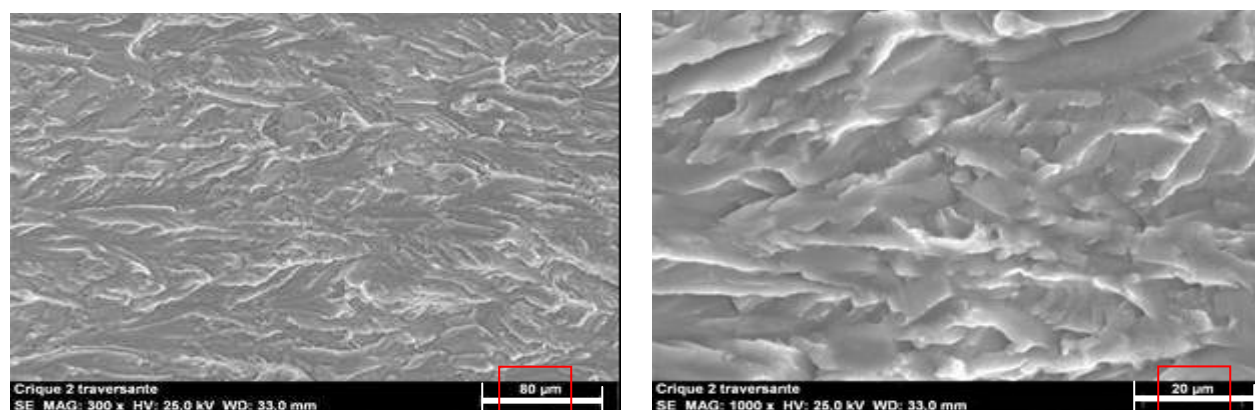


Figure Annexe III) - 27 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.

—————> *Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T 7351 sens LT.*

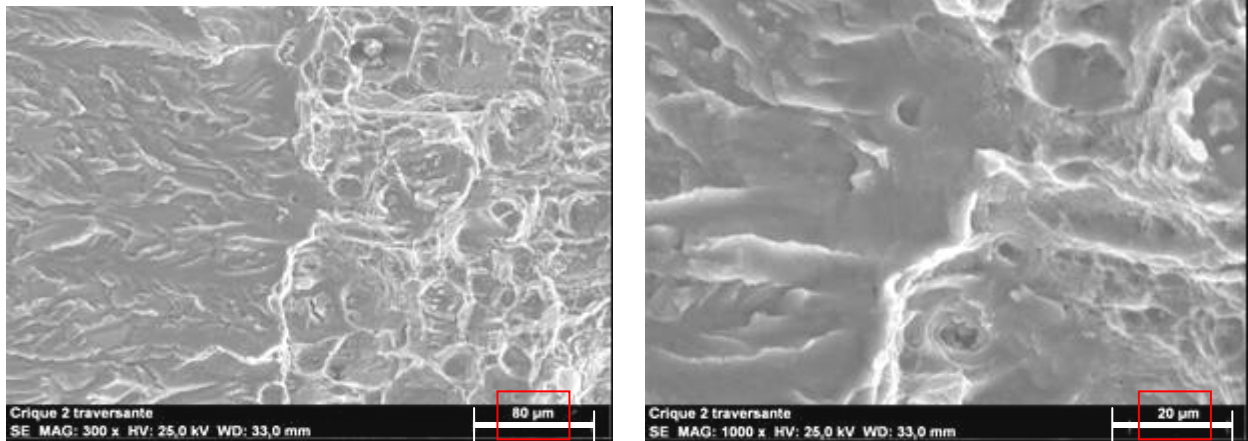


Figure Annexe III) - 28 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.

—————> *Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T 7351 sens LT.*

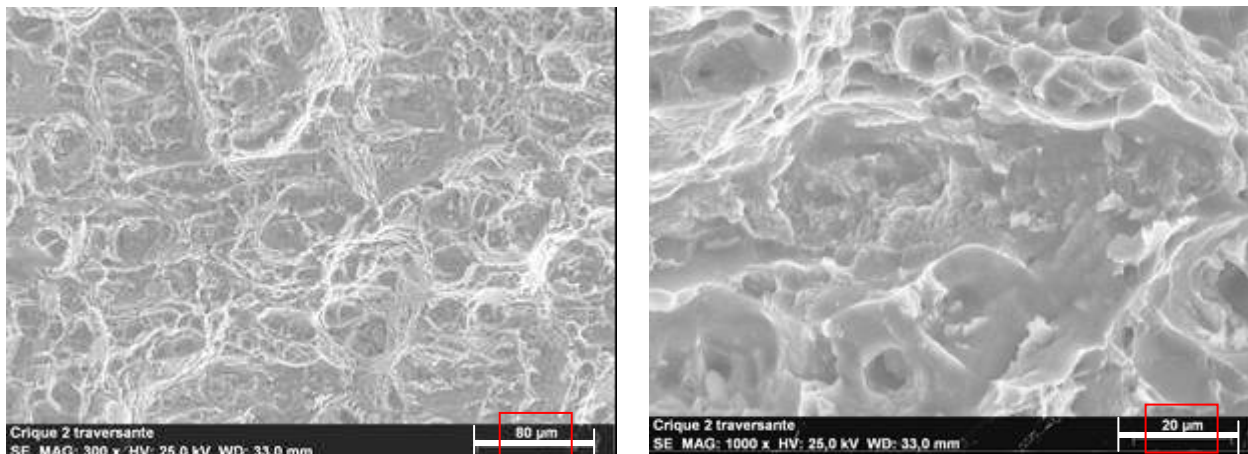


Figure Annexe III) - 29 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.

—————> *Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T 7351 sens LT.*

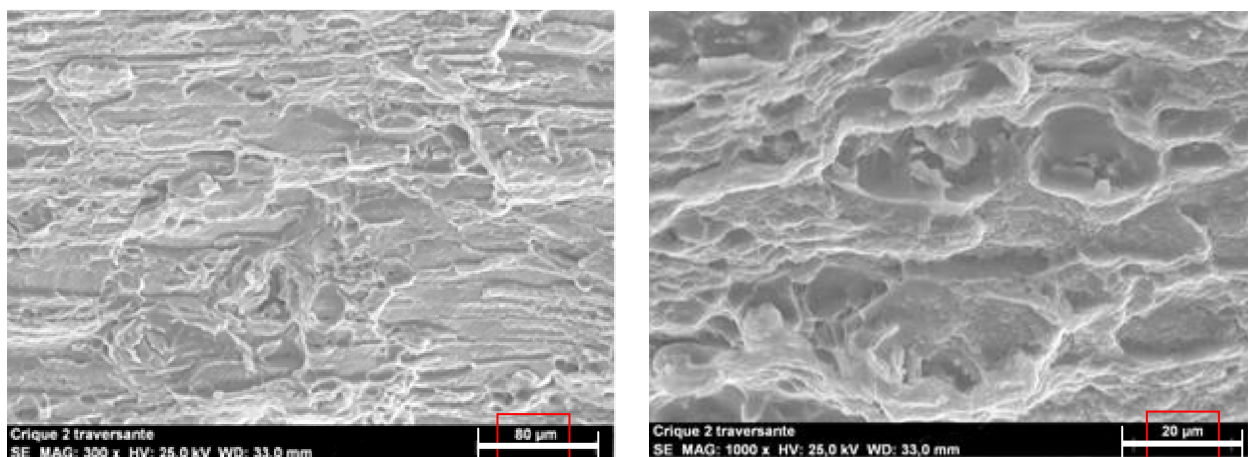


Figure Annexe III) - 30 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.

Les remarques, faites sur les surfaces de rupture d'une éprouvette CT W = 40 ayant subi un essai de ténacité, peuvent s'appliquer aussi à cette surface de rupture. Au point n°1, Figure Annexe III) - 27,

nous sommes dans la phase de préfissuration qui est caractérisé par la présence de facette de quasi clivage. Aucune cupule n'est présente.

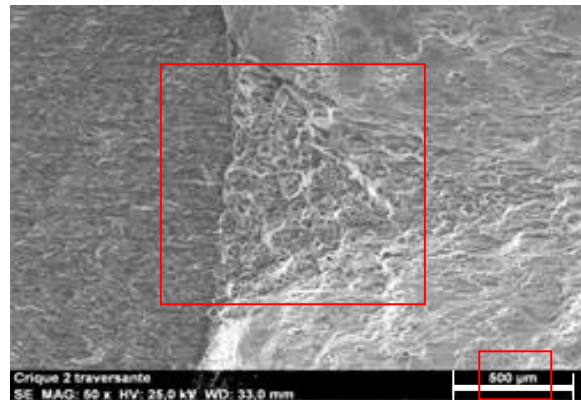


Figure Annexe III) - 31 : Structure triangulaire au point n°2 lors d'un essai de courbe R sur de l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT.

Puis à la frontière, Figure Annexe III) - 28, délimitant la fin de la phase de préfissuration et le début de l'essai de courbe R, la structure change totalement avec la présence d'une forme triangulaire au centre de la surface de rupture, Figure Annexe III) - 31. Les cupules apparaissent et leur concentration augmente progressivement jusqu'à la rupture finale. Par ailleurs, au point n°4, Figure Annexe III) - 30 les images sont similaires à celle obtenues au même point lors de l'essai de ténacité, Figure Annexe III) - 23.

☉ Sens TL :

Entre les sens de prélèvement LT et TL, nous n'observons que peu de différences. De ce faite, seules les images sont fournies

→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T 7351 sens TL.

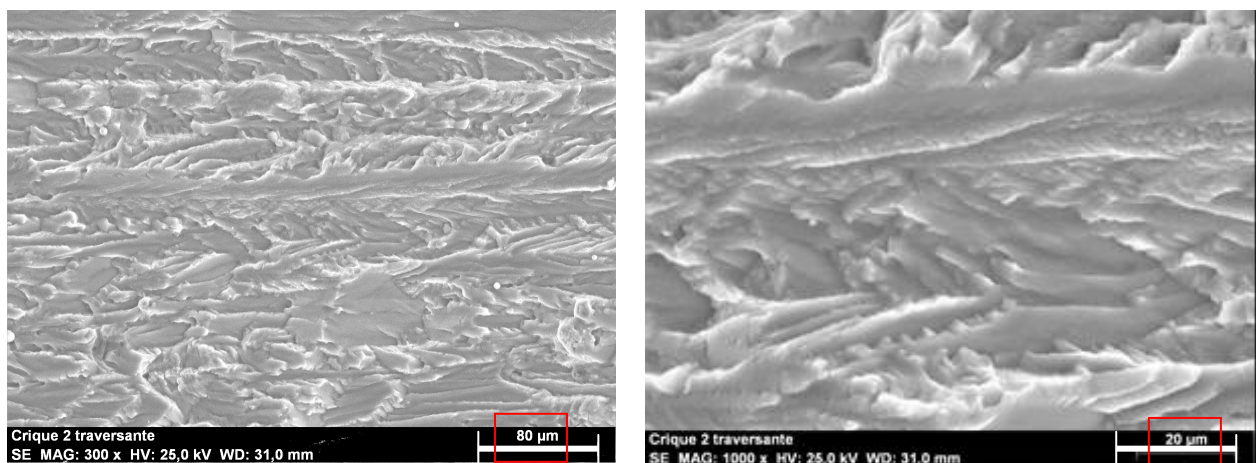


Figure Annexe III) - 32 : Point d'étude n°1 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.

→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T 7351 sens TL.

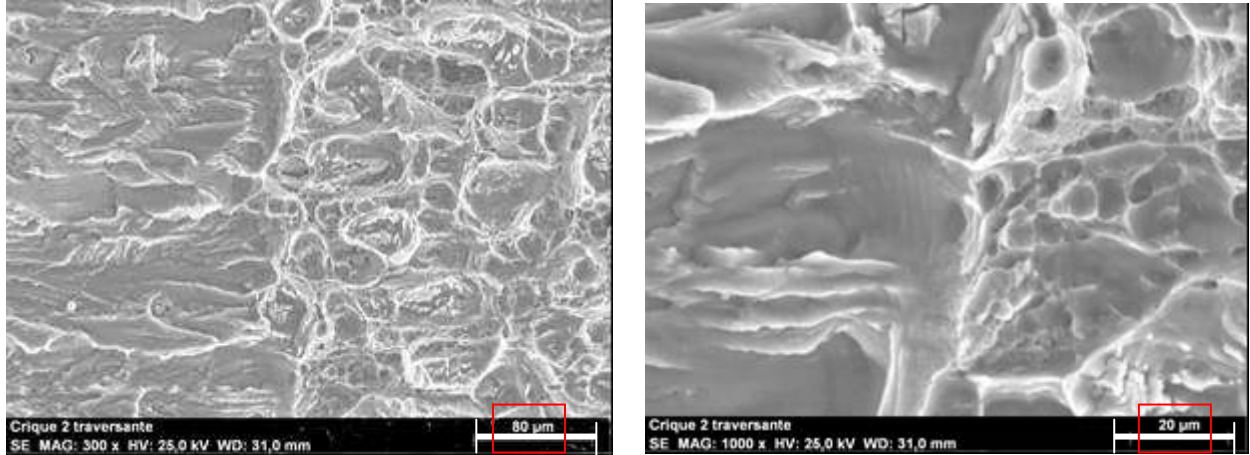


Figure Annexe III) - 33 : Point d'étude n°2 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.

→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T 7351 sens TL.

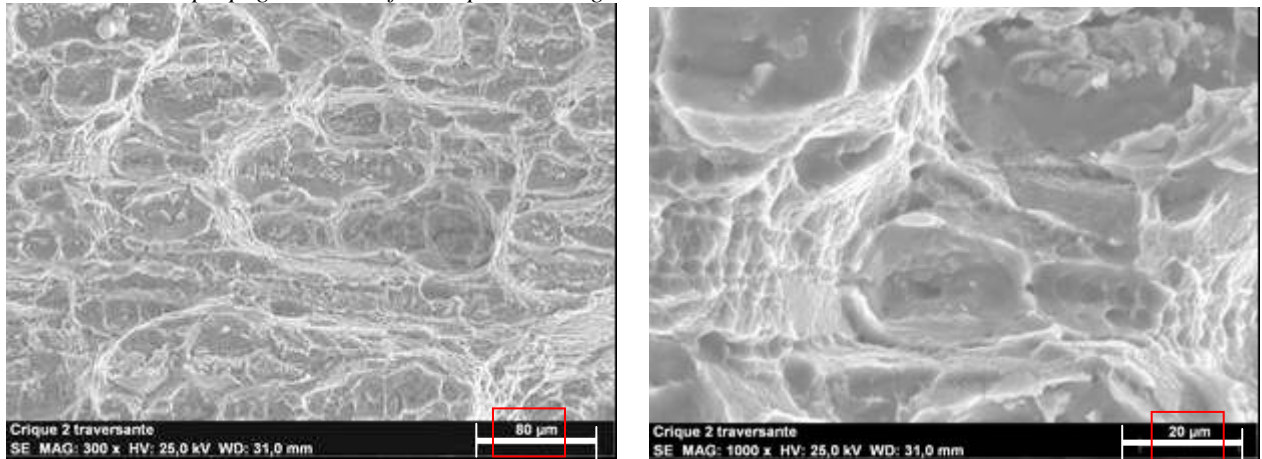


Figure Annexe III) - 34 : Point d'étude n°3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.

→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T 7351 sens TL.

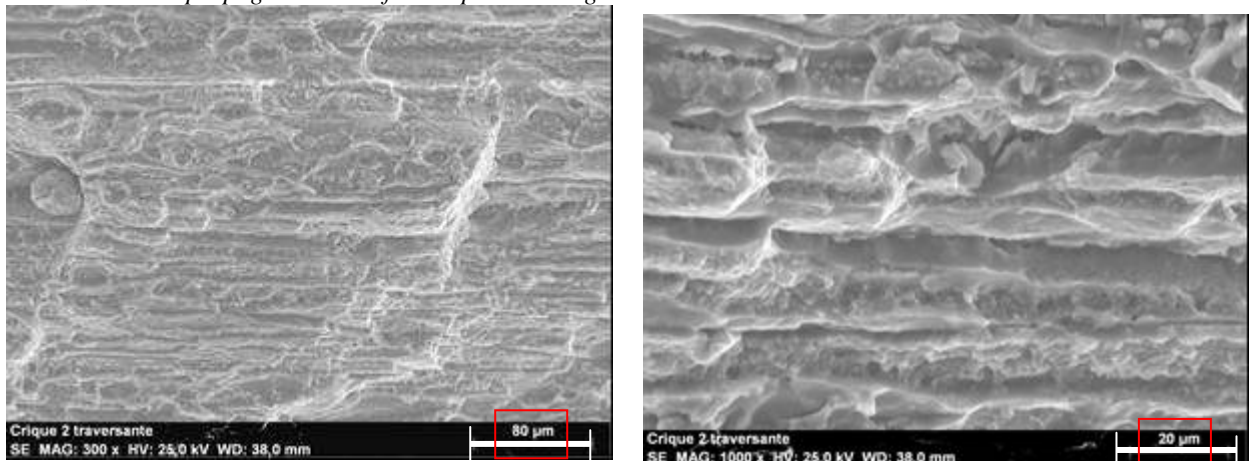


Figure Annexe III) - 35 : Point d'étude n°4 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL lors d'un essai de courbe R à deux grossissements différents.

III) Essais de propagation

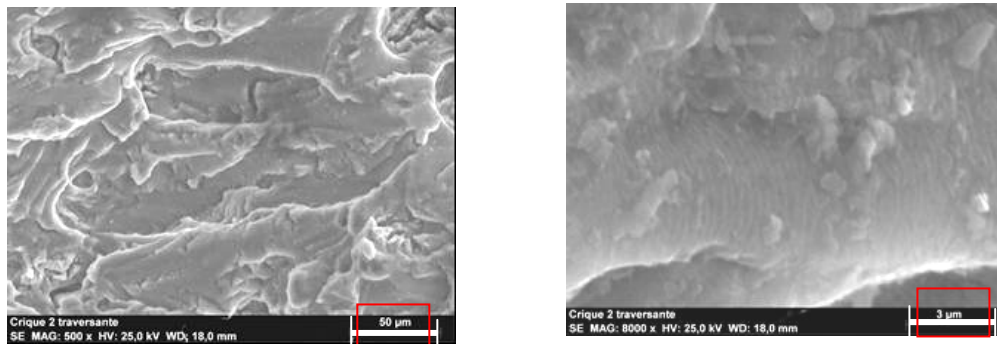
1 Alliage d'aluminium 7175 T7351

☉ Sens LT :

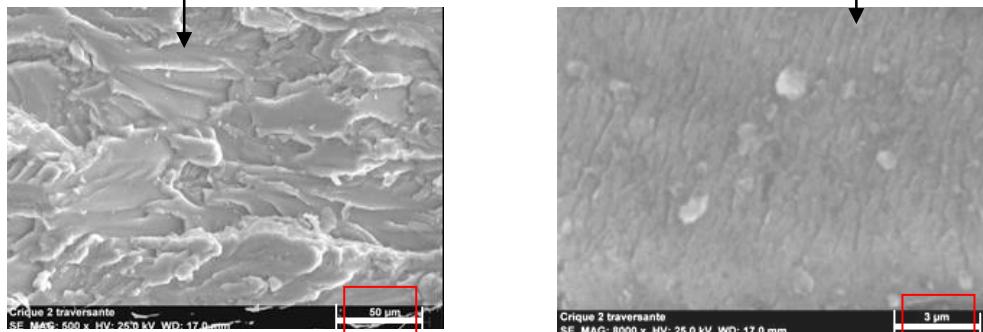
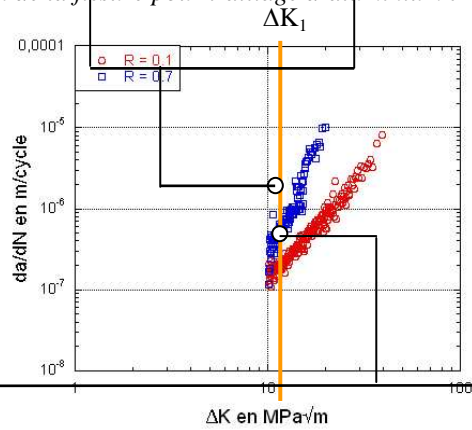
Tableau Annexe III) - 1 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à $R = 0,1$ et $R = 0,7$.

	R = 0,1			R = 0,7		
	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm
1	10,38	1,50E-04	20,06	10,38	3,60E-04	20,5
2	14,84	3,60E-04	30,19	14,86	1,07E-03	30,36
3	19,85	6,40E-04	37,74	19,89	1,01E-02	38
4	32,97	1,82E-03	48,03			

Figure Annexe III) - 36 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. $R = 0,7$ à ΔK_1 .



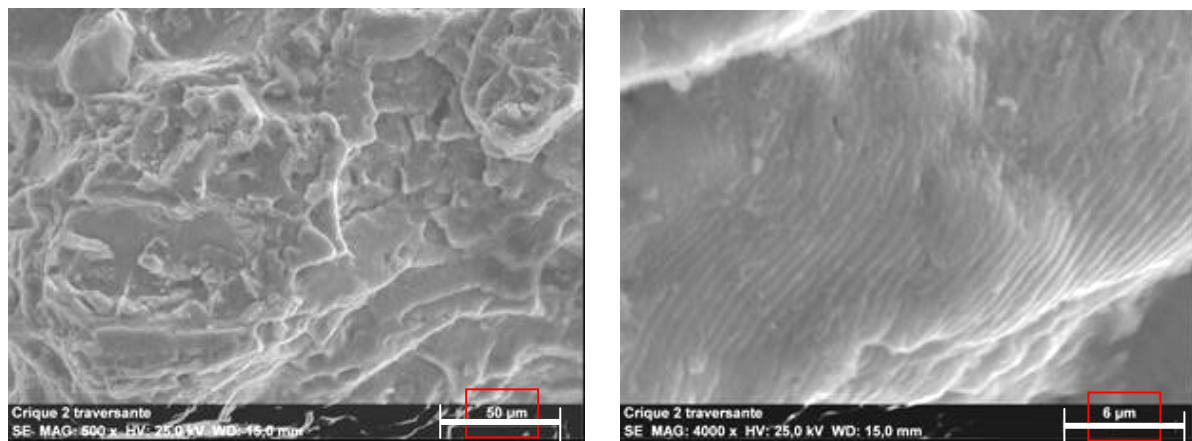
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT, $R = 0,7$.



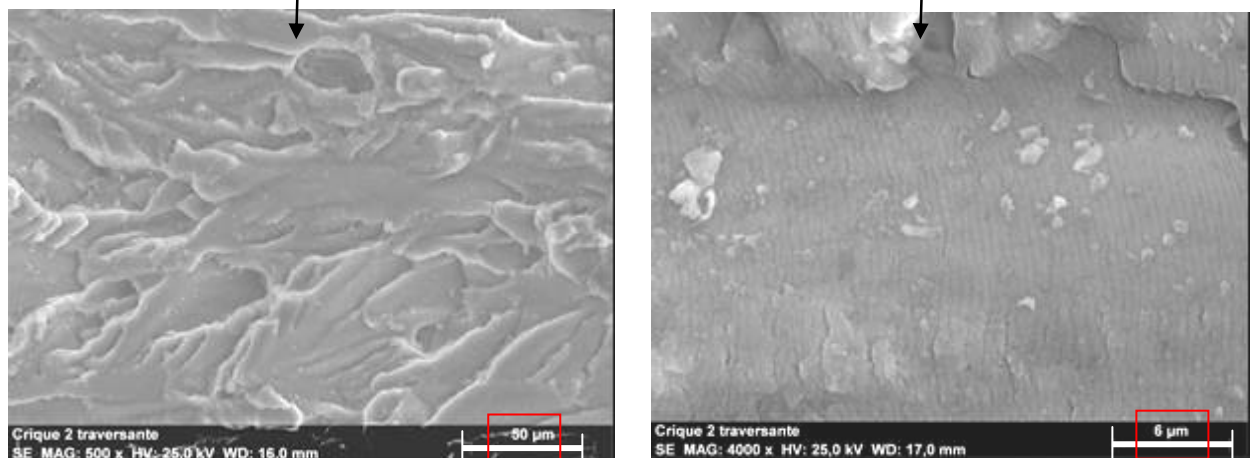
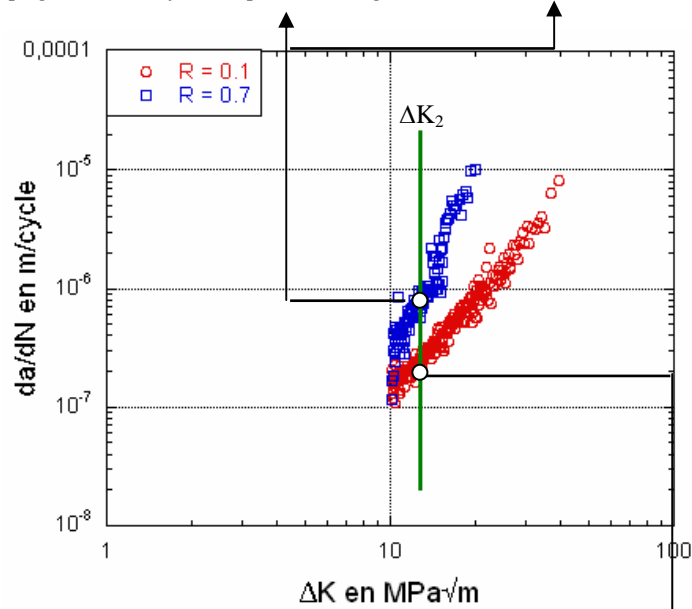
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 37 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. $R = 0,1$ à ΔK_1 .

Figure Annexe III) - 38 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. $R = 0,7$ à ΔK_2 .



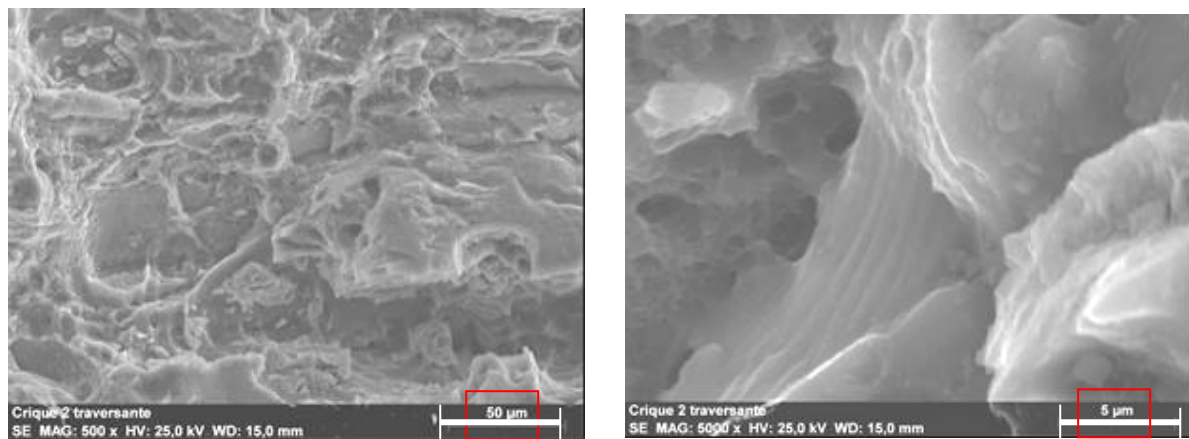
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT, $R = 0,7$.



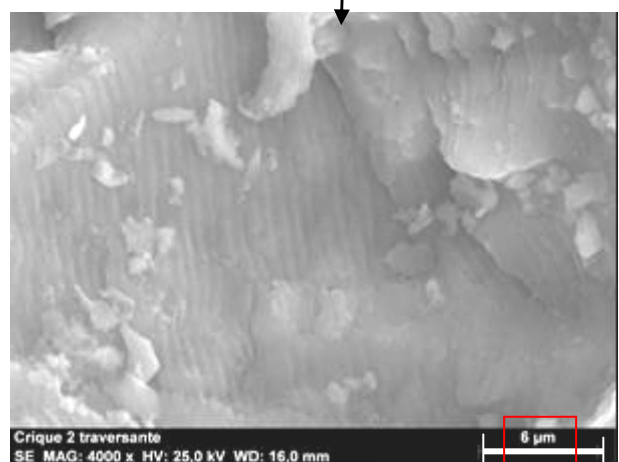
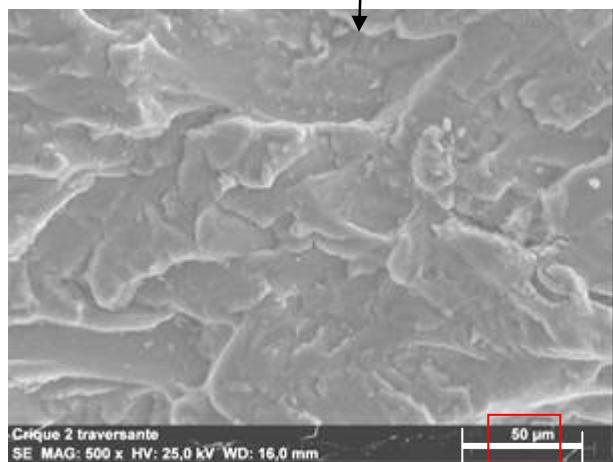
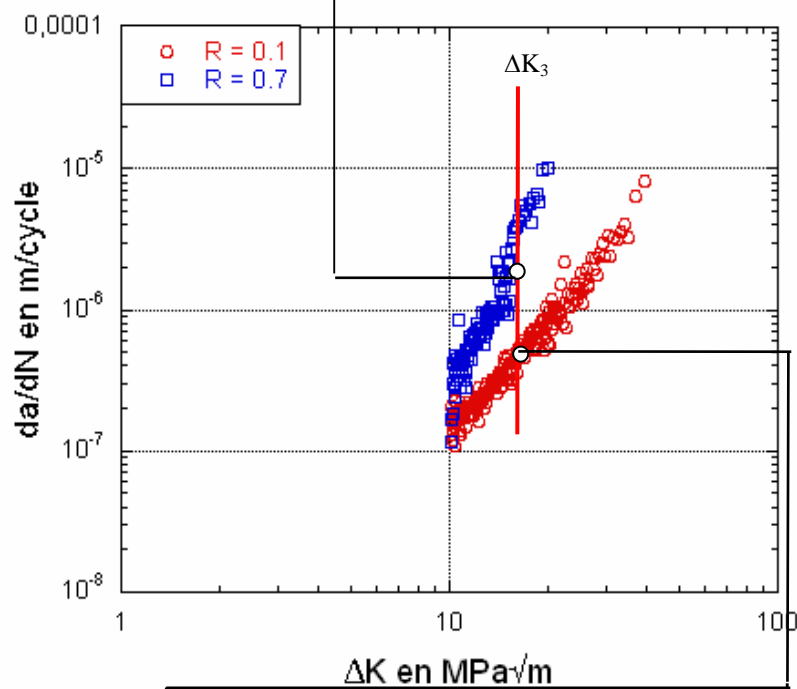
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 39 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. $R = 0,1$ à ΔK_2 .

Figure Annexe III) - 40 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,7 à ΔK_3 .



→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT, R = 0,7.



→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 41 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_3 .

A $R = 0,1$ la rupture finale des alliages d'aluminium et du titane a lieu plus tard qu'à $R = 0,7$. La vitesse de propagation qui correspond à la valeur de ΔK_4 est la même que la vitesse de propagation à ΔK_3 pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 à $R = 0,7$.

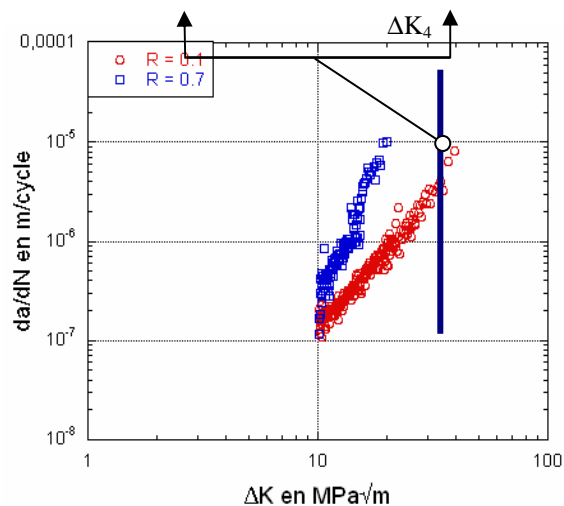
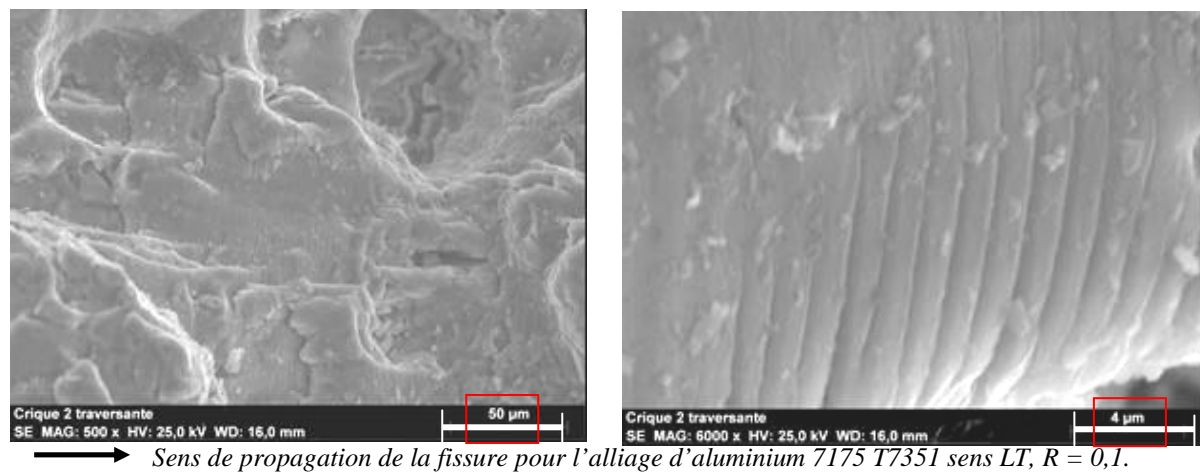


Figure Annexe III) - 42 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT. $R = 0,1$ à ΔK_4 .

L'analyse des images est réalisée dans le chapitre n°2 I) 3-3 et résumée dans les quelques lignes qui suivent. L'étude des courbes en annexe II et des images montrent la présence de deux mécanismes de fissuration liés aux paramètres ΔK et K_{max} . Le premier est caractérisé par la présence de faciès de quasi-clivage sur les surfaces de rupture à faible vitesse de propagation de fissure. Il est associé à ΔK et est nommé dans la suite de l'étude endommagement cyclique. Le second, contrôlé par K_{max} , apparaît à grande vitesse de propagation de fissure sous forme de surfaces accidentées, correspondant à un déchirement ductile. Sa présence sur les surfaces de rupture des essais monotones lui a induit sa dénomination d'endommagement statique.

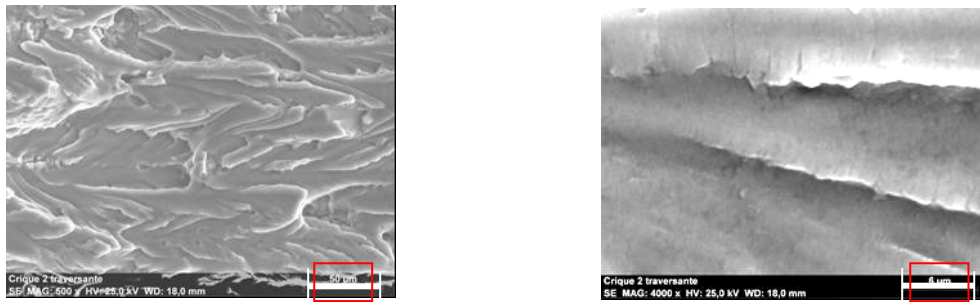
☉ Sens TL :

Les observations réalisées dans les sens TL pour l'alliage d'alliage d'aluminium 7175 T7351 à $R = 0,1$ ne sont pas accessibles et ne seront donc pas présentées dans la partie qui suit.

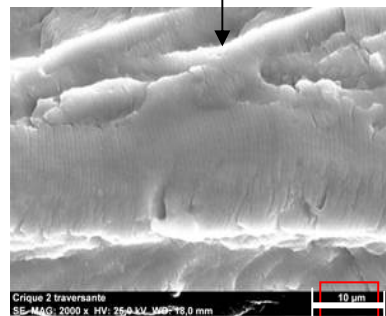
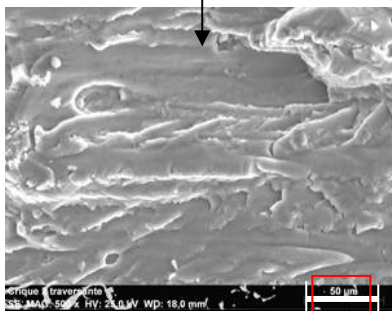
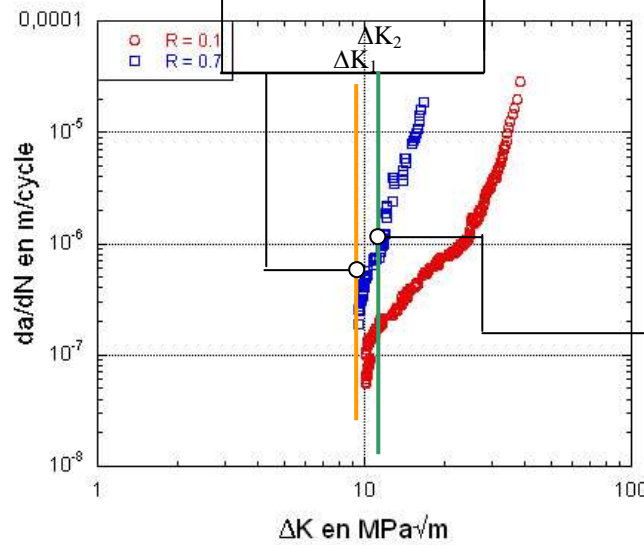
Tableau Annexe III) - 2 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 sens LT à R = 0,7.

	R = 0,7		
	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm
1	10,9	1,92E-04	21,4
2	17,8	8,98E-04	35,2
3	32,3	1,79E-02	50,8

Figure Annexe III) - 43 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_1 .

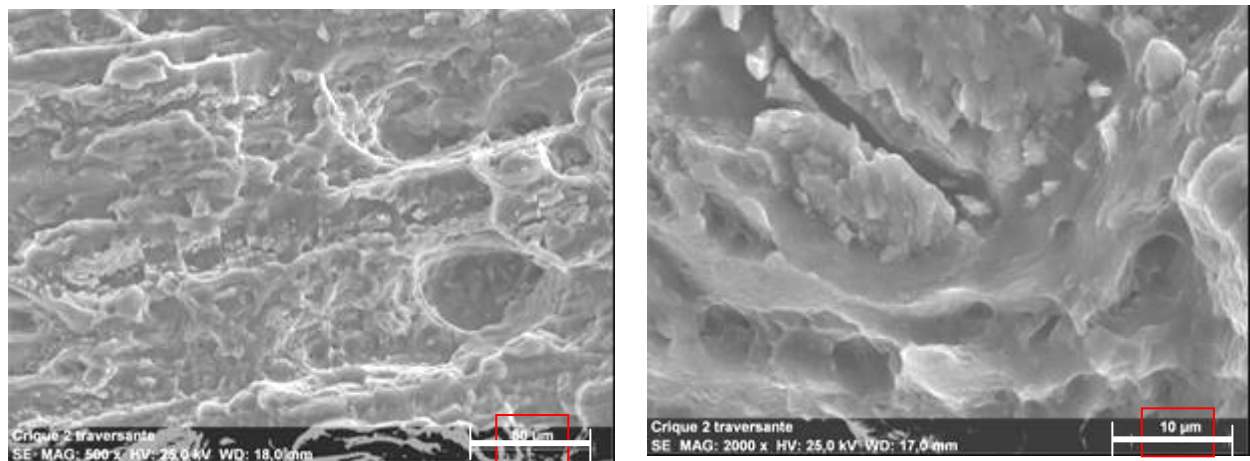


→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 sens TL, R = 0,7.



→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 sens TL, R = 0,7.

Figure Annexe III) - 44 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_2 .



Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 7175 sens TL, R = 0,7.

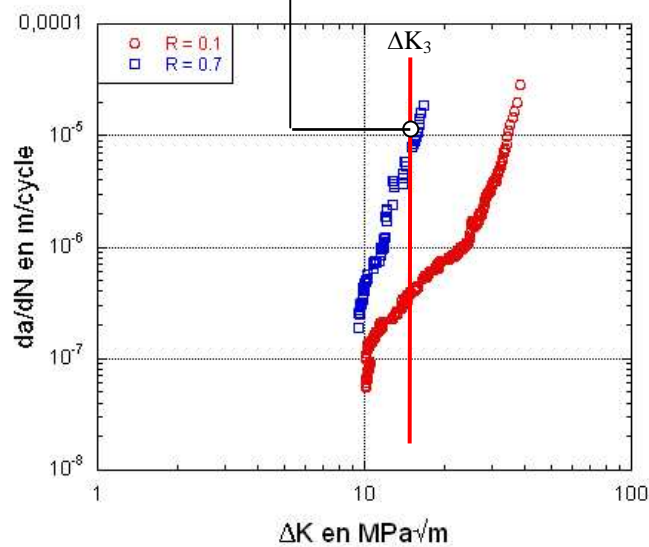


Figure Annexe III) - 45 : Alliage d'aluminium 7175 T7351 sensTL. R = 0,7 à ΔK_3 .

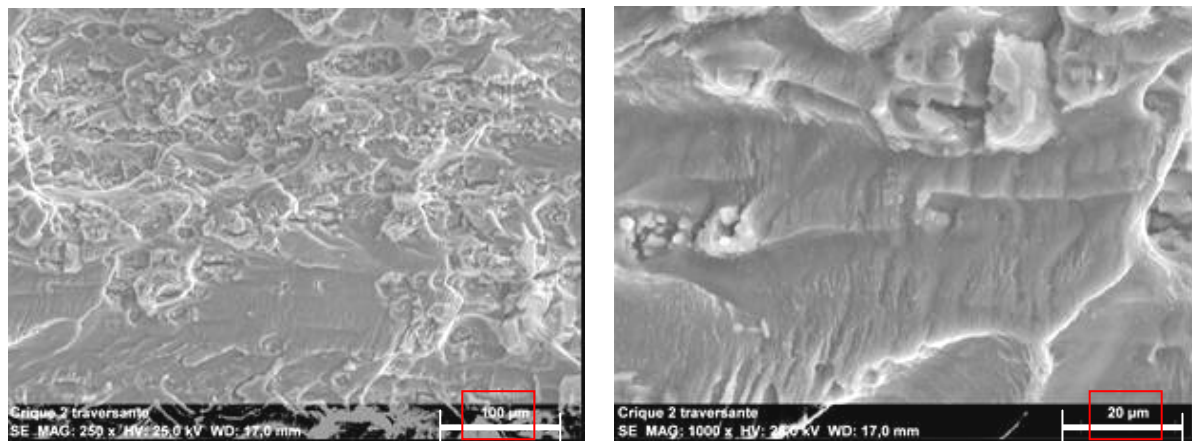
2 Alliage d'aluminium 2024 T351

☉ Sens LT :

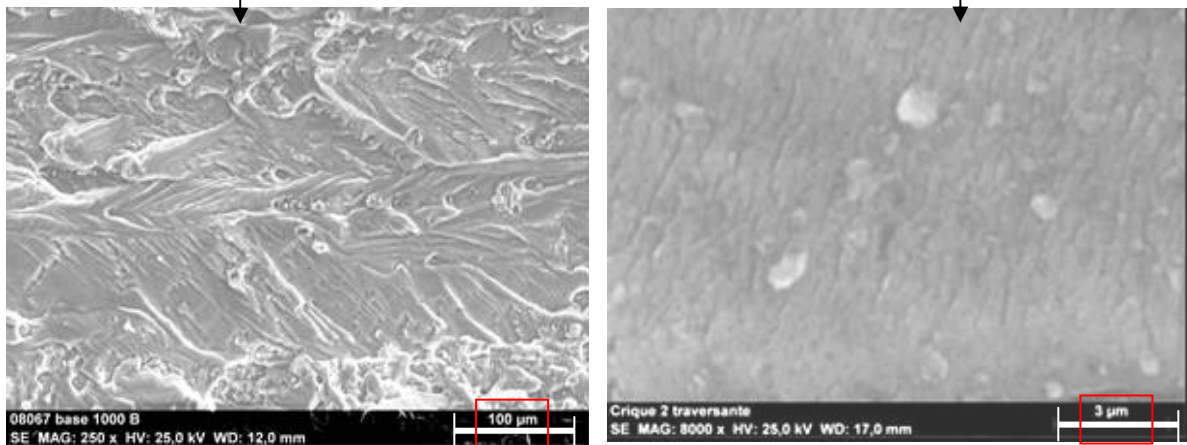
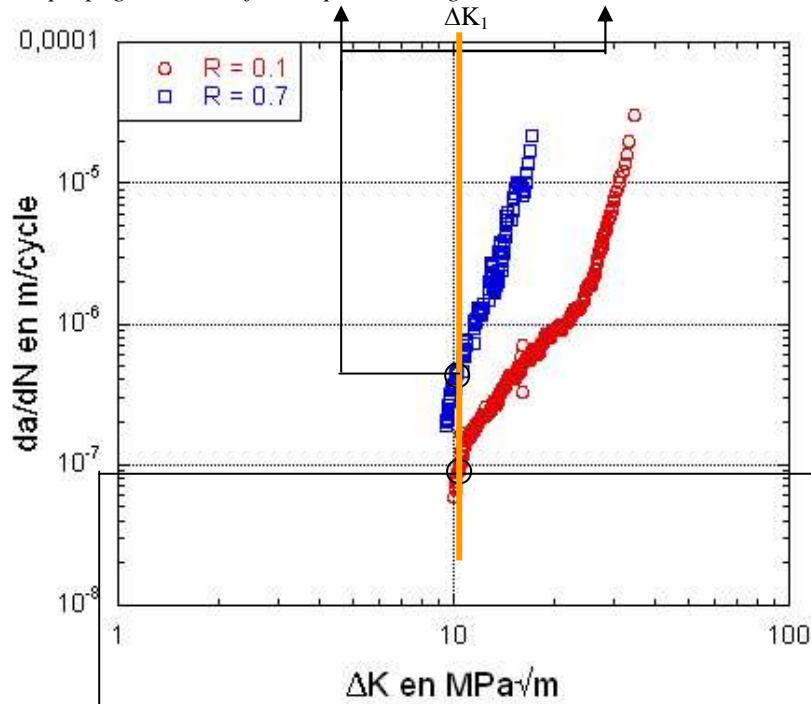
Tableau Annexe III) - 3 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT à R = 0,1 et R = 0,7.

	R = 0,1			R = 0,7		
	Delta K MPa·m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm	Delta K MPa·m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm
1	11,4	1,73E-04	22,8	11,5	9,92E-04	23,1
2	13,5	2,88E-04	27,7	13,5	2,05E-03	27,6
3	16,9	5,72E-04	33,9	16,9	1,72E-02	34
4	33,4	1,96E-02	48,5			

Figure Annexe III) - 46 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R = 0,7 à ΔK_I .



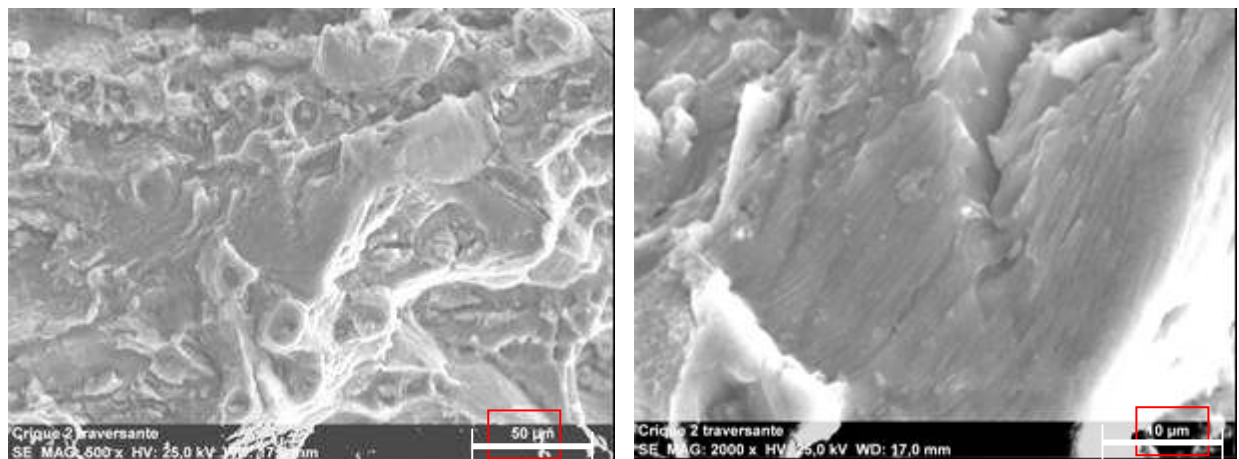
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens LT, R = 0,7.



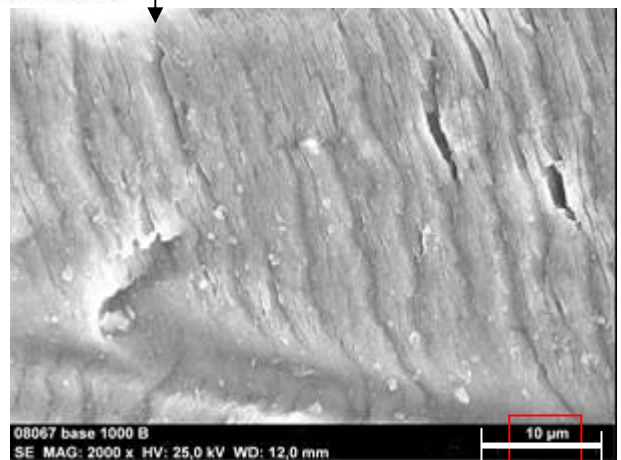
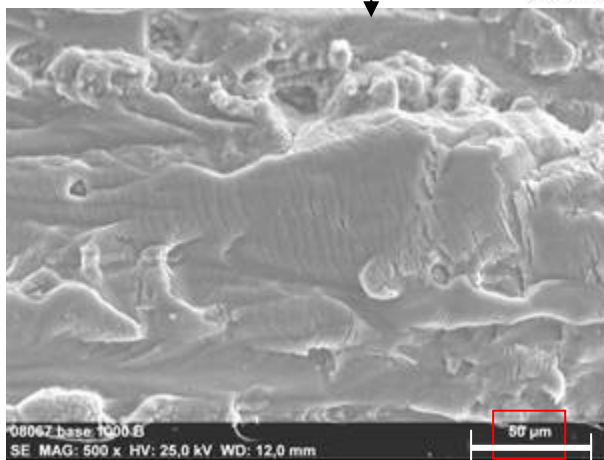
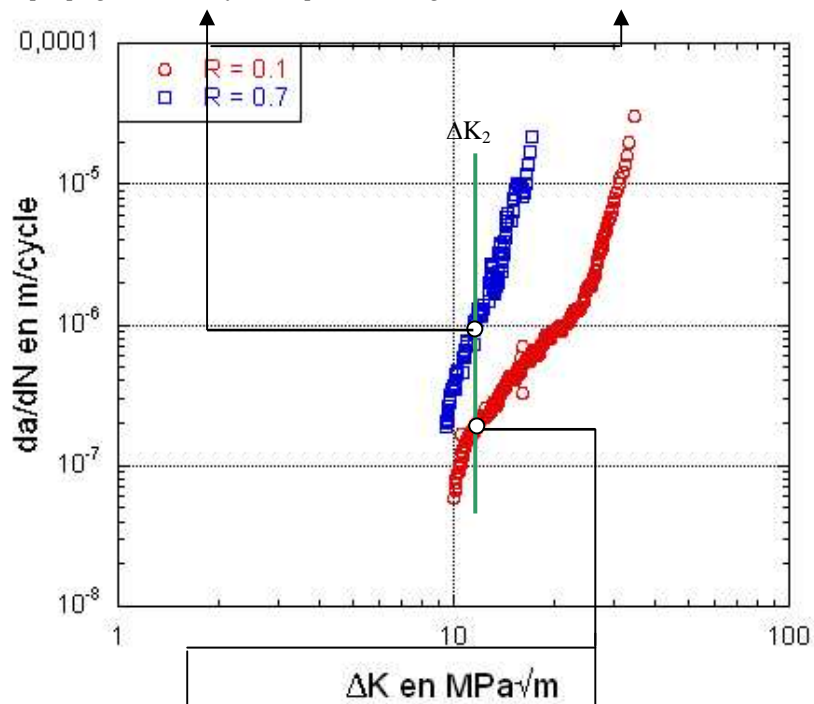
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens LT, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 47 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. R = 0,1 à ΔK_I .

Figure Annexe III) - 48 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. $R = 0,7$ à ΔK_2 .



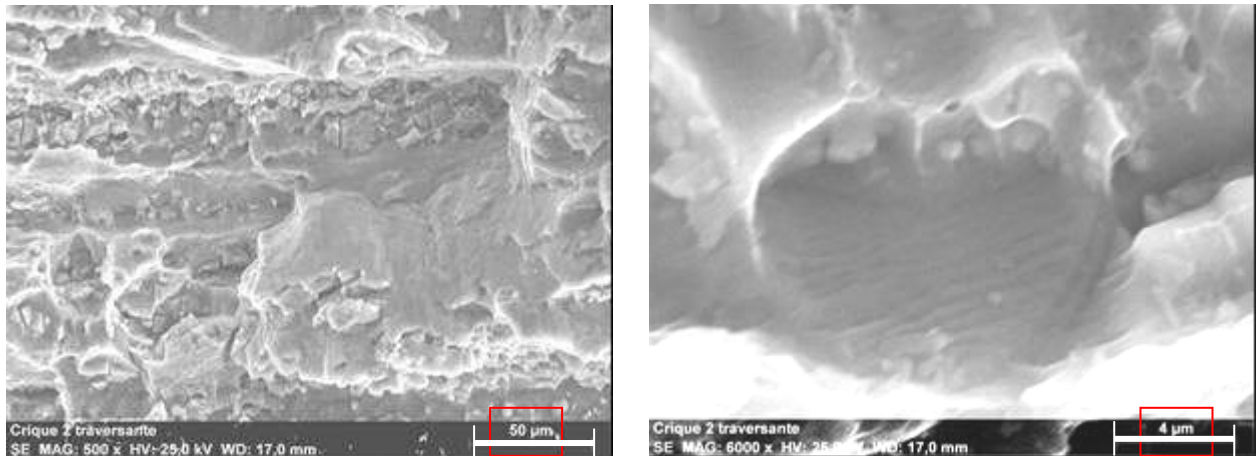
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens LT, $R = 0,7$.



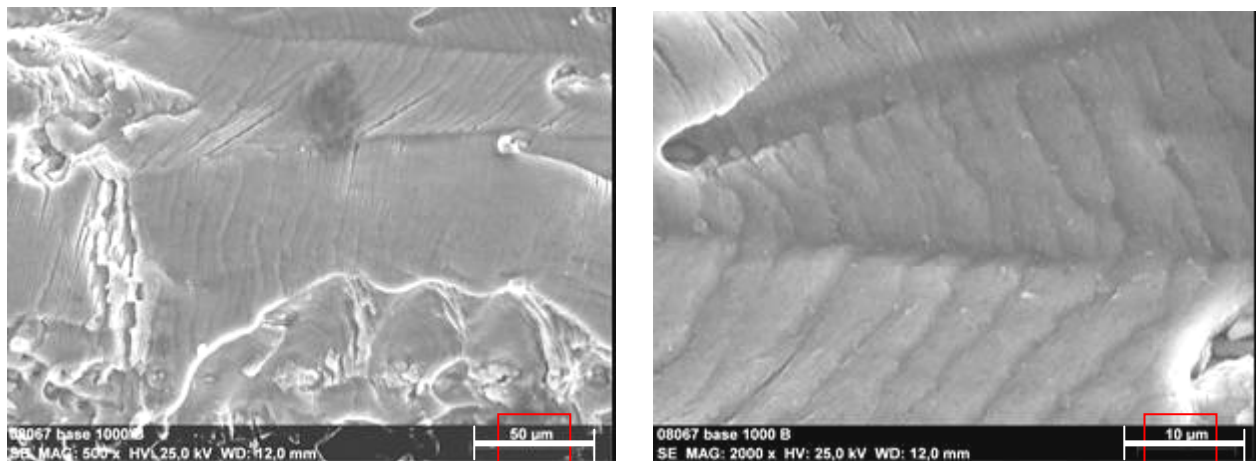
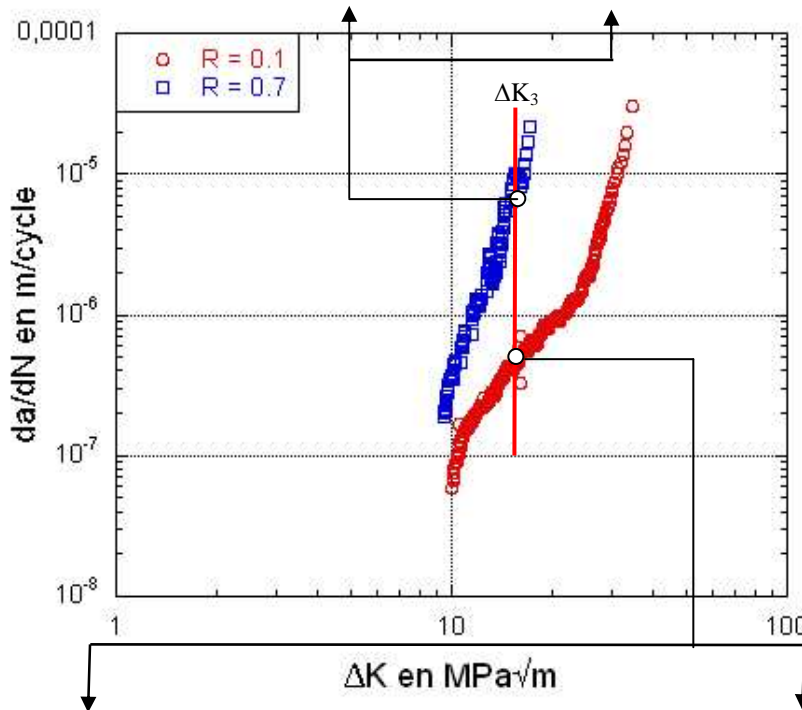
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens LT, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 49 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. $R = 0,1$ à ΔK_2 .

Figure Annexe III) - 50 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. $R = 0,7$ à ΔK_3 .



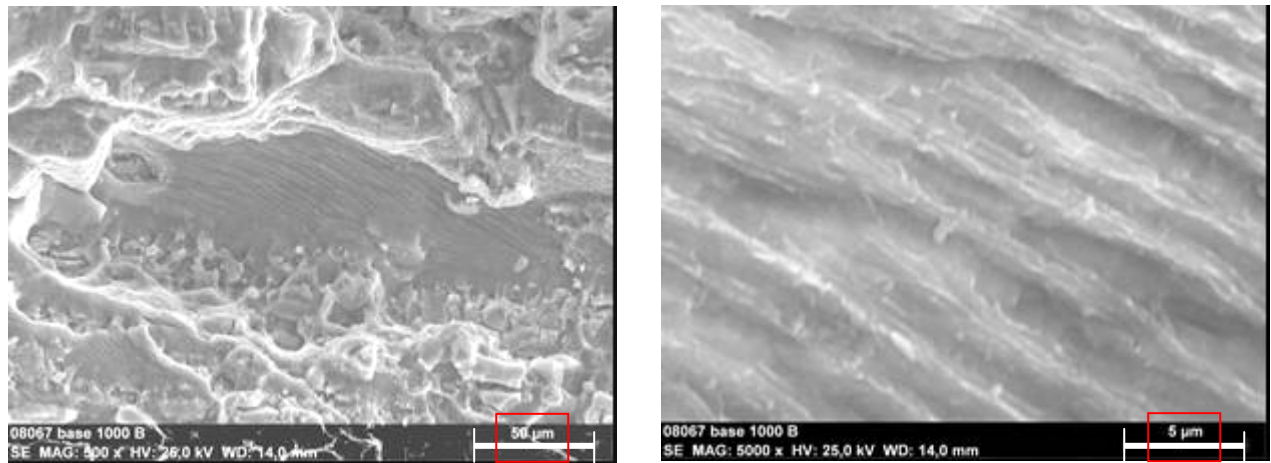
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens LT, $R = 0,7$.



→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens LT, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 51 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. $R=0,1$ à ΔK_3 .

La rupture à $R = 0,1$ se produit à plus tard par rapport à l'essai à $R = 0,7$ en terme de ΔK . Ainsi, un dernier point de mesure est relevé juste avant la rupture.



→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens LT, $R = 0,1$.

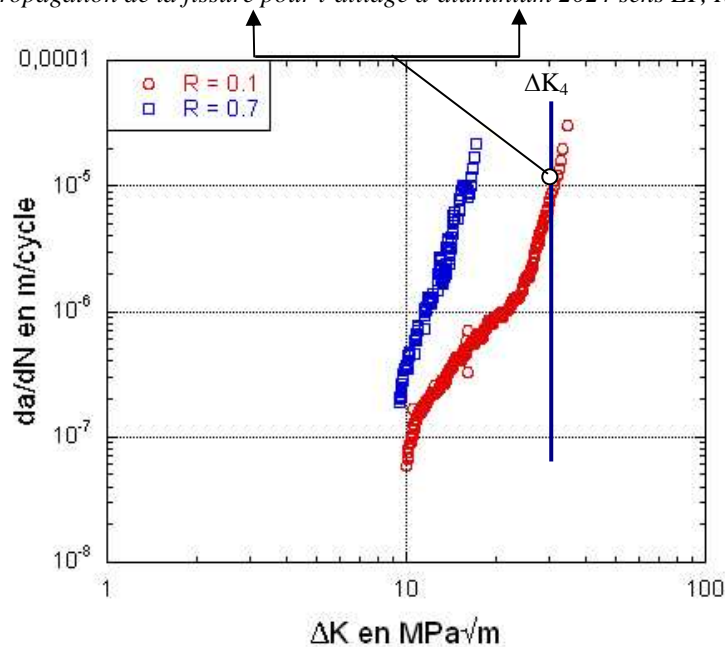


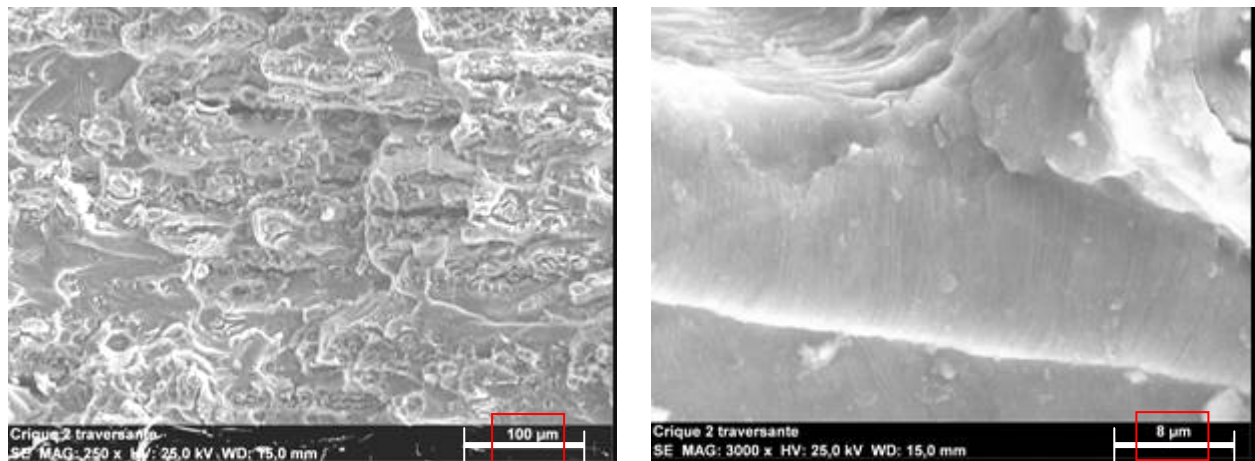
Figure Annexe III) - 52 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens LT. $R = 0,1$ à ΔK_4 .

☉ Sens TL :

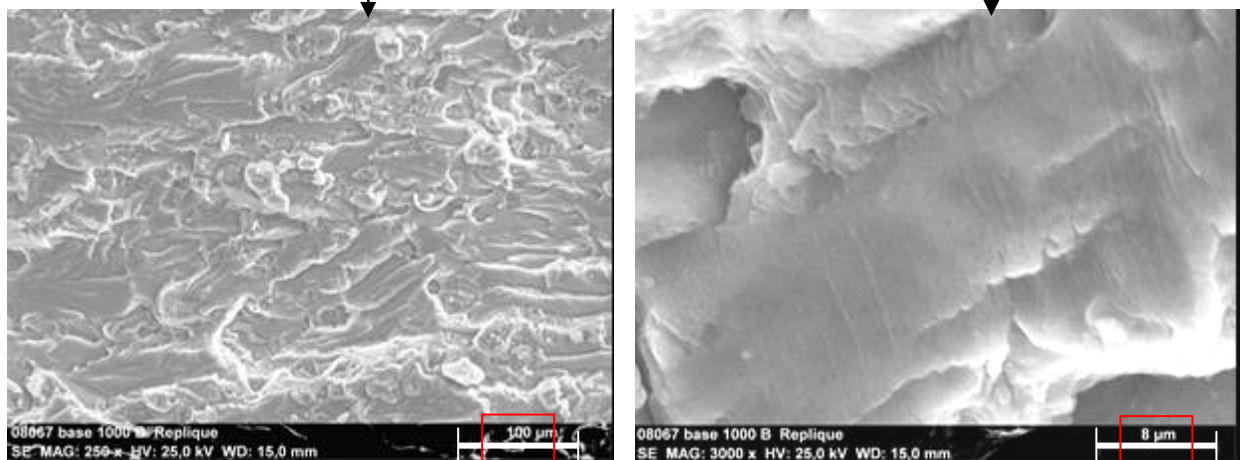
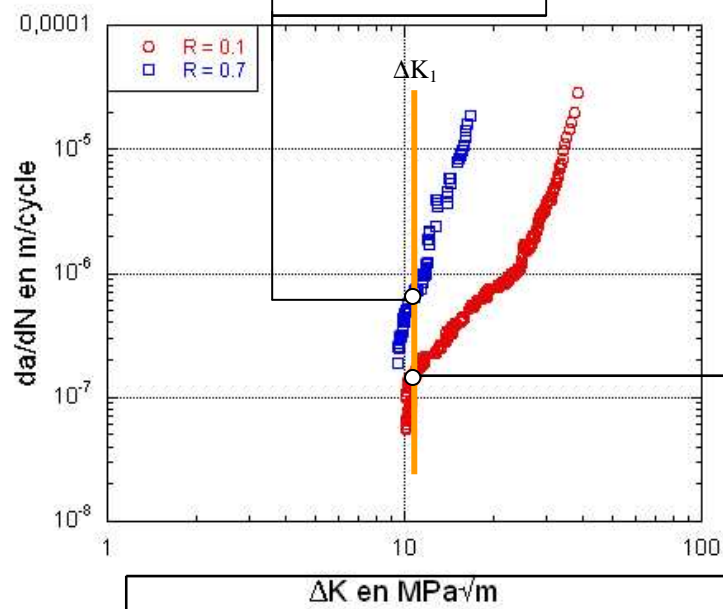
Tableau Annexe III) - 4 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL à $R = 0,1$ et $R = 0,7$.

	R = 0,1			R = 0,7		
	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm
1	10,8	1,53E-04	21,1	10,8	6,47E-04	21,1
2	12,7	2,30E-04	25,9	12,7	2,42E-03	26
3	16,6	5,17E-04	33,4	16,6	1,88E-02	33,8
4	37,2	1,98E-02	50,3			

Figure Annexe III) - 53 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. $R = 0,7$ à ΔK_1 .



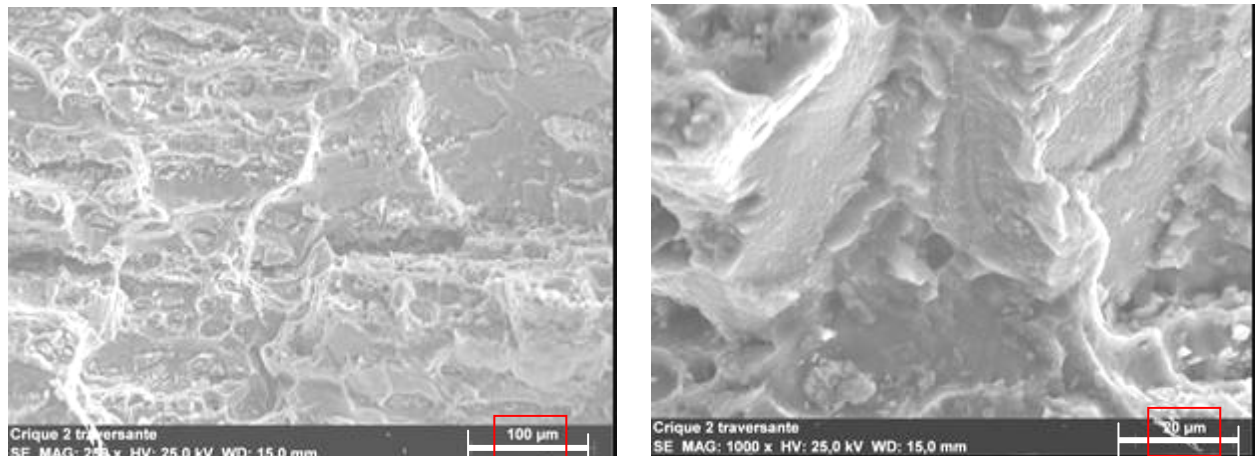
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens TL, $R = 0,7$.



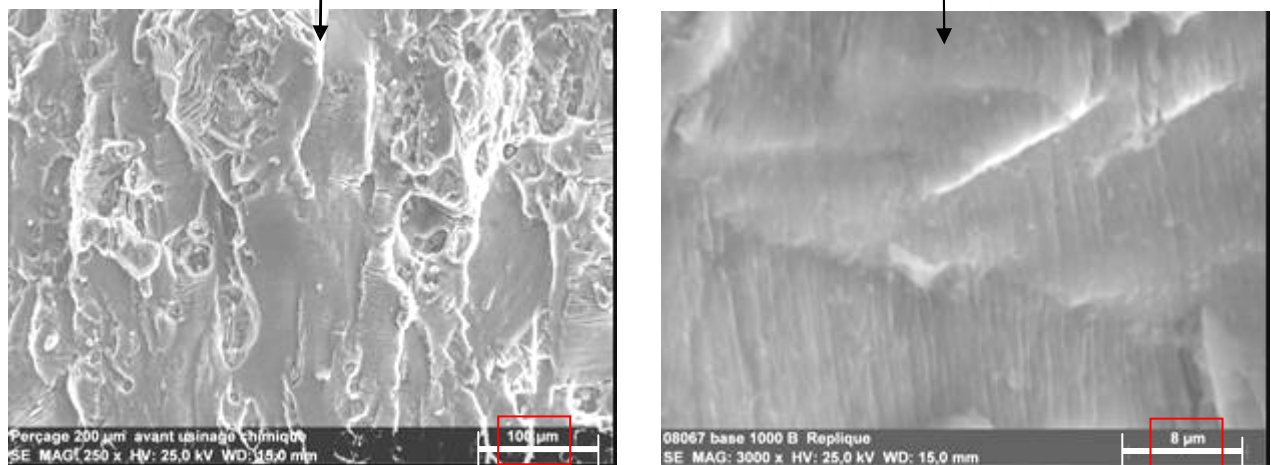
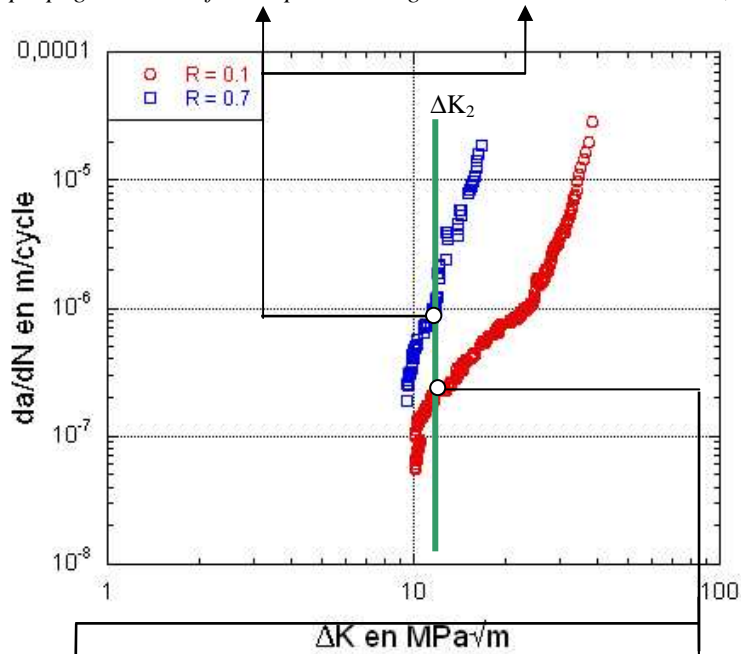
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens TL, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 54 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. $R = 0,1$ à ΔK_1 .

Figure Annexe III) - 55 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. $R = 0,7$ à ΔK_2 .



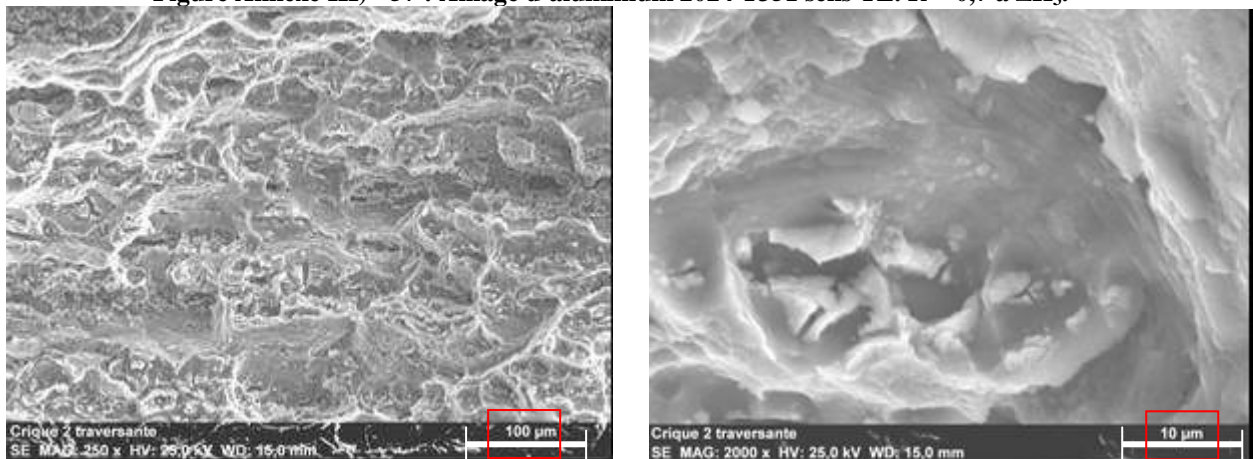
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens TL, $R = 0,7$.



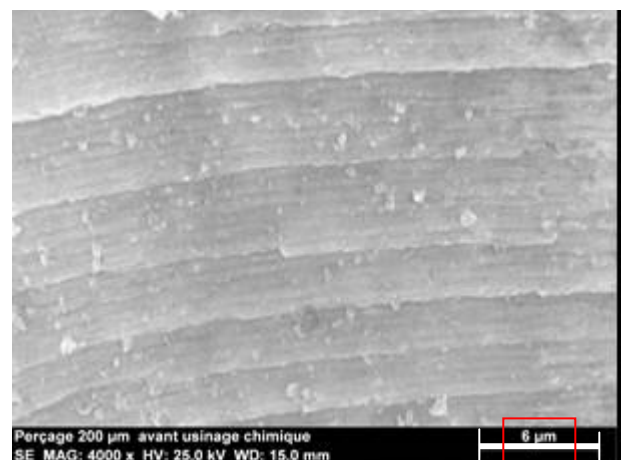
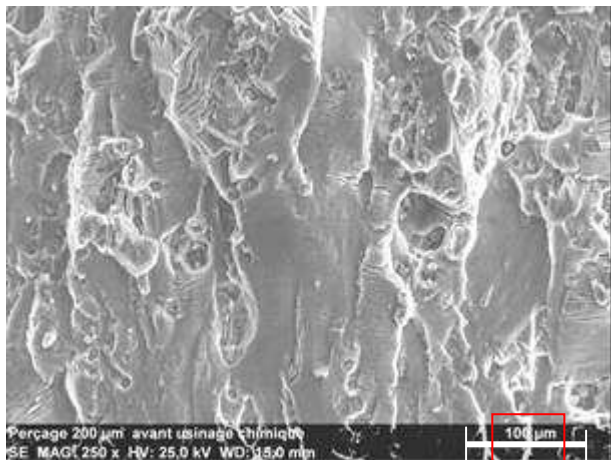
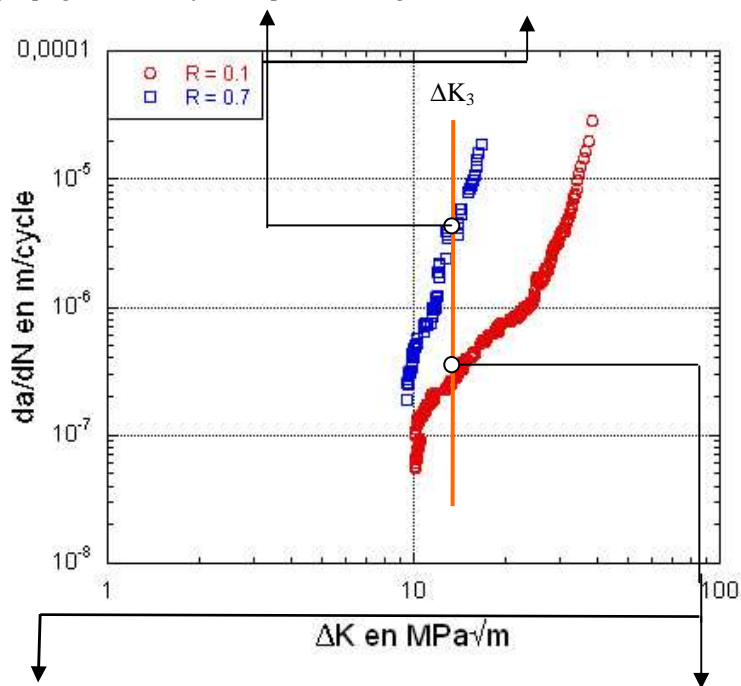
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens TL, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 56 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. $R = 0,1$ à ΔK_2 .

Figure Annexe III) - 57 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_3 .

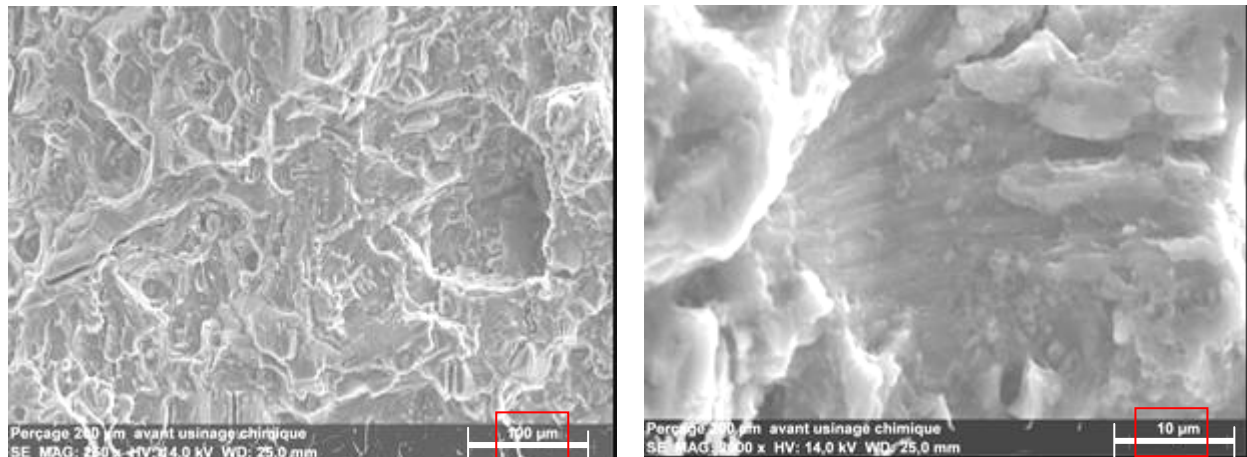


→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens TL, R = 0,7.



↑ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens TL, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 58 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_3 .



↑ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage d'aluminium 2024 sens TL, R = 0,1.

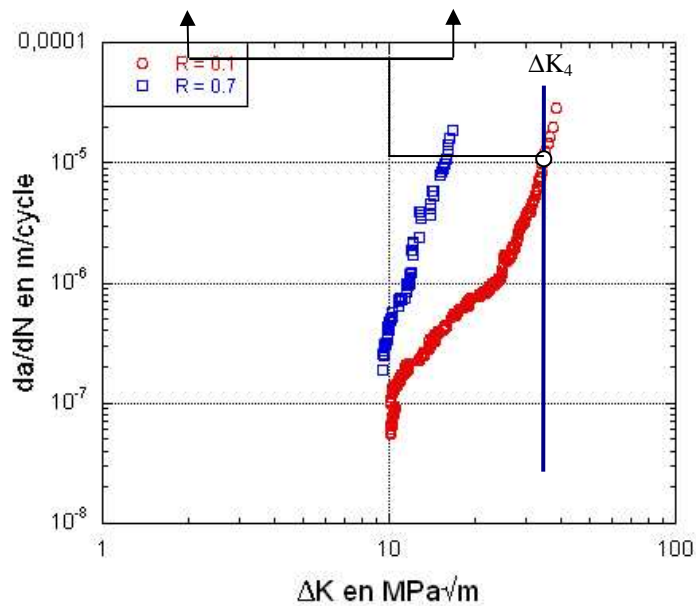


Figure Annexe III) - 59 : Alliage d'aluminium 2024 T351 sens TL. R = 0,7 à ΔK_4 .

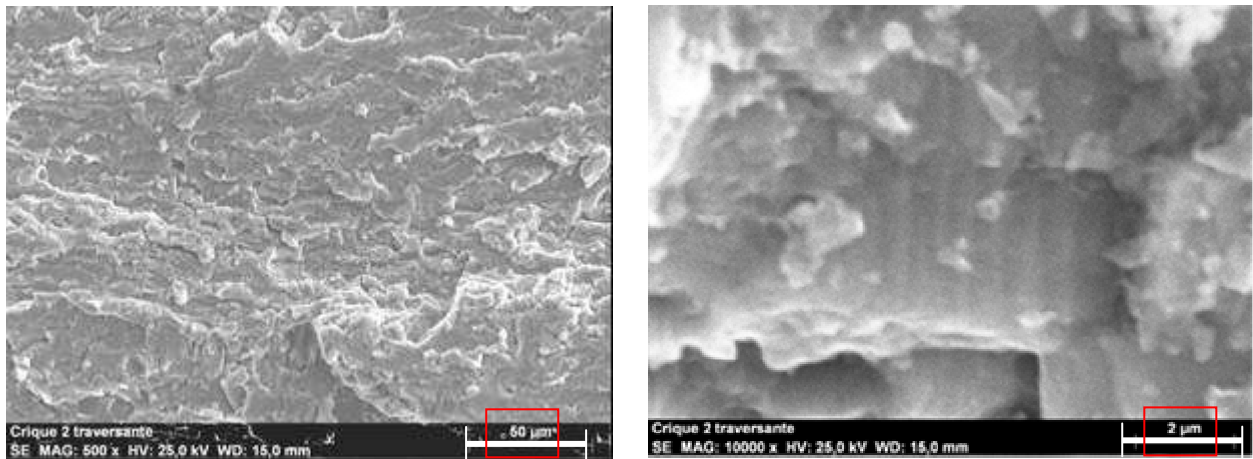
3 Alliage Ti-6Al-4V

☉ Sens LT :

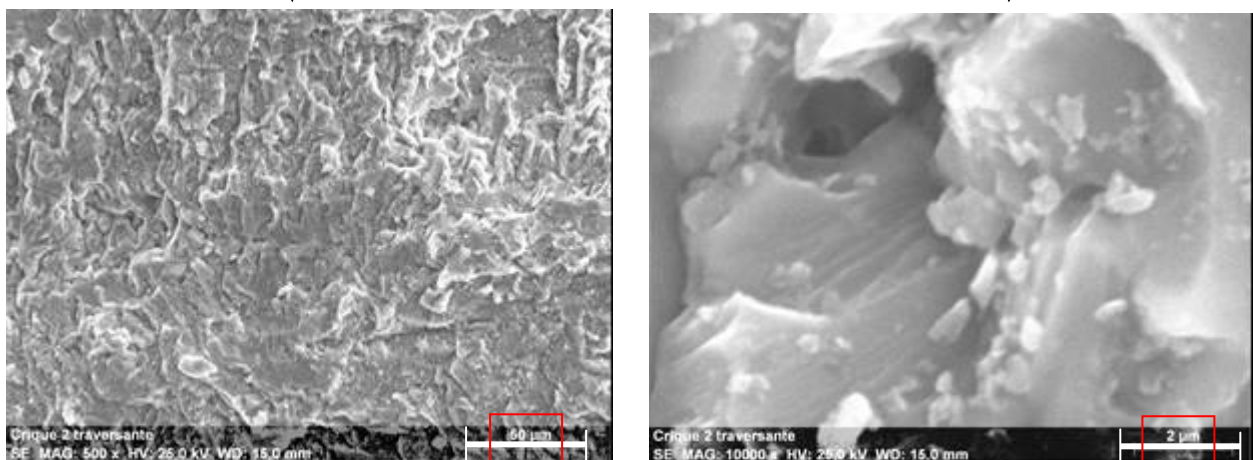
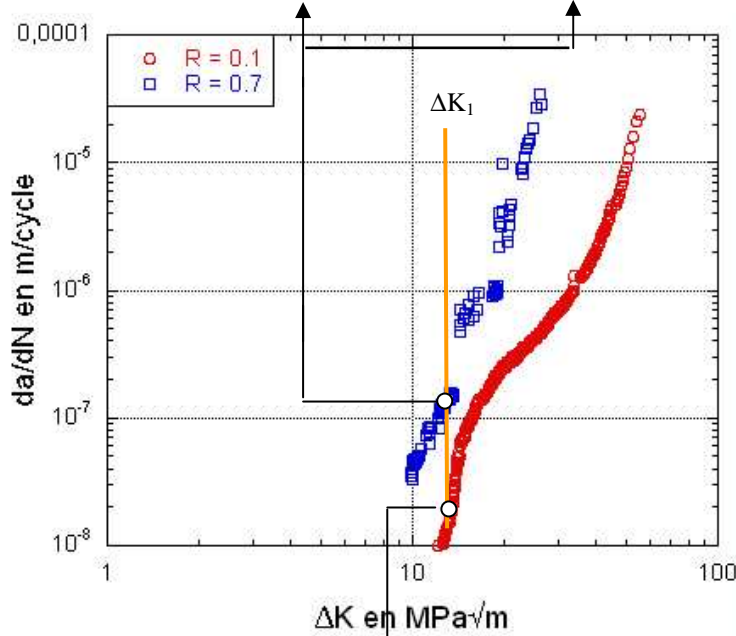
Tableau Annexe III) - 5 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage de alliage Ti-6Al-4V sens LT à R = 0,1 et R = 0,7.

	R = 0,1			R = 0,7		
	Delta K MPa·m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm	Delta K MPa·m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm
1	10,1	5,46E-06	25,6	10,1	4,61E-05	19,5
2	17,3	1,53E-04	40	17,3	5,83E-04	34,5
3	26,4	4,62E-04	48,2	26,6	2,88E-02	44,2
4	55,6	2,40E-02	58,7			

Figure Annexe III) - 60 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,7 à ΔK_1 .



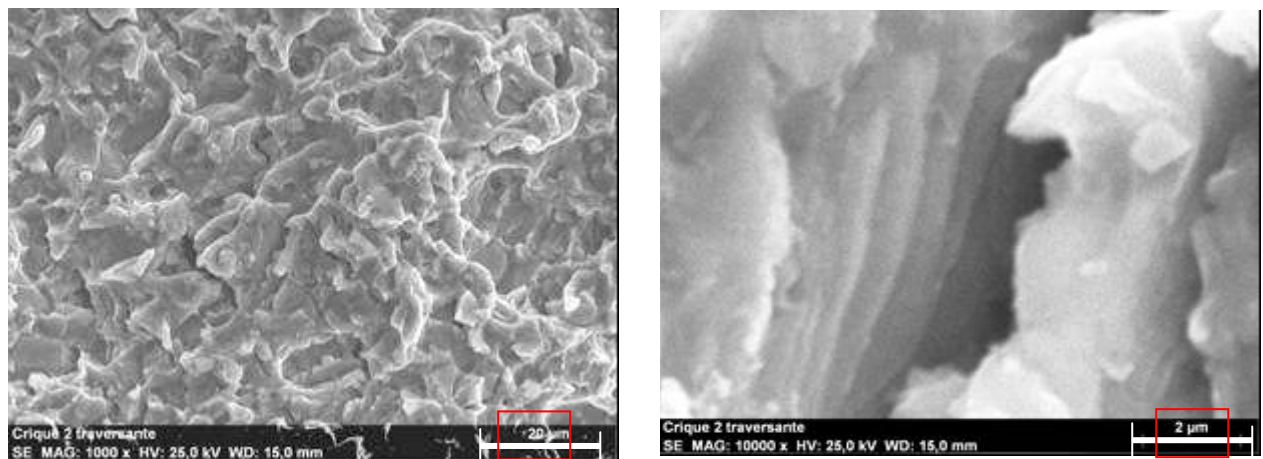
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT, R = 0,7.



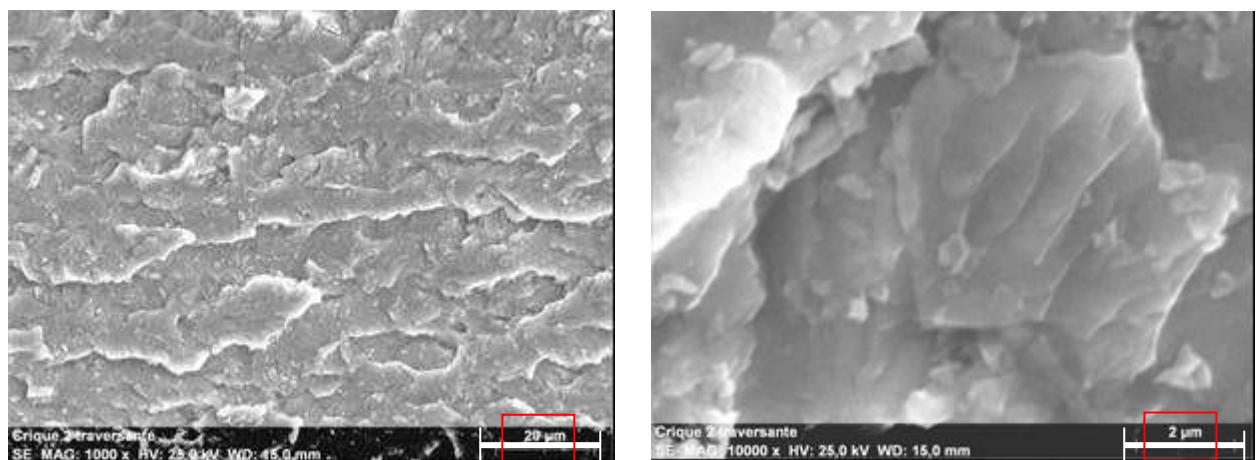
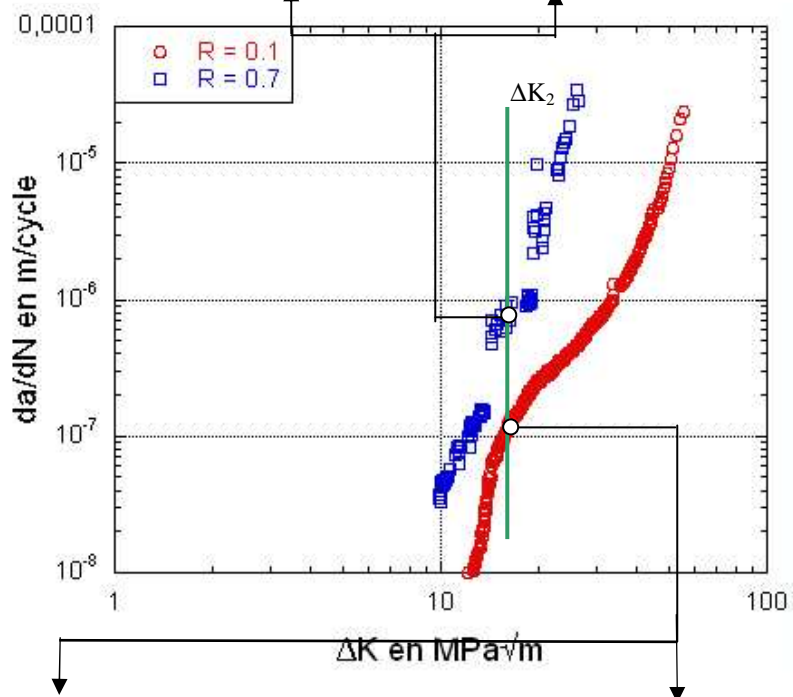
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 61 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,1 à ΔK_1 .

Figure Annexe III) - 62 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,7 à ΔK_2 .



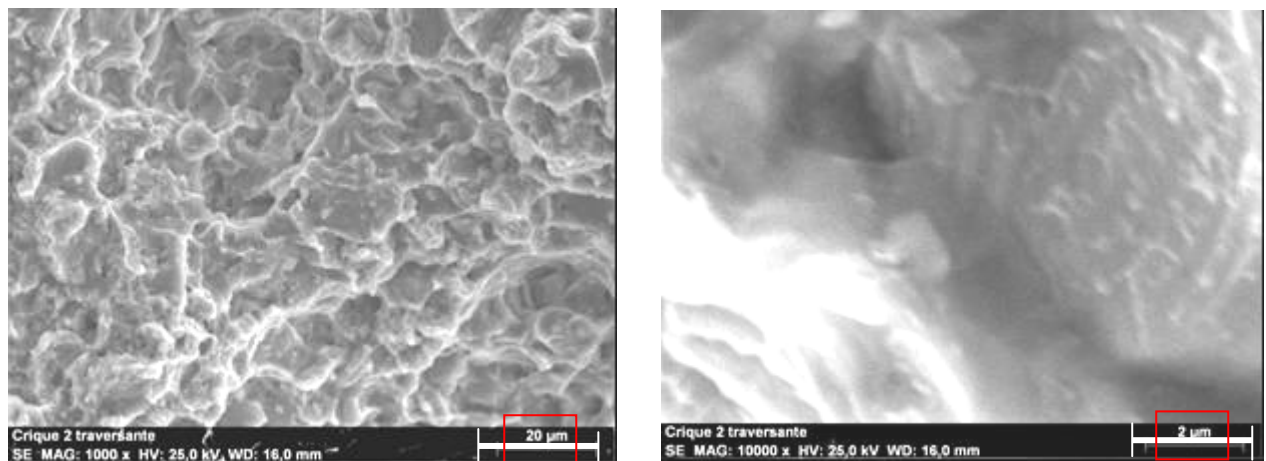
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT, R = 0,7.



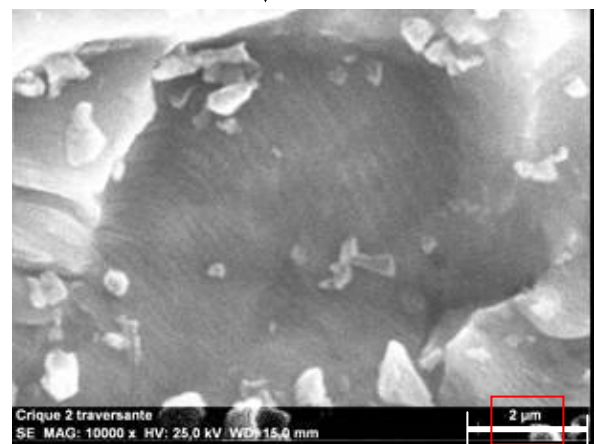
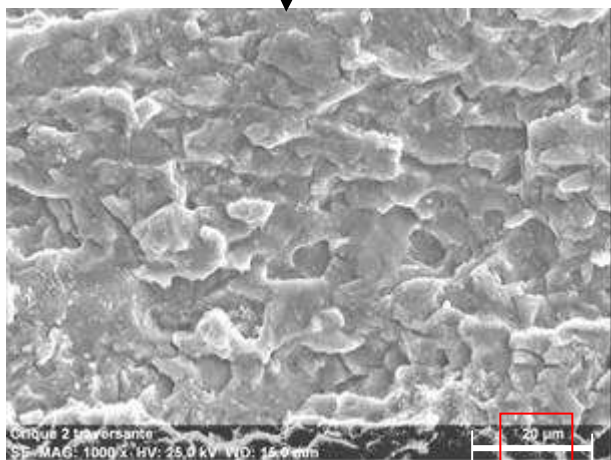
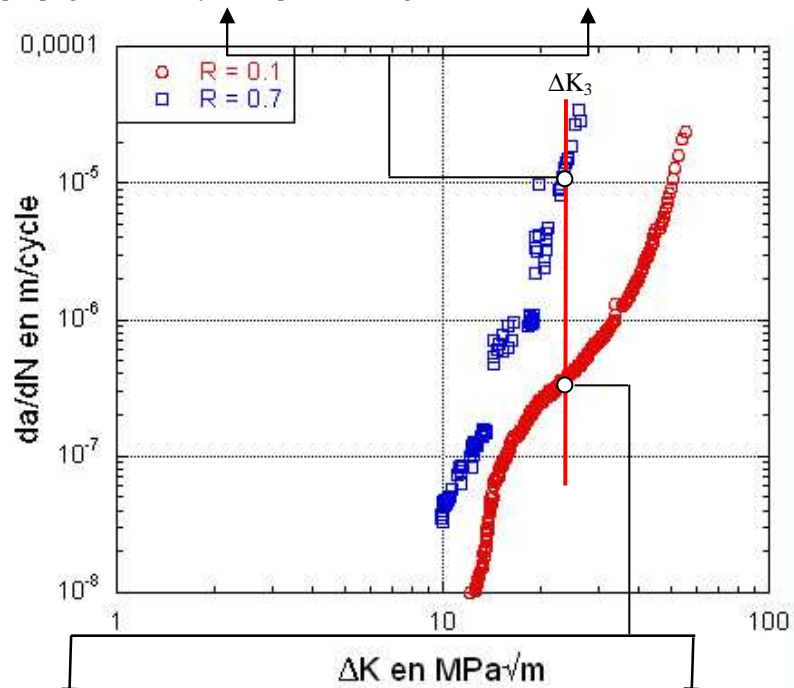
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 63 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,1 à ΔK_2 .

Figure Annexe III) - 64 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,7 à ΔK_3 .



→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT, R = 0,7.



→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens LT, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 65 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. R = 0,1 à ΔK_3 .

Pour l'alliage de titane à $R = 0,1$ la rupture finale a lieu plus tard que pour l'alliage de titane à $R=0,7$. La vitesse de propagation qui correspond à la valeur de ΔK_4 est la même que la vitesse de propagation à ΔK_3 pour l'alliage de titane dont le $R=0,7$. C'est exactement le même phénomène que pour l'alliage d'aluminium 7175 T7351 et pour l'alliage d'aluminium 2024 T351.

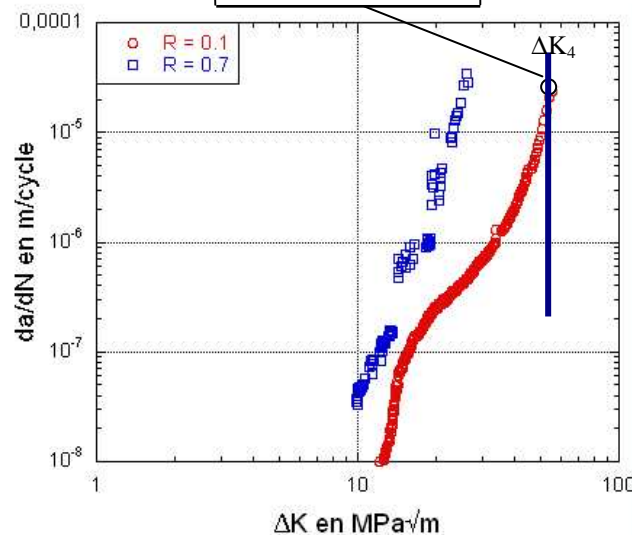
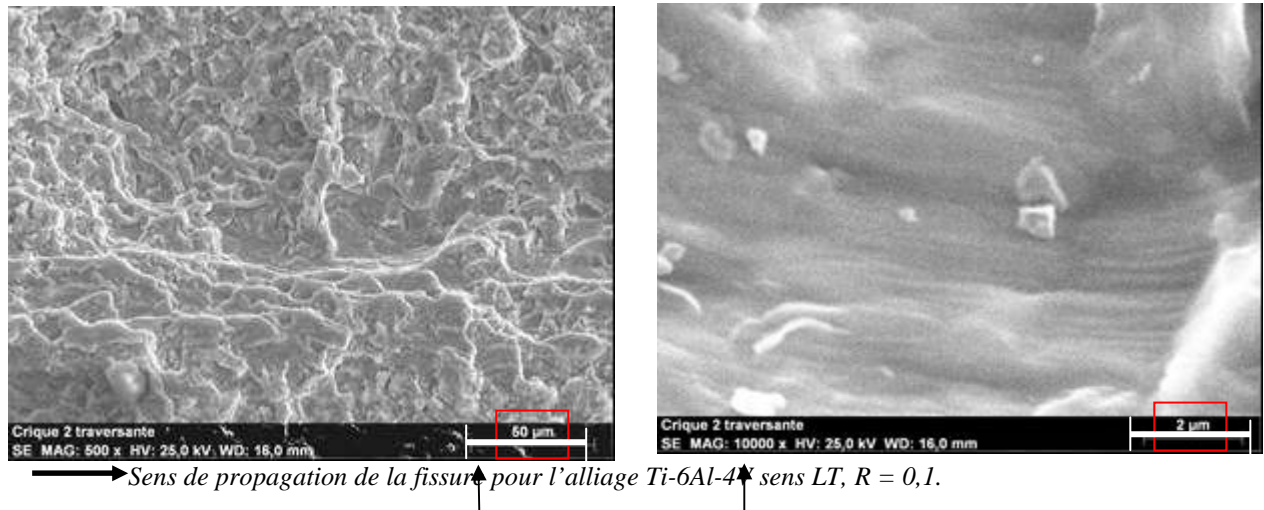


Figure Annexe III) - 66 : Alliage Ti-6Al-4V sens LT. $R = 0,1$ à ΔK_4 .

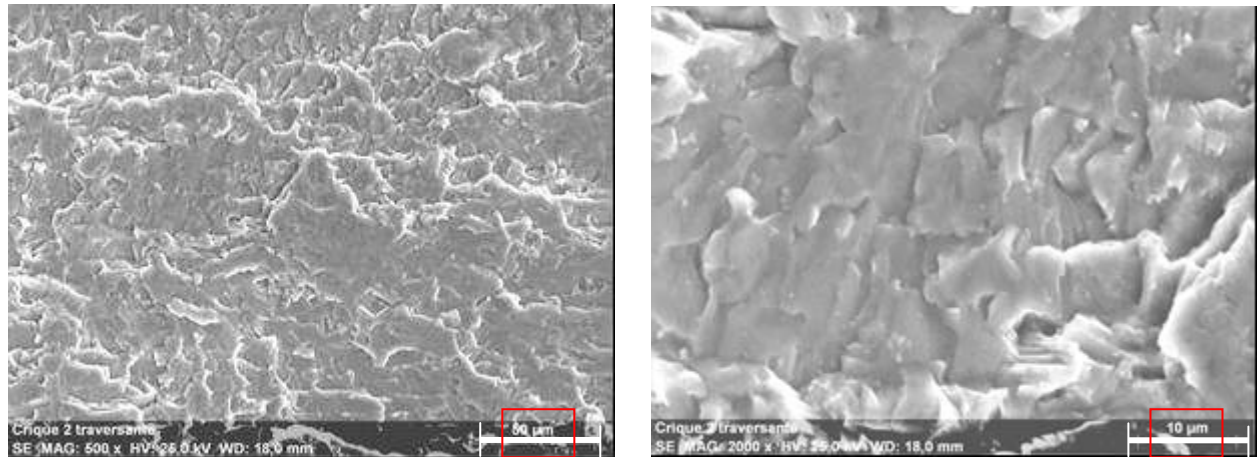
☉ Sens TL :

Les observations des surfaces de rupture à $R=0,7$ n'ont pu être réalisées. Ce paragraphe ne traitera que le rapport $R=0,1$ dans le sens TL.

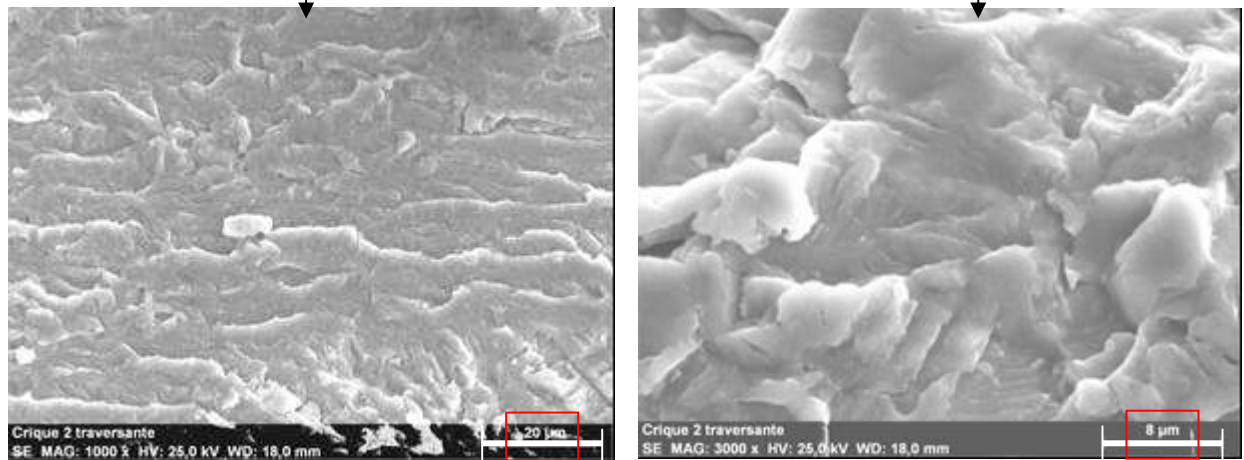
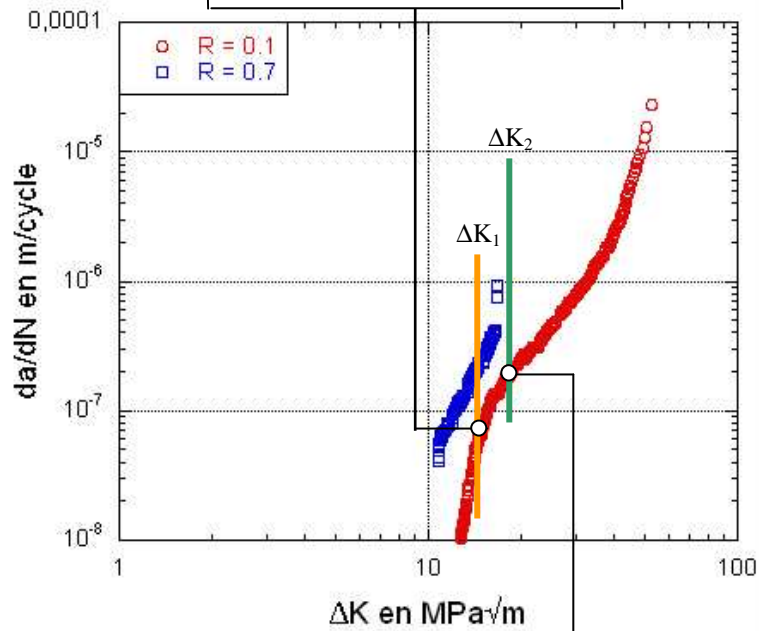
Tableau Annexe III) - 6 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V sens LT à $R = 0,1$ et $R = 0,7$.

	R = 0,1			R = 0,7		
	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm
1	10,1	3,56E-06	25,6	10,1	3,79E-05	25,7
2	16	1,23E-04	38,3	16	3,57E-04	38,2
3	21,8	3,09E-04	44,8	16,7	9,20E-04	39,2
4	31,7	9,21E-04	51,2			

Figure Annexe III) - 67 : Alliage Ti-6Al-4V sens TL. R = 0,1 à ΔK_1 .



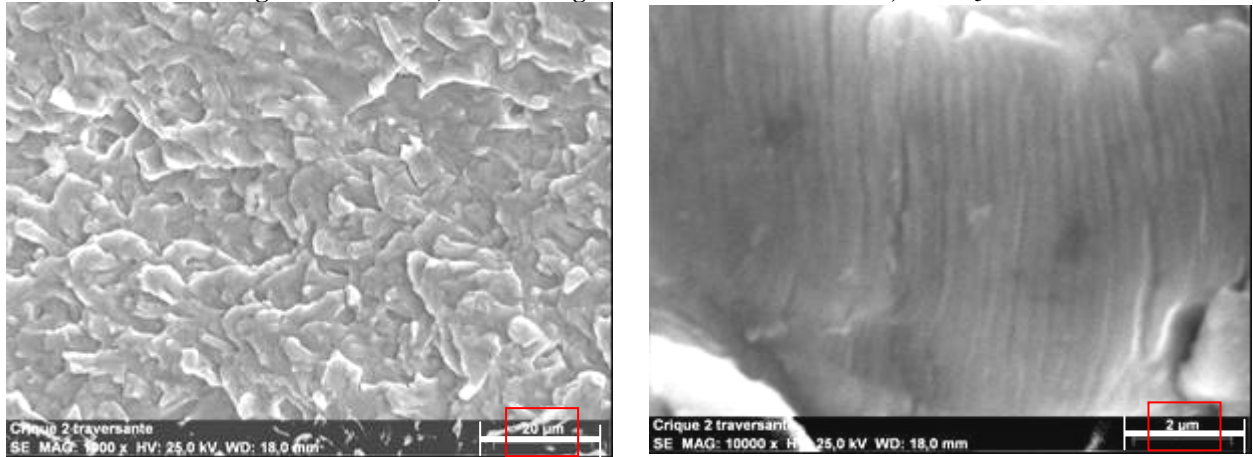
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens TL, R = 0,1.



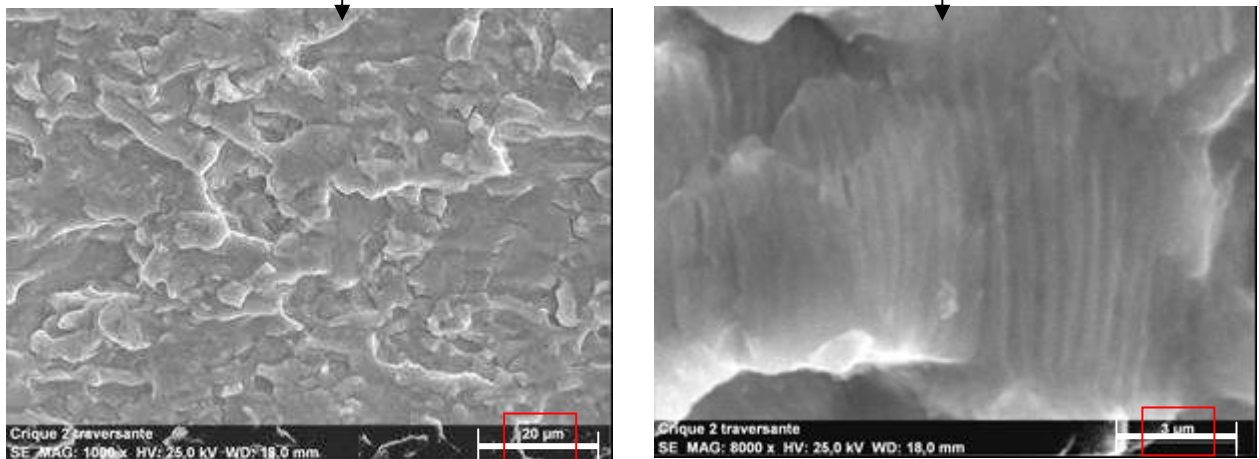
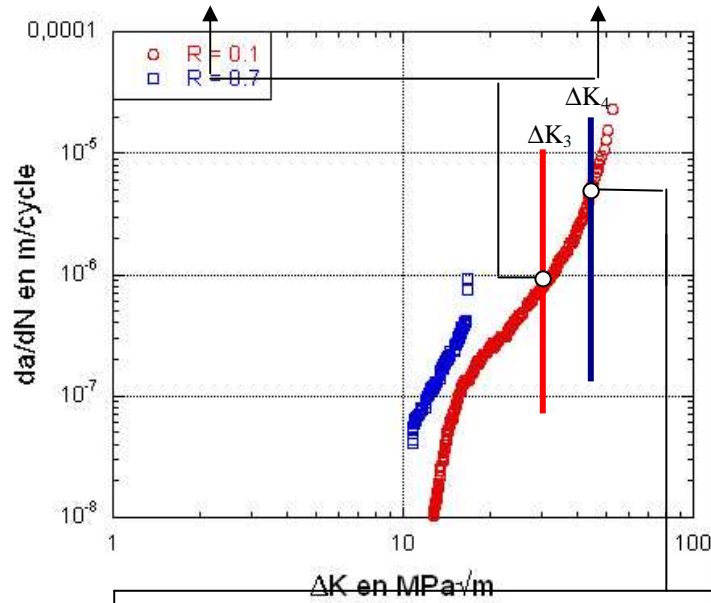
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens TL, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 68 : Alliage Ti-6Al-4V sens TL. R = 0,1 à ΔK_2 .

Figure Annexe III) - 69 : Alliage Ti-6Al-4V sens TL. R = 0,1 à ΔK_3 .



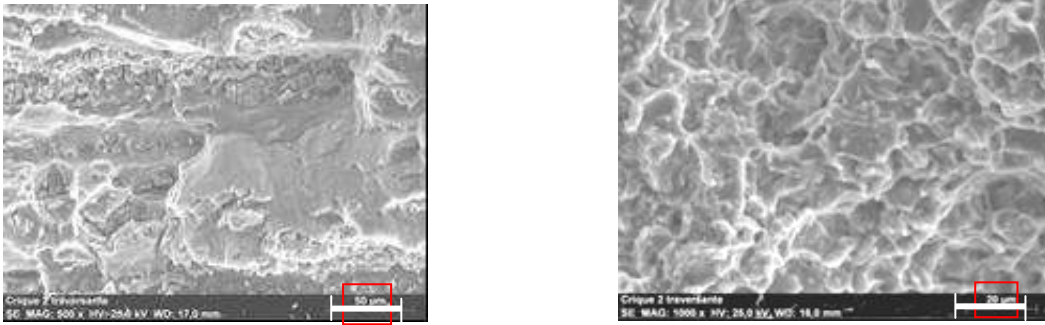
→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens TL, R = 0,1.



→ Sens de propagation de la fissure pour l'alliage Ti-6Al-4V sens TL, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 70 : Alliage Ti-6Al-4V sens TL. R = 0,1 à ΔK_4 .

Si les faciès de l'alliage de titane et d'un alliage d'aluminium sont comparés à même valeur de ΔK , il est visible que la concentration de cupules est plus importante chez l'alliage d'aluminium. Ce résultat est du au caractère plus ductile de cette alliage par rapport à l'alliage de titane.



a) Alliage d'aluminium 2024 sens TL à R = 0.1 pour ΔK4. b) Alliage Ti-6Al-4V sens TL à R = 0.1 pour ΔK4.

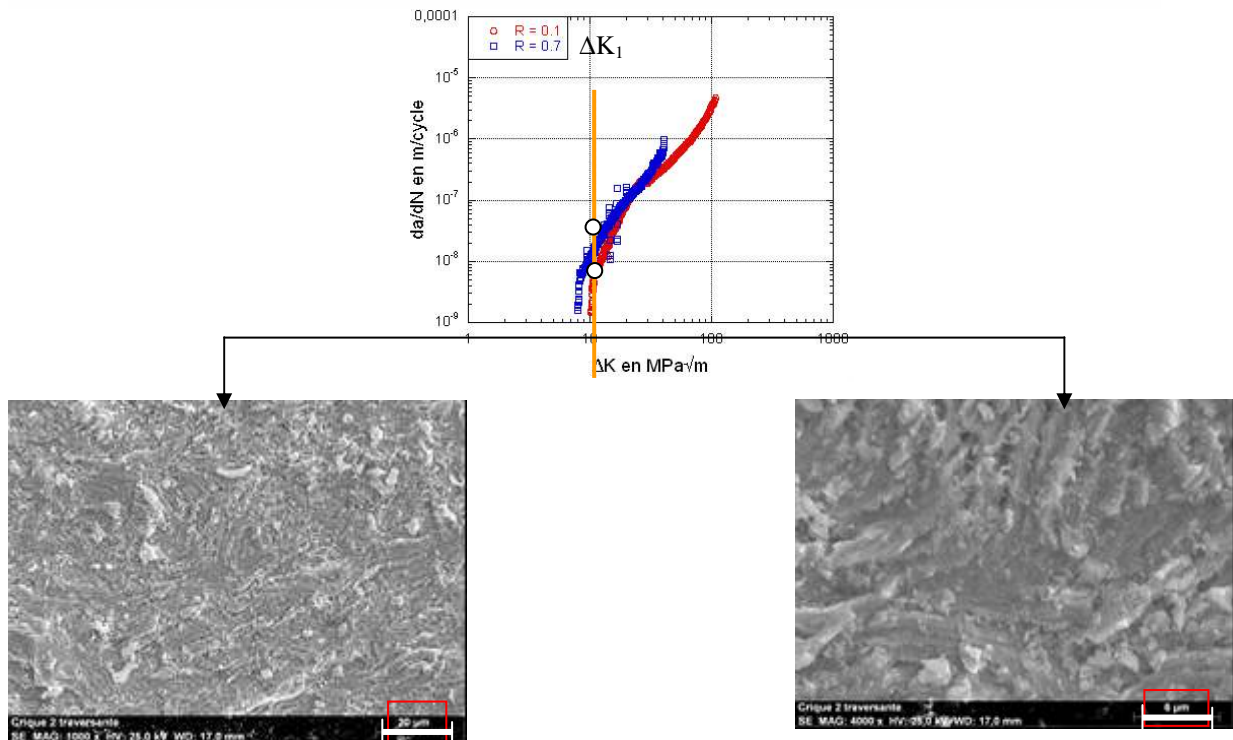
Figure Annexe III) - 71 : Comparaison des surfaces de rupture d'un essai à R = 0.1 entre l'alliage d'aluminium 2024 T351 et l'alliage de Ti-6Al-4V

4 Acier 15-5PH

☉ Sens LT :

Tableau Annexe III) - 7 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'acier 15-5PH sens LT à R = 0,1 et R = 0,7.

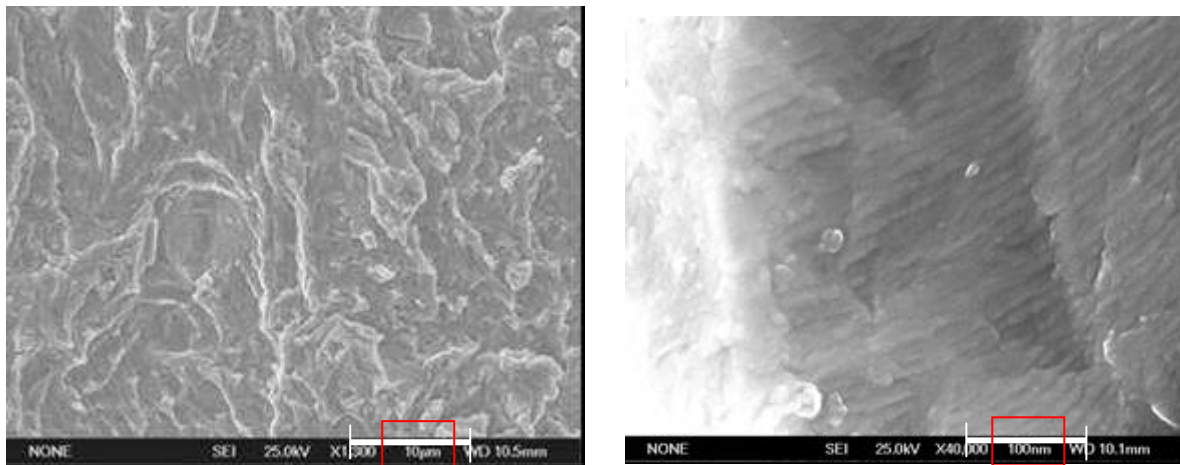
	R = 0,1			R = 0,7		
	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm
1	10,2	1,60E-06	19,8	10,1	1,24E-05	25,8
2	20,06	1,04E-04	38,9	20,8	1,06E-04	43,9
3	40,7	3,36E-04	51,6	40,8	9,69E-04	54,7
4	67,5	9,52E-04	58			



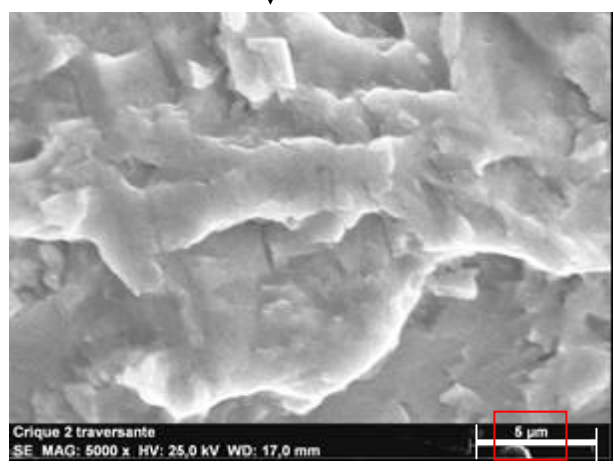
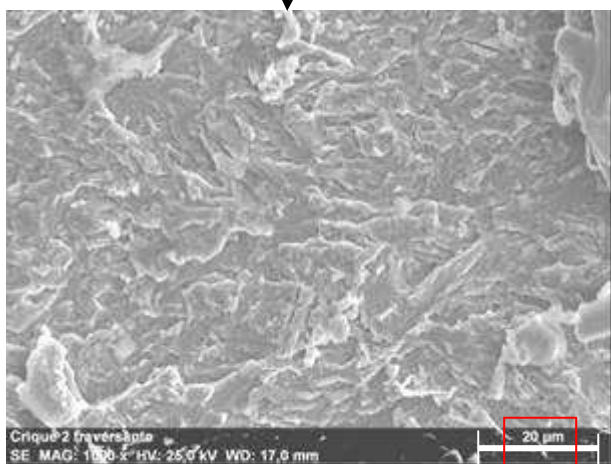
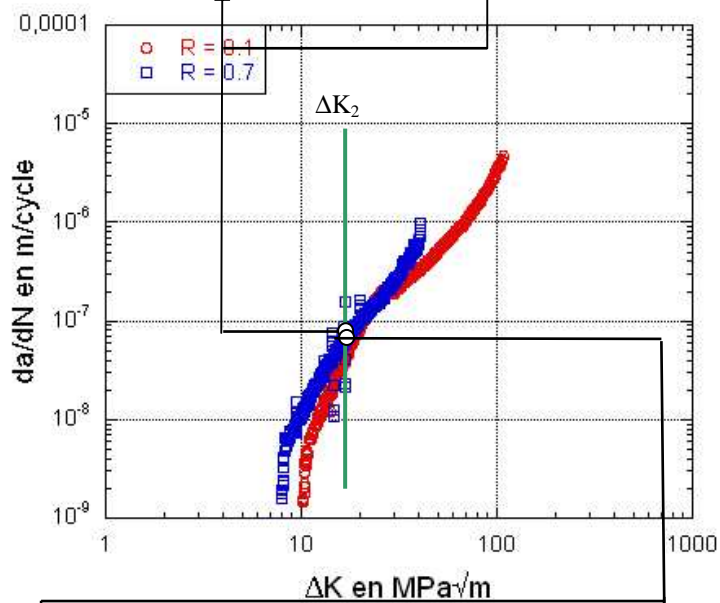
→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, R = 0,1.

Figure Annexe III) - 72 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,1 à ΔK₁.

Figure Annexe III) - 73 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,7 à ΔK_2 .



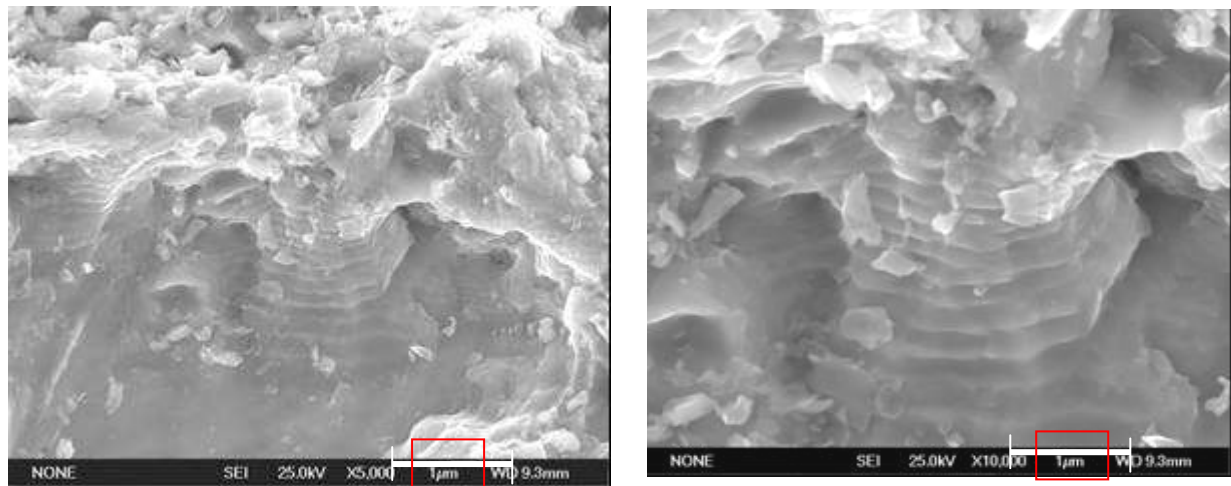
↑ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, R = 0,7.



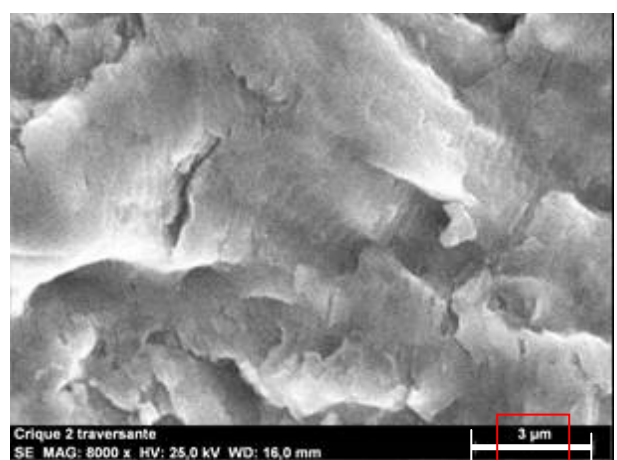
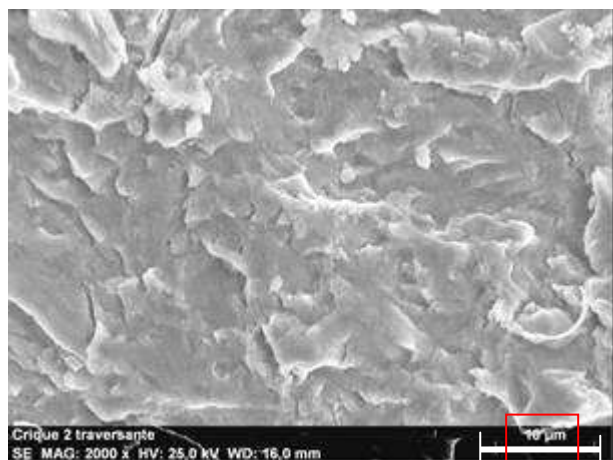
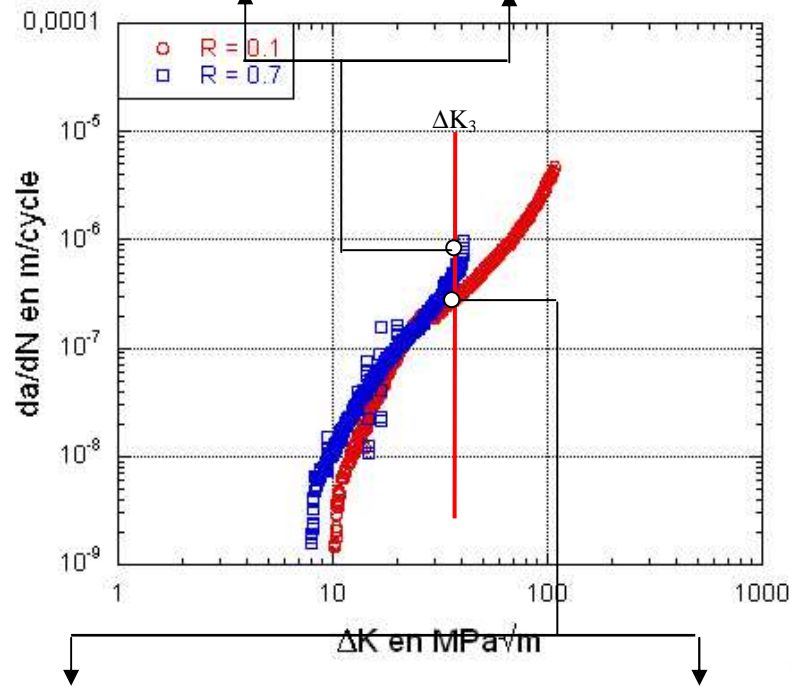
→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, R=0,1.

Figure Annexe III) - 74 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,1 à ΔK_2 .

Figure Annexe III) - 75 : Acier 15-5PH sens LT. $R = 0,7$ à ΔK_3 .



↑ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, $R = 0,7$.



→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 76 : Acier 15-5PH sens LT. $R = 0,1$ à ΔK_3 .

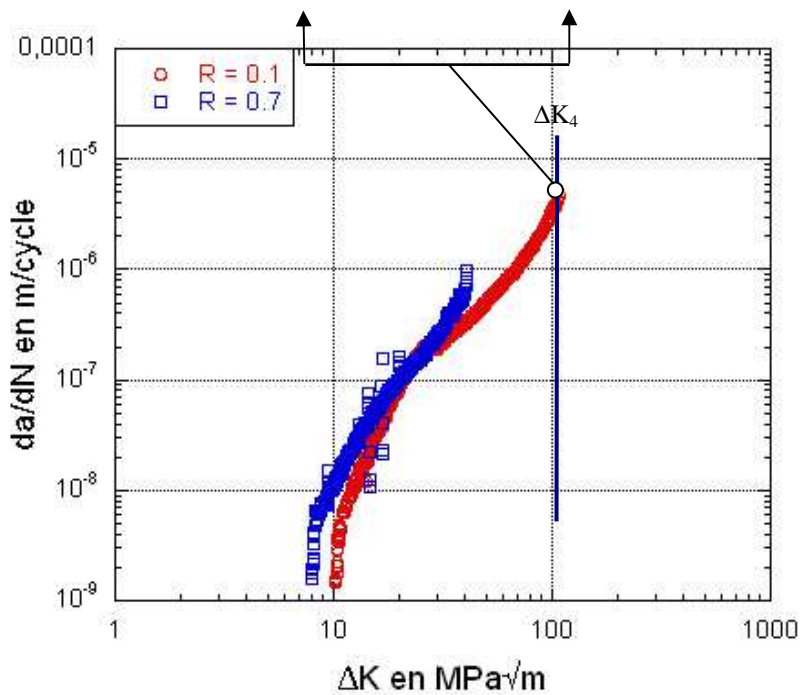
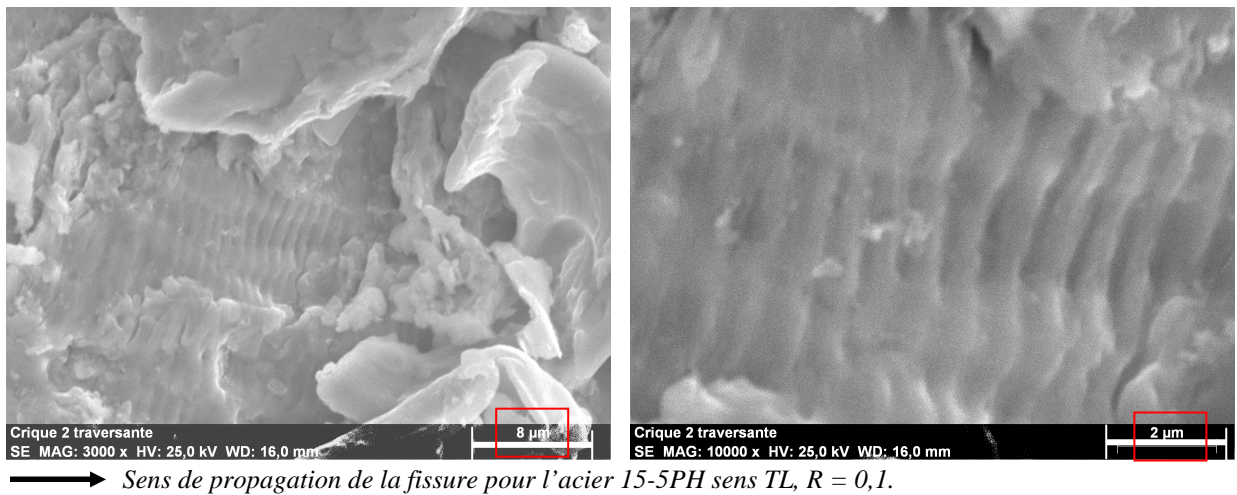


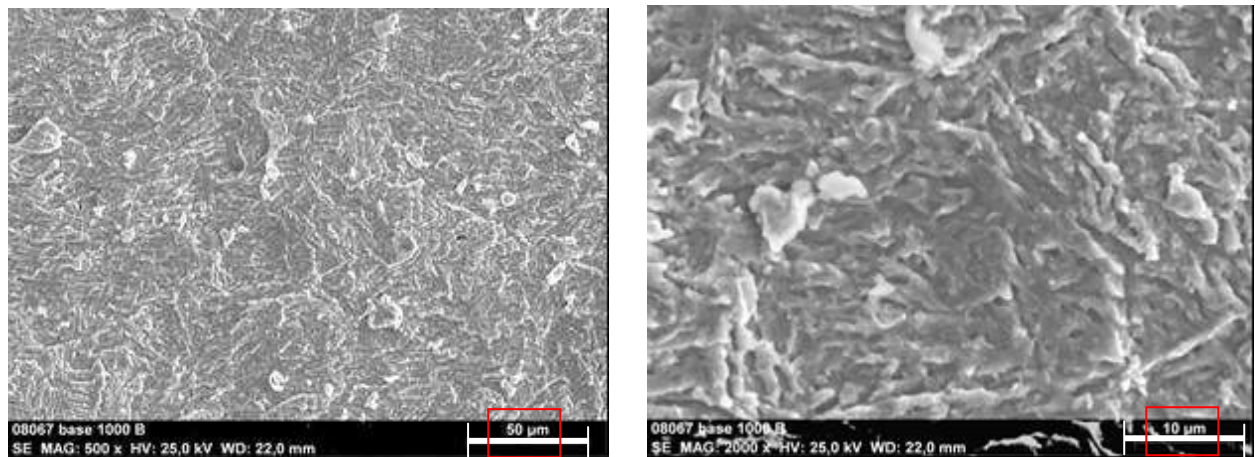
Figure Annexe III) - 77 : Acier 15-5PH sens LT. R = 0,1 à ΔK_4 .

☉ Sens TL :

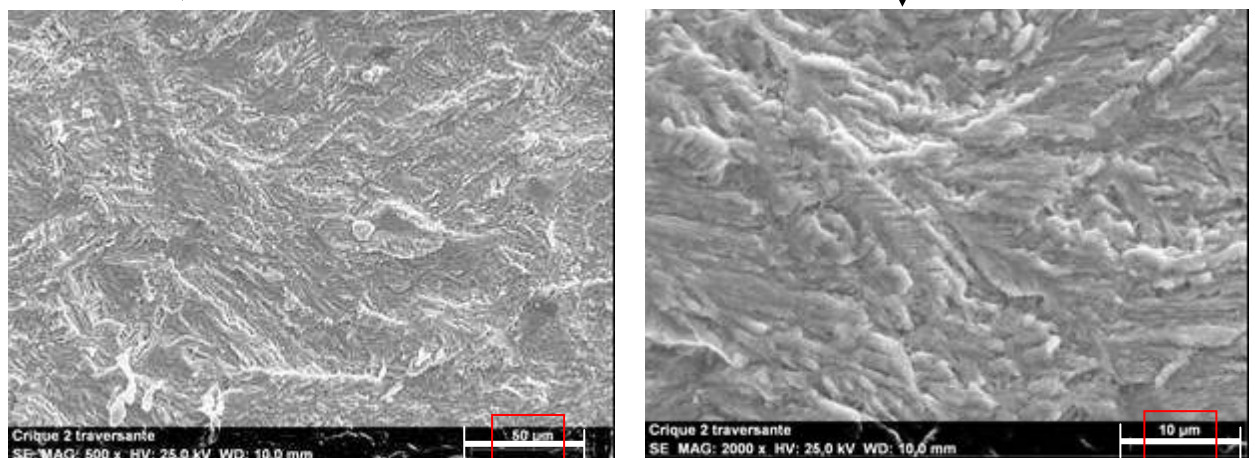
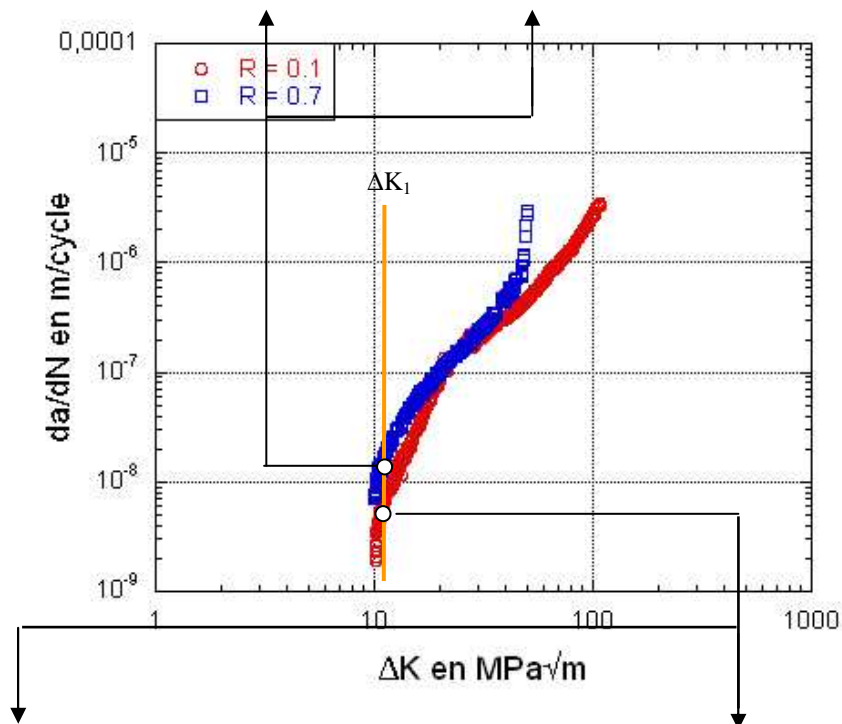
Tableau Annexe III) - 8 : Valeurs de ΔK des clichés réalisés pour l'acier 15-5PH sens TL à R = 0,1 et R = 0,7.

	R = 0,1			R = 0,7		
	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm	Delta K MPa-m ^{0,5}	da/dN mm/cyc	Long. fissure mm
1	10,2	2,79E-06	19,7	10,2	8,26E-06	19,5
2	21,5	1,05E-04	39,8	21,5	1,14E-04	39,8
3	49,9	4,66E-04	54,4	49,9	2,76E-03	54,2
4	102	2,77E-03	62,1			

Figure Annexe III) - 78 : Acier 15-5PH sens TL. $R = 0,7$ à ΔK_I .



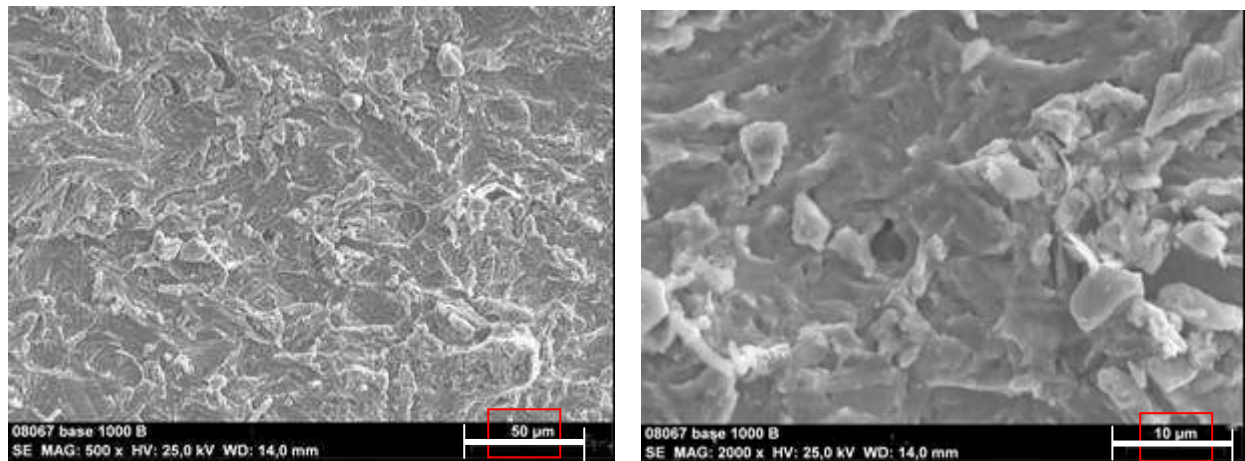
→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, $R = 0,7$.



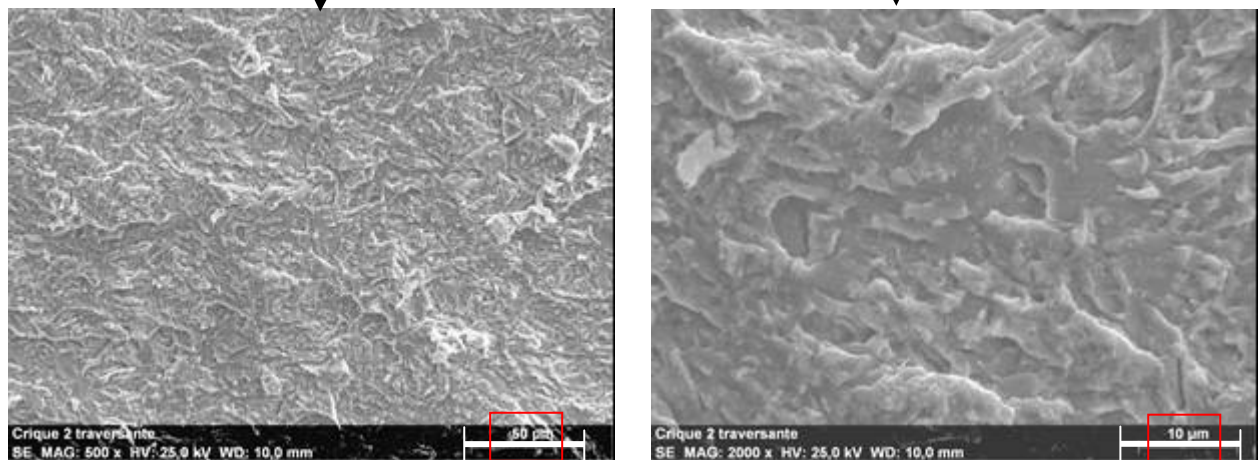
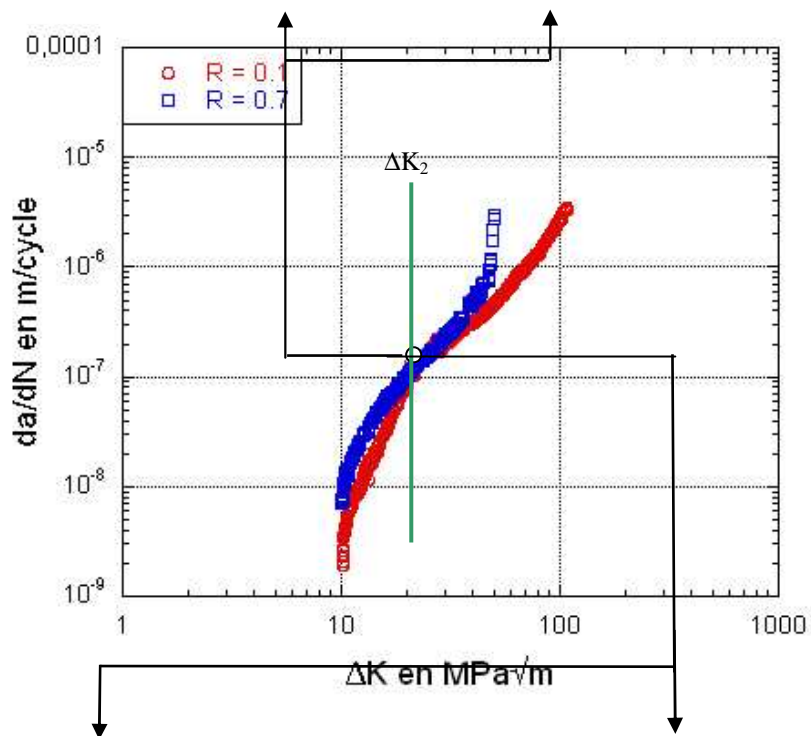
→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 79 : Acier 15-5PH sens TL. $R = 0,1$ à ΔK_I .

Figure Annexe III) - 80 : Acier 15-5PH sens TL. $R = 0,7$ à ΔK_2 .



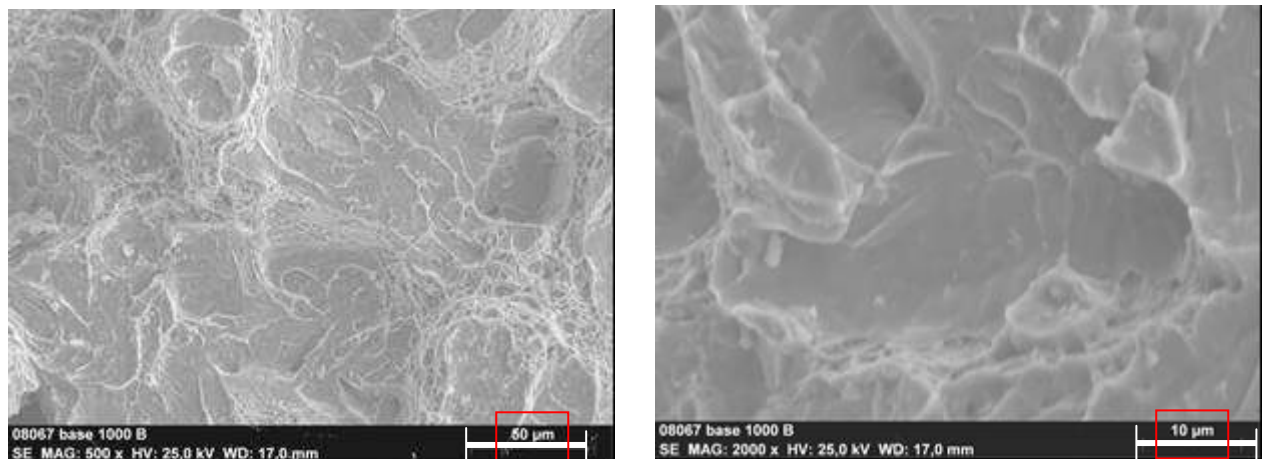
→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, $R = 0,7$.



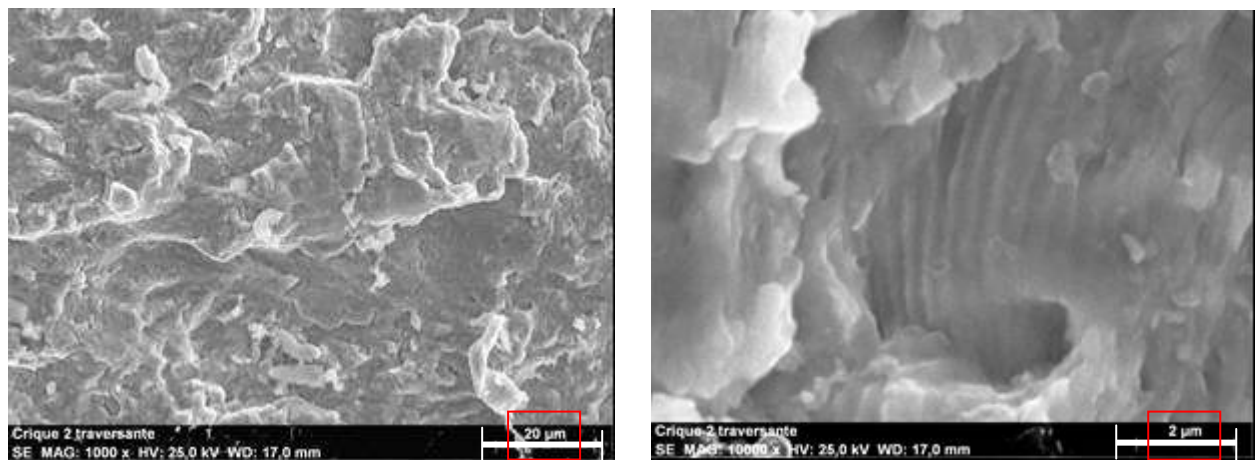
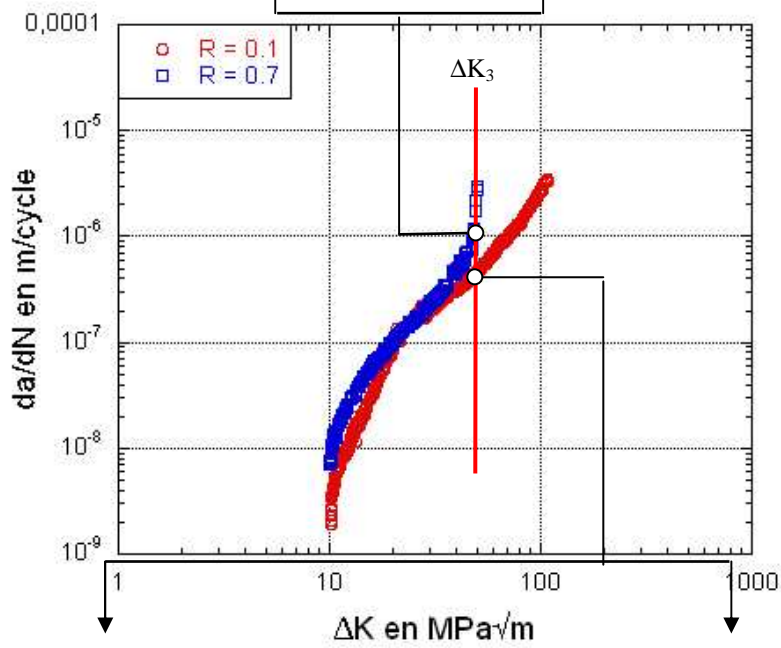
→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 81 : Acier 15-5PH sens TL. $R = 0,1$ à ΔK_2 .

Figure Annexe III) - 82 : Acier 15-5PH sens TL. $R = 0,7$ à ΔK_3 .



→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, $R = 0,7$.



→ Sens de propagation de la fissure pour l'acier 15-5PH sens TL, $R = 0,1$.

Figure Annexe III) - 83 : Acier 15-5PH sens TL. $R = 0,1$ à ΔK_3 .

Pour l'acier 15-5PH à $R = 0,1$ la rupture finale a lieu plus tard que pour l'acier 15-5PH à $R = 0,7$. La vitesse de propagation qui correspond à la valeur de ΔK_4 est la même que la vitesse de propagation à ΔK_3 pour l'acier 15-5PH à $R = 0,7$.

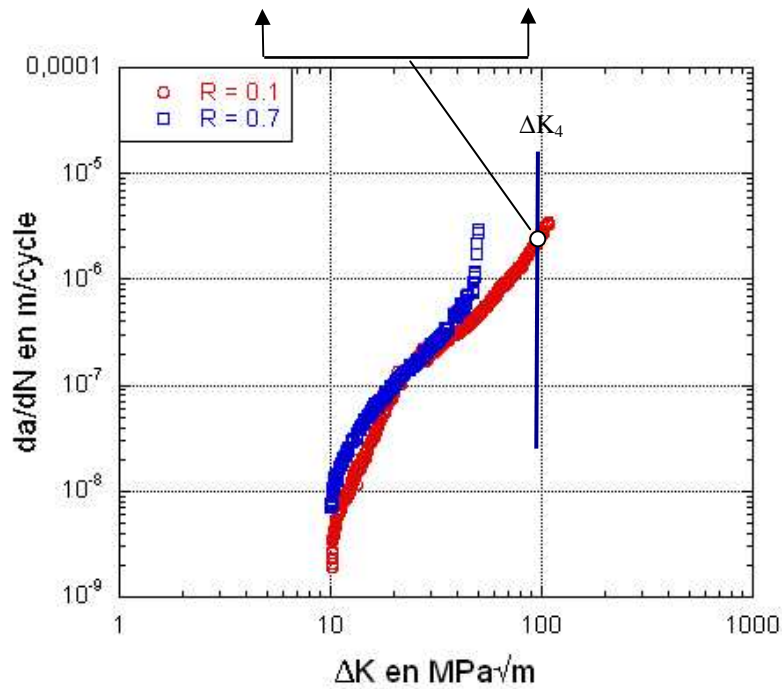
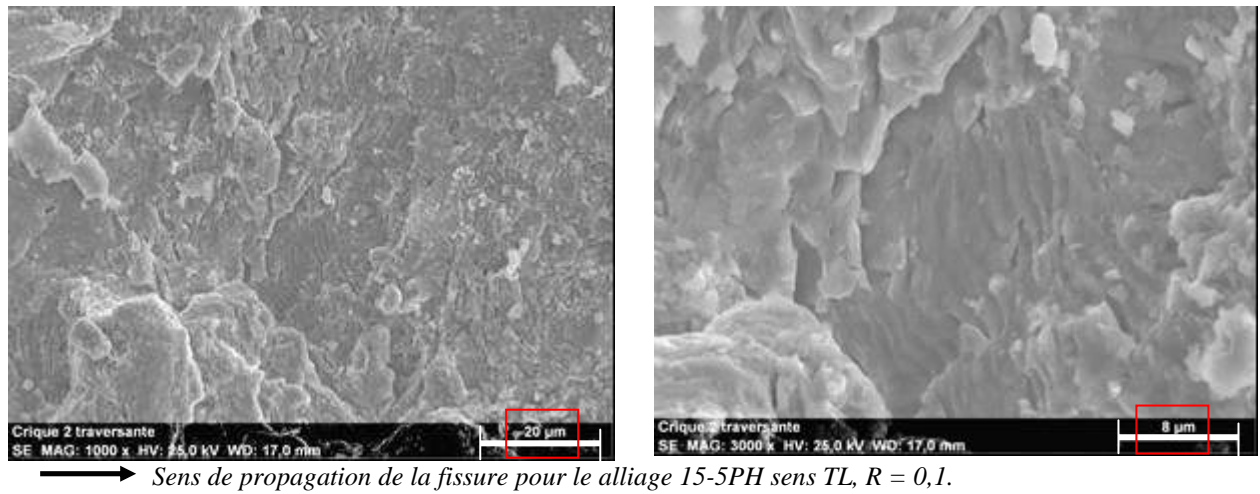


Figure Annexe III) - 84 : Acier 15-5PH sens TL. $R = 0,1$ à ΔK_4 .

Annexe IV : Implémentation numérique en explicite

La création d'une Umat et d'une Vumat est présentée succinctement dans le chapitre n°3 I) 2. Cependant, pour mieux comprendre la conception de ce programme et surtout pour pouvoir la réutiliser ultérieurement, cette partie dépouille la Vumat en expliquant les différentes phases de programmation : initialisation, prédicateur élastique, correcteur plastique et sortie. Seule la Vumat est présentée car les deux sous-routines sont très proches dans cette étude. Passer de l'une à l'autre ne demande que quelques modifications comme par exemple le changement des noms des tableaux utilisés par Abaqus ou bien la gestion de la rupture d'un élément.

I) Vumat

```
subroutine vumat(
```

```
1 nblock, ndir, nshr, nstatev, nfieldv, nprops, lanneal,
2 stepTime, totalTime, dt, cmname, coordMp, charLength,
3 props, density, strainInc, relSpinInc,
4 tempOld, stretchOld, defgradOld, fieldOld,
5 stressOld, StateOld, enerInternOld, enerInelasOld,
6 tempNew, stretchNew, defgradNew, fieldNew,
7 stressNew, StateNew, enerInternNew, enerInelasNew )
```

```
include 'vaba_param.inc'
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
C
```

```
Tableau VUMAT
```

```
PROPS = correspond aux propriétés matériau
```

```
PROPS(1) = E module d" Young
PROPS(2) = v
PROPS(3) = C tel que X=C1alpha
PROPS(4) =  $\sigma_y$ 
PROPS(5) =  $S_t$ 
PROPS(6) =  $s_t$ 
PROPS(7) =  $S_{cyc}$ 
PROPS(8) =  $s_{cyc}$ 
PROPS(9) =  $e_{vc}$ 
```

```
VARIABLES INTERNES : STATEV Lors d'un calcul en 3D.
```

```
STATEV(1) = X1
STATEV(2) = X2
STATEV(3) = X3
STATEV(4) = X12
STATEV(5) = X23
STATEV(6) = X13
STATEV(7) = Y
STATEV(8) = epsilonp1
STATEV(9) = epsilonp2
STATEV(10) = epsilonp3
STATEV(11) = gammap1
STATEV(12) = gammap2
STATEV(13) = gammap3
STATEV(14) = -alph1
STATEV(15) = -alph2
STATEV(16) = -alph3
STATEV(17) = -alpha12
STATEV(18) = -alpha23
```

Définition et Initialisation

Définition des variables en entrée fournies par le logiciel

Appel d'un fichier propre au logiciel.

```

C STATEV(19) = -alpha13
C STATEV(20) = D
C STATEV(21) = lambda
C STATEV(22) = dissipation dir1
C STATEV(23) = dissipation dir 2
C STATEV(24) = dissipation dir 3
C STATEV(25) = dissipatin totale
C STATEV(26) = epsilon1
C STATEV(27) = epsilon2
C STATEV(28) = epsilon3
C STATEV(29) = epsilon12
C STATEV(30) = epsilon23
C STATEV(31) = epsilon13
C STATEV(32) =  $\epsilon_{\max}^p$ 
C STATEV(33) = p
C STATEV(34) = Dcycli
C STATEV(35) = Ycyclique
C STATEV(36) = Energie dissip,e
C STATEV(37) = Flag

```

```

C
C
C
C

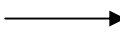
```

-----Déclaration ded variables-----

```

Dimension lame(2)
integer dirn
Parameter (dirn=3)
dimension props(Nprops), density(Nnblock),
1 strainInc(Nblock,dirn+nshr), stressOld(Nblock,dirn+nshr),
2 StateOld(Nblock,nstatev), enerInternOld(Nblock),
3 enerInelasOld(Nnblock), stressNew(Nblock,dirn+nshr),
4 StateNew(Nblock,nstatev),enerInternNew(Nblock),
5 enerInelasNew(Nblock)
CHARACTER*80 CMNAME
Dimension contrainte(dirn+nshr),devia(dirn+nshr)
Dimension epsilon(dirn+nshr)
Dimension A(dirn+nshr+1)

```



Paramètre interne qui est associé à la taille des tableaux. Quelque soit le type de calcul, en trois dimensions ou en deux dimensions, nous fixons la dimension des tableaux internes à dirn+nshr au lieu de ndir+nshr. Les composantes en excès dans les tableaux en deux dimensions sont fixées à 0. Cette méthode évite de modifier la matrice [h] : $\left(\frac{\partial k_j}{\partial q_{N+1}} \right)$, intervenant dans (183). q est l'ensembles des contraintes, force thermodynamique et variables internes. Les notations sont celles du chapitre n°3 I) 2.

```

C
C
C

```

A est le tableau contenant les forces thermodynamiques. En trois dimensions, il est défini comme suit :

Tableau Annexe IV) - 1 : Définition du tableau contenant les forces thermodynamiques lors d'un calcul en trois dimensions.

```

C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C

```

1	X_{11}
2	X_{22}
3	X_{33}
4	X_{12}
5	X_{23}
6	X_{13}
7	Y

```

Dimension V(2*(dirn+nshr)+2)
C V est le tableau contenant l'ensemble des variables internes. En trois dimensions, il est défini
C comme suit :

```

Tableau Annexe IV) - 2 : Définition du tableau contenant les variables internes lors d'un calcul en trois dimensions.

C
C
C
C
C
C
C
C
C
C

1	α_{11}	8	ϵ_{22} plastique
2	α_{22}	9	ϵ_{33} plastique
3	α_{33}	10	ϵ_{12} plastique
4	α_{12}	11	ϵ_{23} plastique
5	α_{23}	12	ϵ_{13} plastique
6	α_{13}	13	D_{sta}
7	ϵ_{11} plastique	14	λ

Dimension tolerance(4*(dirn+nshr)+2)
Dimension k(4*(dirn+nshr)+2), TOL(4*(dirn+nshr)+3)
Dimension C(4*(dirn+nshr)+3)
Dimension h(4*(dirn+nshr)+3,4*(dirn+nshr)+3)
Dimension b(4*(dirn+nshr)+3)
Real k
Real smean,J,f,equivStress, lame,DEQPS
Real contrainte, devia, epsilon
Real V,A,Epc,w,Gc
Real b,h,C,TOL
Integer i,p,q,ligne,n,m,ndir,nshr,nblock,iteration,nstatev
Integer iterationMax
Logical gauss
Logical correcteur
Logical tolerance

Matrices intervenants dans le pivot de Gauss permettant de calculer la correction, notée C, des variables internes et forces thermodynamiques. (183) du chapitre n°3 2-1-1 :
 $\{b\} + [h]*\{Cq\}=0$
 avec q l'ensemble des variables internes et des forces thermodynamiques associées

C
C
C
C
C

-----Initialisation-----

```
iterationMax=20
smean=0.
J=0.
f=0.
equivStress=0.
DEQPS=0.
Epc=0.
Gc=0.
w=0.
s=0
o=1
n=0
m=4*(dirn+nshr)+3
correcteur=.false.
gauss=.True.
lame(1)=0.
lame(2)=0.
e_vc=PROPS(9)
```

C
C

Enddo

C
C
C

-----Evaluation des contraintes élastiques-----

If (ndir.eq.3) **then**

 contrainte(1) = (lame(1)+2*lame(2))*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
 +*(epsilon(1)-V(1))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
 +((epsilon(2)-V(2))+epsilon(3)-V(3))
 contrainte(2) = (lame(1)+2*lame(2))*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
 +*(epsilon(2)-V(2))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
 +((epsilon(1)-V(1))+epsilon(3)-V(3))
 contrainte(3) = (lame(1)+2*lame(2))*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
 +*(epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
 +((epsilon(2)-V(2))+epsilon(1)-V(1))

Else

 epsilon(4)=epsilon(3)
 epsilon(3)= -lame(1)*((epsilon(2)-V(2))
 ++((epsilon(1)-V(1)))/(lame(1)+2*lame(2))+V(3))
 contrainte(1) = (lame(1)+2*lame(2))*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
 +*(epsilon(1)-V(1))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
 +((epsilon(2)-V(2))+epsilon(3)-V(3))
 contrainte(2) = (lame(1)+2*lame(2))*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
 +*(epsilon(2)-V(2))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
 +((epsilon(1)-V(1))+epsilon(3)-V(3))
 contrainte(3) = (lame(1)+2*lame(2))*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
 +*(epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
 +((epsilon(2)-V(2))+epsilon(1)-V(1))

Endif

Do i=1,nshr

 contrainte(i+dirn)=2*lame(2)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
 +(epsilon(dirn+i)-V(dirn+i))

Enddo

C
C-----
C
C
C
C
C

Calcul des A
l'instant N+1
X=C*apha

Do i=1,dirn+nshr

 A(i)=-PROPS(3)*V(dirn+nshr+i)

Enddo

C
C-----
C
C
C

Y_{Stat}

If (nshr.eq.3) **then**

 A(7)=0.5*((lame(1)+2*lame(2))*((epsilon(1)-V(1))**2
 ++((epsilon(2)-V(2))**2+(epsilon(3)-V(3))**2)+lame(2)
 +*((epsilon(4)-V(4))**2+(epsilon(5)-V(5))**2+(epsilon(6)
 +-V(6))**2)+lame(1)*(epsilon(1)-V(1))*(epsilon(2)
 +-V(2)+epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(epsilon(2)-V(2))

Cas en contraintes planes, ndir est différent de 3. L'incrément suivant la direction 3 n'est pas fourni par le logiciel. Nous le calculons pour que la contrainte suivant la direction 3 soit nulle

Différentiation du calcul en trois dimensions et en deux dimensions. En 3 D, ndir = nshr = 3. En contraintes planes, ndir = 2 et nshr = 1. En déformations planes, ndir = 3 et nshr = 1.

```

+*(epsilon(1)-V(1)+epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(epsilon(3)
+-V(3))*(epsilon(1)-V(1)+epsilon(2)-V(2)))
Else
  A(5)=0.5*((lame(1)+2*lame(2))*((epsilon(1)-V(1))**2
  ++(epsilon(2)-V(2))**2+(epsilon(3)-V(3))**2)+lame(2)
  +*((epsilon(4)-V(4))**2)+lame(1)*(epsilon(1)-V(1))*(epsilon(2)
  +-V(2)+epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(epsilon(2)-V(2))
  +*(epsilon(1)-V(1)+epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(epsilon(3)
  +-V(3))*(epsilon(1)-V(1)+epsilon(2)-V(2)))
Endif
C
C-----
C
C Calcul de J et f.
C
If (nshr.eq.3) then
  J=(3./2.*(((2./3.*contrainte(1)-1./3.*(contrainte(2)
  ++contrainte(3)))/(1-V(13))-A(1))**2+((2./3.*contrainte(2)
  +-1./3.*(contrainte(1)+contrainte(3)))/(1-V(13))-A(2))**2
  ++((2./3.*contrainte(3)-1./3.*(contrainte(1)+contrainte(2)))
  +/(1-V(13))-A(3))**2+(contrainte(4)/(1-V(13))-A(4))**2
  ++(contrainte(5)/(1-V(13))-A(5))**2+(contrainte(6)/(1
  +-V(13))-A(6))**2))**0.5
Else
  J=(3./2.*(((2./3.*contrainte(1)-1./3.*(contrainte(2)
  ++contrainte(3)))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))-A(1))**2+
  +((2./3.*contrainte(2)-1./3.*(contrainte(1)+contrainte(3)))
  +/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))-A(2))**2+((2./3.*contrainte(3)-1./3.*
  +(contrainte(1)+contrainte(2)))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))-A(3))**2+
  +(contrainte(4)/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))-A(4))**2))**0.5
Endif
C
C-----
C
C f = J-(limite élastique = PROPS(4))
C Tous nos calculs précédents ne sont valides que si l'incrément
C est élastique c'est-à-dire si f < 0. C'est notre condition pour entrée
C dans la seconde phase : le correcteur plastique.
C
C -----test d'entrée dans le correcteur-----
C
If (f.GE.0) then
  correcteur =.true.
Endif
C
C -----Première évaluation en élastique-----
C
If ((strainInc(z,1).Eq.-0.001).and.(strainInc(z,2).Eq.-0.001)
+and.(V(2*(dirn+nshr)+2).EQ.0))then
  correcteur =.false.
Endif
C
C
C
C

```

Si $f \geq 0$, il est nécessaire de corriger les valeurs calculées à l'étape précédente et donc d'entrer dans le correcteur plastique. Le booléen « correcteur » est fixé à vrai dans ce cas.

En Explicite, Abaqus réalise un premier calcul en élastique afin d'approximer le temps calcul. Il impose suivant les trois directions un incrément de déformation de -0.001. La Vumat risque de diverger dans le correcteur plastique avec des valeurs si grandes. Donc, nous l'obligeons à rester dans le cas élastique. Si l'incrément fourni en entrée, suivant deux directions, est de -0.001 et que l'endommagement est nul au pas précédant, le booléen « correcteur » est fixé à faux

```

C-----
C          Correcteur Plastique
C-----
C
C  Nous sommes dans la boucle interne du correcteur plastique.
C  Nous ne connaissons pas à priori le nombre d'incrément. Donc,
C  nous insérons un compteur « itération » fixé à 20. Le calcul
C  est stoppé si ce nombre est dépassé et dans le fichier .O la phrase
C  suivante est notée :
C  'STOP CORRECTEUR PLASTIQUE -> ITERATION MAX ATTEINT'
C
C          iteration=0
C
C  Tant que le correcteur est sur vrai, nous restons dans la boucle.
C
Do while (correcteur.eqv..true.)
    iteration=iteration+1
    If (iteration.GT.iterationMax) then
        write(3,*)'STOP CORRECTEUR PLASTIQUE -> ITERATION MAX ATTEINT'
    Stop
    Endif
C
C -----Définition des K. -----
C  Les K sont définis au chapitre n°3 I) 2-1 par les systèmes n°180
C  et n°181.
C-----
C
C  Ksigma1 à Ksigma3.
C
C
C          If (ndir.eq.3) then
                K(1)=contrainte(1)-((lame(1)+2*lame(2))*
+ (1-V(2*(dirn+nshr
++1))*epsilon(1)-V(1))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
+((epsilon(2)-V(2))+epsilon(3)-V(3))))
                K(2)=contrainte(2)-((lame(1)+2*lame(2))*
+ (1-V(2*(dirn+nshr
++1))*epsilon(2)-V(2))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
+((epsilon(1)-V(1))+epsilon(3)-V(3))))
                K(3)=contrainte(3)-((lame(1)+2*lame(2))*
+ (1-V(2*(dirn+nshr
++1))*epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
+((epsilon(2)-V(2))+epsilon(1)-V(1))))
          Else
                K(1)=contrainte(1)-((lame(1)+2*lame(2))*
+ (1-V(2*(dirn+nshr
++1))*epsilon(1)-V(1))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
+((epsilon(2)-V(2))+epsilon(3)-V(3))))
                K(2)=contrainte(2)-((lame(1)+2*lame(2))*
+ (1-V(2*(dirn+nshr
++1))*epsilon(2)-V(2))+lame(1)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
+((epsilon(1)-V(1))+epsilon(3)-V(3))))
                K(3)=epsilon(3)+lame(1)*((epsilon(2)-V(2))
++(epsilon(1)-V(1)))/(lame(1)+2*lame(2))-V(3)
          Endif

```

Cas de calcul en contraintes planes. Suivant la direction 3 l'équation change car la contrainte σ_3 doit être nulle. La correction se fera sur la valeur d'incrément de déformation suivant la dernière direction pour maintenir cette valeur nulle.

```

C
C-----
C
C   Kto1 à Kto3
C
      Do i=1,nshr
      K(3+i)=contrainte(i+3)-2*lame(2)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
      +*(epsilon(3+i)-V(3+i))
C
C-----
C
C   KX11 à kX33 et KX12, KX13, kX23.
C
      K(2*dirn+nshr+i)=A(dirn+i)+PROPS(3)*V(2*dirn+nshr+i)
      Enddo
C
      Do i=1,dirn
      K(dirn+nshr+i)=A(i)+PROPS(3)*V(dirn+nshr+i)
      Enddo
C
C-----
C
C   KYsta.
C
      If (nshr.eq.3) then
      K(13)=A(7)-1./2.*((lame(1)+2*lame(2))*((epsilon(1)
      +-V(1))**2+(epsilon(2)-V(2))**2+(epsilon(3)-V(3))**2)
      ++lame(2))*((epsilon(4)-V(4))**2+(epsilon(5)-V(5))**2+(epsilon(6)
      +-V(6))**2)+lame(1)*(epsilon(1)-V(1))*(epsilon(2)
      +-V(2)+epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(epsilon(2)-V(2))
      +*(epsilon(1)-V(1)+epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(epsilon(3)
      +-V(3))*(epsilon(1)-V(1)+epsilon(2)-V(2)))
      Else
      K(9)=A(5)-1./2.*((lame(1)+2*lame(2))*((epsilon(1)
      +-V(1))**2+(epsilon(2)-V(2))**2+(epsilon(3)-V(3))**2)
      ++lame(2))*((epsilon(4)-V(4))**2)+
      +lame(1)*(epsilon(1)-V(1))*(epsilon(2)
      +-V(2)+epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(epsilon(2)-V(2))
      +*(epsilon(1)-V(1)+epsilon(3)-V(3))+lame(1)*(epsilon(3)
      +-V(3))*(epsilon(1)-V(1)+epsilon(2)-V(2)))
      Endif
C
C-----
C
C   Ecriture simplifiée avec devia (i), la partie déviatorique des contraintes.
C
      Devia(1)=(2./3.*contrainte(1)-1./3.*(contrainte(2)+contrainte(3)))
      +/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
      Devia(2)=(2./3.*contrainte(2)-1./3.*(contrainte(1)+contrainte(3)))
      +/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
      Devia(3)=(2./3.*contrainte(3)-1./3.*(contrainte(1)+contrainte(2)))
      +/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
C

```

Calcul en trois dimensions.

```

Do i=1,nshr
      Devia(dirn+i)=contrainte(dirn+i)/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
Enddo
C
C-----
C
C      Kepsilonp1 à Kepsilonp3 et Kgammap1 à Kgammap3.
C
C
C      Do i=1,dirn+nshr
            K(2*(dirn+nshr)+1+i)=(V(i)-StateOld(z,dirn+nshr+1+i))-
            +(V(2*(dirn+nshr)+2)-StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))*3*
            +(devia(i)-A(i))/(2*J*(1-V(2*(dirn+nshr)+1)))
C
C-----
C
C      K-alpha11 à K-alpha33
C      K-alpha13, K-alpha12 et K-alpha23.
C
C
C            K(3*(dirn+nshr)+1+i)=(V(i+dirn+nshr)-StateOld(z,2*
            +(dirn+nshr)+1+i))+V(2*(dirn+nshr)+2)-
            +StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))*3*(devia(i)-A(i))/(2*J)
Enddo
C
C
C-----
C
C      KDsta
C
C
C      K(4*(dirn+nshr)+2)=(V(2*(dirn+nshr)+1)-
            +StateOld(z,3*(dirn+nshr)+2))-V(2*(dirn+nshr)+2)-
            +StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
            +(abs(A(dirn+nshr+1))/PROPS(5))*PROPS(6)
C
C
C      -----La condition sortie-----
C
C      Dans un premier temps, chacune des valeurs de K est comparée
C      à la tolérance s’y rapportant. Si K (i) ≤ TOL (i) et si la nouvelle
C      surface de charge vérifie f ≤ TOL (f) alors le booléen tolérance (i)
C      est fixé à vrai. Il appartient au tableau de booléen tolérance.
C      Dans un second temps, le nombre de tolérance (i) = vrai est
C      comptabilisé. Si ce nombre est égal à la somme du nombre des
C      contraintes, des forces thermodynamique et des variables internes
C      alors le Newton-Raphson à converger et nous sortons du
C      correcteur plastique.
C
C      If (s.eq.0) then
            go to 666
Else
            Do i=1,4*(dirn+nshr)+2
                    If (((K(i)).LT.TOL(i)).and.((f).LT.
            +TOL(4*(dirn+nshr)+3))) then

```

Pour la première itération dans le correcteur, les K sont nuls. Donc la condition de sortie est automatiquement vérifiée. Pour ne pas sortir, une condition sur s est imposée. Si s = 0, le programme saute les lignes suivantes jusqu'à la ligne 666.

```

        tolerance(i) =.True.
    Else
        tolerance(i) =.False.
    endif
enddo
endif
o=0
Do i=1,4*(dirn+nshr)+2
    If (tolerance(i).eqv..true.) then
        o=o+1
    endif
enddo

```

Décompte des tolérances vérifiées. Cette méthode permet d'avoir accès facilement au paramètre qui ne converge pas.

```

If (o.EQ.(4*(dirn+nshr)+2)) then
    correcteur=.false.
    goto 999
Else
    goto 666
endif

```

Sortie du correcteur plastique.

Passage à l'itération suivante car le système n'a pas convergé.

```

C
C-----
C
C Calcul des correcteurs plastiques
C-----
C
C Le vecteur des K est noté b, chapitre n°3 I) 2-1.
C C'est b qui subira le pivot de Gauss. Il contient en plus
C l'expression de -f par rapport à K. b est défini par b=-K
C avec comme dernière composante -f. C'est lui que
C nous aurons en sortie de la subroutine pivot Gauss.
C
666 Do i=1,4*(dirn+nshr)+2
    b(i)=-K(i)
Enddo
b(4*(dirn+nshr)+3)=-f
C
C-----
C
C Définition de la matrice des dérivés de K, notée [h].
C-----

```

Tableau Annexe IV) - 3 : Partie supérieure de [h] lors d'un calcul en trois dimensions.

	σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}	σ_{23}	σ_{13}	X 11	X 22	X 33	X 12	X 23	X 13	Ystat	ep11	ep22	ep33	ep12	ep23	ep13	α_{11}	α_{22}	α_{33}	α_{12}	α_{23}	α_{13}	Dstat	λ	
σ_{11}																												
σ_{22}																												
σ_{33}																												
σ_{12}																												
σ_{23}																												
σ_{13}																												
X 11																												
X 22																												
X 33																												
X 12																												
X 23																												
X 13																												
Ystat																												

```

C
C
C-----
C  Calcul de la partie supérieure de la matrice c'est-à-dire
C  des lignes correspondant aux contraintes et forces
C  thermodynamiques associées.
C-----
C
  Do i=1,2*(dirn+nshr)+1
    Do n=1,4*(dirn+nshr)+2
      If (n.EQ.i) then
        h(i,n)=1
      Elseif ((i.LE.dirn)
+and.(n.GE.2*(dirn+nshr)+2)
+and.(n.LE.2*(dirn+nshr)+1+dirn).AND.
+(n.NE.(i+2*(dirn+nshr)+1))) then
        h(i,n)=(1.-V(2*(dirn+nshr)+1))*lame(1)
      Elseif ((n.EQ.(i+2*(dirn+nshr)+1))
+and.(n.LT.2*(dirn+nshr)+dirn+2)) then
        h(i,n)=(1.-V(2*(dirn+nshr)+1))*(lame(1)+2.*lame(2))
      Elseif ((n.EQ.(i+2*(dirn+nshr)+1))
+and.(n.GT.2*(dirn+nshr)+dirn+1)
+and.(n.LE.3*(dirn+nshr)+1)) then
        h(i,n)=(1.-V(2*(dirn+nshr)+1))*2.*lame(2)
      Elseif ((n.EQ.(i+2*(dirn+nshr)+1))
+and.(n.GT.3*(dirn+nshr)+1).and.(n.LE.4*(dirn+nshr)+1)) then
        h(i,n)=PROPS(3)
      Endif*
    Enddo
  Enddo
C
C  Dans la boucle précédente la ligne  $Y_{sta}$ 
C  et les colonnes  $D_{sta}$ ,  $\lambda$  ne sont pas prises en compte
C
C  Pour la colonne  $D_{sta}$ , les dérivées des contraintes en fonction de  $D_{sta}$ 
C  sont exprimées dans les lignes qui suivent. De plus, la ligne
C   $Y_{sta}$  est complétée car certains termes sont égaux à ceux de
C  la colonne de  $D_{sta}$ .
C
      If ((n.EQ.4*(dirn+nshr)+2).and.(i.GT.dirn)
+and.(i.LE.dirn+nshr)) then
        h(i,n)=2.*lame(2)*(epsilon(i)-V(i))
        h(n-(2*(dirn+nshr)+1),2*(dirn+nshr)+1+i)=h(i,n)
      Endif
    Enddo
  Enddo
C
C  Les composantes de la colonne de  $D_{sta}$  n'entrant pas dans une boucle
C  précédente, c'est-à-dire les dérivés de  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  sont définies.
C
  h(1,4*(dirn+nshr)+2)=(lame(1)+2*lame(2))*(epsilon(1)-V(1))
++lame(1)*((epsilon(2)-V(2))+(epsilon(3)-V(3)))
  h(2,4*(dirn+nshr)+2)=(lame(1)+2*lame(2))*(epsilon(2)-V(2))
++lame(1)*((epsilon(1)-V(1))+(epsilon(3)-V(3)))
  h(3,4*(dirn+nshr)+2)=(lame(1)+2*lame(2))*(epsilon(3)-V(3))

```


++lame(1)*((epsilon(2)-V(2))+epsilon(1)-V(1)))

C

C De même que précédemment, ces termes sont égaux aux dérivés

C de Y_{sta} en fonction des contraintes σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} .

C

$h(2*(dirn+nshr)+1,2*(dirn+nshr)+2)=h(1,4*(dirn+nshr)+2)$

$h(2*(dirn+nshr)+1,2*(dirn+nshr)+3)=h(2,4*(dirn+nshr)+2)$

$h(2*(dirn+nshr)+1,2*(dirn+nshr)+4)=h(3,4*(dirn+nshr)+2)$

C

C-----

C

C Calcul de la partie inférieure de la matrice c'est-à-dire
C à partir de la ligne epsilonp.

C

C-----

C

Tableau Annexe IV) - 4 : Partie inférieure de [h] lors d'un calcul en trois dimensions.

	σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}	σ_{23}	σ_{13}	χ_{11}	χ_{22}	χ_{33}	χ_{12}	χ_{23}	χ_{13}	Y_{stat}	sp11	sp22	sp33	sp12	sp23	sp13	α_{11}	α_{22}	α_{33}	α_{12}	α_{23}	α_{13}	Dstat	λ	
sp11																												
sp22																												
sp33																												
sp12																												
sp23																												
sp13																												
α_{11}																												
α_{22}																												
α_{33}																												
α_{12}																												
α_{23}																												
α_{13}																												
Dstat																												
f																												

C

Do i=1,2*(dirn+nshr)

$h(i+2*(dirn+nshr)+1,i+2*(dirn+nshr)+1)=1$

Enddo

Do i=1,dirn

$h(2*(dirn+nshr)+1+i,i)=-V(2*(dirn+nshr)+2)$

$+StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3)/(J*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))**2)*$

$+(1-9.*(devia(i)-A(i))**2/(4.*J**2))$

$h(3*(dirn+nshr)+1+i,i)=-h(2*(dirn+nshr)+1+i,i)*(1-$

$+V(2*(dirn+nshr)+1))$

Enddo

C

Do i=1,nshr

$h(2*(dirn+nshr)+1+dirn+i,i+dirn)=-V(2*(dirn+nshr)+2)$

$+StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3)**3./(2.*J*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))**2)$

$+*(1-3.*(devia(i+3)-A(i+3))**2/(2.*J**2))$

$h(3*(dirn+nshr)+1+dirn+i,i+3)=-h(2*(dirn+nshr)+1+dirn+i,i+dirn)$

$+*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))$

Enddo

C

C

Do i=1,dirn+nshr

Do n=1,dirn+nshr

If ((i.LE.dirn).and.(i.NE.n).and.(n.LE.dirn)) **then**

$h(2*(dirn+nshr)+1+i,n)=V(2*(dirn+nshr)+2)$

```

+-StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3)/(J*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))**2)
+*(1./2.+9.*(devia(i)-A(i))*(devia(n)-A(n))/(4.*J**2))
      h(3*(dirn+nshr)+1+i,n)=-h(2*(dirn+nshr)+1+i,n)*
+(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
      Elseif (i.NE.n) then
          h(2*(dirn+nshr)+1+i,n)=(V(2*(dirn+nshr)+2)
+-StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))/(4.*J**3*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))**2)
+*9.*(devia(i)-A(i))*(devia(n)-A(n))
          h(3*(dirn+nshr)+1+i,n)=-h(2*(dirn+nshr)+1+i,n)
+*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
      Endif
Enddo
Enddo

```

C

```

Do i=1,dirn+nshr
      do n=1,dirn+nshr
          If (i.EQ.n) then
              h(2*(dirn+nshr)+1+i,n+dirn+nshr)=3.*(V(2*(dirn+nshr)+2)
+-StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))/(2.*J*(1-V(2*(dirn+nshr)+1)))*(1-3.
+*(devia(i)-A(i))**2/(2.*J**2))
              h(3*(dirn+nshr)+1+i,n+dirn+nshr)=-h(2*(dirn+nshr)+1+i,
+n+dirn+nshr)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
          Else
              h(2*(dirn+nshr)+1+i,n+dirn+nshr)=(V(2*(dirn+nshr)+2)
+-StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))/(4.*J**3*(1-V(2*(dirn+nshr)+1)))*9.
+*(devia(i)-A(i))*(devia(n)-A(n))
              h(3*(dirn+nshr)+1+i,n+dirn+nshr)=-h(2*(dirn+nshr)+1+i,
+n+dirn+nshr)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
          Endif
      Enddo
Enddo

```

C

C

C

C Les dérivés de $K D_{sta}$ en fonction de Y_{sta} , D_{sta} et λ sont formulées dans les lignes suivantes.

C

C

```

      h(4*(dirn+nshr)+2,2*(dirn+nshr)+1)=- (V(2*(dirn+nshr)+2)
+-StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))*PROPS(6)/(PROPS(5)*
+(1-V(2*(dirn+nshr)+1)))*(A((dirn+nshr)+1)
+/PROPS(5))** (PROPS(6)-1)
      h(4*(dirn+nshr)+2,4*(dirn+nshr)+2)=1-(V(2*(dirn+nshr)+2)
+-StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))**2*
+(A((dirn+nshr)+1)/PROPS(5))**PROPS(6)
      h(4*(dirn+nshr)+2,4*(dirn+nshr)+3)=-1/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))*
+(A((dirn+nshr)+1)/PROPS(5))**PROPS(6)

```

C

Do i=1,dirn+nshr

C

C Les termes de la dernière colonne sont les dérivés de $K(i)$ par rapport à λ .

C

```

      h(2*(dirn+nshr)+1+i,4*(dirn+nshr)+3)=-3./(2.*J*(1-V(2*(dirn+nshr)
++1)))*(devia(i)-A(i))

```

```

h(3*(dirn+nshr)+1+i,4*(dirn+nshr)+3)=-h(2*(dirn+nshr)+1+i,
+4*(dirn+nshr)+3)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
C
C
h(4*(dirn+nshr)+3,i)=3*(devia(i)-A(i))/(2*J*
+(1-V(2*(dirn+nshr)+1)))
h(4*(dirn+nshr)+3,i+dirn+nshr)=-(-1-V(2*(dirn+nshr)+1))
+*h(4*(dirn+nshr)+3,i)
Enddo

If (nshr.eq.3) then

    Do i=1,6
C
C Les termes de l'avant dernière colonne sont les dérivés de K (i)
C par rapport à de Dsta.
C
    h(13+i,26)=-3.*(V(14)-StateOld(z,21))/(2.*J*(1-V(13))**2)
+*(2*devia(i)-A(i)+(devia(i)-A(i))*(devia(4)+devia(5)+devia(6)-A(4)
+-A(5)-A(6))/(J**2*(1-V(13))))
    h(19+i,26)=-h(13+i,26)*(1-V(13))
    Enddo
    h(27,26)=3*(2*((devia(4)-A(4))+(devia(5)-A(5))+(devia(6)-A(6))))
+/(2*J*(1-V(13))**2)
    Else
    Do i=1,4
    h(2*(dirn+nshr)+1+i,4*(dirn+nshr)+2)=-3.*(V(2*(dirn+nshr)+2)-
+StateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))/(2.*J*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))**2)
+*(2*devia(i)-A(i)+(devia(i)-A(i))*(devia(4)-A(4)
+)/(J**2*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))))
    h(3*(dirn+nshr)+1+i,4*(dirn+nshr)+2)=-h(2*(dirn+nshr)+1+i,
+4*(dirn+nshr)+2)*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
    Enddo

h(4*(dirn+nshr)+3,4*(dirn+nshr)+2)=3*((devia(4)-A(4)))
+/(2*J*(1-V(2*(dirn+nshr)+1))**2)
Endif

If (ndir.eq.2) then
    Do j=1,4*(dirn+nshr)+3
    h(dirn,j)=0.
    h(j,dirn)=0.
    Enddo
h(dirn,dirn)=1.
h(dirn,2*(dirn+nshr)+2)=-lame(1)/(lame(1)+2*lame(2))
h(dirn,2*(dirn+nshr)+3)=-lame(1)/(lame(1)+2*lame(2))
h(dirn,2*(dirn+nshr)+4)=-1.
h(1,dirn)=-h(1,2*(dirn+nshr)+2)
h(2,dirn)=-h(1,2*(dirn+nshr)+3)
h(2*(dirn+nshr)+1,dirn)=-h(2*(dirn+nshr)+1,2*(dirn+nshr)+2)
endif

```

Equations utilisées lors d'un calcul en trois dimensions.

Cas des contraintes planes : réécriture de la colonne n°3 et de la ligne n°3 correspondant à la correction sur la déformation suivant la direction trois pour obtenir la contrainte suivant cette même direction nulle

```

C
C -----Résolution du système d'équation-----
C
C      Call Simeq(4*(dirn+nshr)+3,h,b)
C          Do i=1,4*(dirn+nshr)+3
C              C(i)=b(i)
C          Enddo
C
C -----Actualisation des variables et des forces-----
C
C Les contraintes sont corrigées en additionnant l'ancienne
C valeur des contraintes et le C (i) correspondant.
C
C      If (ndir.eq.3) then
C          Do i=1,dirn+nshr
C              contrainte(i)=contrainte(i)+C(i)
C
C -----
C
C les A (i), les forces thermodynamiques associées :
C
C          A(i)=A(i)+C(i+dirn+nshr)
C      Enddo
C
C      Else
C          Do i=1,ndir
C              contrainte(i)=contrainte(i)+C(i)
C              A(i)=A(i)+C(i+dirn+nshr)
C          Enddo
C
C          epsilon(3)=epsilon(3)+C(3)
C          contrainte(4)=contrainte(4)+C(4)
C          A(3)=A(3)+C(7)
C          A(4)=A(4)+C(8)
C      Endif
C
C La correction suivant Y n'entrant dans aucune boucle
C et catégorie de calcul, l'expression générale de Y corrigée est
C la suivante :
C      A(dirn+nshr+1)=A(dirn+nshr+1)+C(2*(dirn+nshr)+1)
C
C -----
C
C les V(i), les variables internes :
C
C      Do i=1,2*(dirn+nshr)+2
C          V(i)=V(i)+C(i+2*(dirn+nshr)+1)
C      Enddo
C
C -----
C
C Calcul de la nouvelle valeur de J et f à
C partir des valeurs corrigées de q.
C -----

```

La résolution du système d'équation n°183 est effectuée en inversant la matrice [h] à l'aide d'un pivot de Gauss. « Simeq » est une sous fonction qui fournie en sortie les corrections :

$$\{b\}_{\text{en sortie}} = [h]^{-1} \{b\}_{\text{en entrée}}$$

Ensuite, il suffit d'égaliser {b} et {Cq}, la matrice des corrections.

Contraintes planes

Dans le cas des contraintes planes, c'est la déformation totale suivant la direction trois qui est corrigée et non pas la contrainte suivant cette même direction.

C
C

If (nshr.eq.3) **then**

 J=(3./2.*((2./3.*contrainte(1)-1./3.*(contrainte(2)
 ++contrainte(3)))/(1-V(13))-A(1))**2+((2./3.*contrainte(2)
 +-1./3.*(contrainte(1)+contrainte(3)))/(1-V(13))-A(2))**2
 ++((2./3.*contrainte(3)-1./3.*(contrainte(1)+contrainte(2)))
 +/(1-V(13))-A(3))**2+(contrainte(4)/(1-V(13))-A(4))**2
 ++(contrainte(5)/(1-V(13))-A(5))**2+(contrainte(6)/(1
 +-V(13))-A(6))**2)**0.5

Else

 J=(3./2.*((2./3.*contrainte(1)-1./3.*(contrainte(2)
 ++contrainte(3)))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))-A(1))**2+
 +(2./3.*contrainte(2)-1./3.*(contrainte(1)+contrainte(3)))
 +/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))-A(2))**2+((2./3.*contrainte(3)-1./3.*
 +(contrainte(1)+contrainte(2)))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))-A(3))**2+
 +(contrainte(4)/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))-A(4))**2)**0.5

Endif

C

C-----

C

 f=J-PROPS(4)

C

 s=s+1

C

C

999 Enddo

C

C

C

C-----

C

Variables en sortie

C-----

C

C

C

C

C

C

C

C

C-----

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

Arrivé en ce point les valeurs contenues dans les tableaux internes,
 contrainte, A et V, sont les valeurs des variables au pas N+1.
 Maintenant, elles doivent être regroupées dans les tableaux propres,
 à Abaqus c'est-à-dire StressNew et StateNew.

Les contraintes, déformations totales et
 les forces thermodynamiques :

If (ndir.eq.3) **then**

Do i=1,dirn+nshr

 StressNew(z,i)=contrainte(i)

 StateNew(z,3*(dirn+nshr)+7+i)=epsilon(i)

 StateNew(z,i)=A(i)

Enddo

Else

Do i=1,ndir

Calcul en trois dimensions

Actualisation de l'indice de la
 boucle interne. Dans le
 chapitre n°3 I) 2, cet indice est
 noté L.

Sortie du correcteur plastique

```

stressNew(z,i)=contrainte(i)
StateNew(z,3*(dirn+nshr)+7+i)=epsilon(i)
StateNew(z,i)=A(i)
  Enddo
stressNew(z,3)=contrainte(4)
StateNew(z,3)=A(3)
StateNew(z,4)=A(4)
StateNew(z,3*(dirn+nshr)+10)=epsilon(3)
StateNew(z,3*(dirn+nshr)+11)=epsilon(4)
Endif
StateNew(z,(dirn+nshr)+1)=A((dirn+nshr)+1)
C
C-----
C
C Les variables internes :
C
  Do i=1,2*(dirn+nshr)+2
    StateNew(z,i+(dirn+nshr)+1)=V(i)
  Enddo
C
C-----
C
C Les variables découplés.
C La méthode précédente permet de résoudre un problème
C faisant intervenir des variables liées les unes aux autres.
C Citons, l'endommagement statique qui modifie le comportement
C élastique et plastique et inversement la plasticité qui engendre
C l'endommagement statique. Certaines variables peuvent être
C calculées à la fin de la Vumat, directement à partir d'autres
C variables car elles n'interviennent pas dans les expressions
C des autres variables. C'est le cas de l'endommagement cyclique
C  $D_{cyc}$  et de la force thermodynamique qui lui est associées  $Y_{cyc}$ .
C
C
C --Déformation plastique équivalente maximale--
C
  If (nshr.eq.3) then
    Epc=(2./3.*(V(1)**2+V(2)**2
    ++V(3)**2+2*V(4)**2
    ++2*V(5)**2+2*V(6)**2)**0.5
  Else
    Epc=(2./3.*(V(1)**2+V(2)**2
    ++V(3)**2+2*V(4)**2)**0.5
  Endif

  If (Epc.LT.StateOld(z,4*(dirn+nshr)+8)) then
    StateNew(z,4*(dirn+nshr)+8)=StateOld(z,4*(dirn+nshr)+8)
  Else
    StateNew(z,4*(dirn+nshr)+8)=Epc
  Endif
C
C-----Accumulation plastique-----
C

```

Contraintes planes

Calcul de la déformation plastique équivalente suivant les différents cas de calcul

Actualisation du « Statev » si la déformation plastique équivalente calculée au pas N+1 est supérieure à la valeur présente dans ce tableau

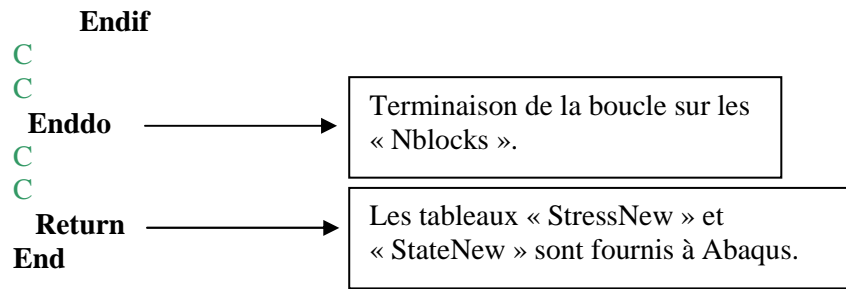
```

Epc=(2./3.*(V(1)**2+V(2)**2
++V(3)**2+2*V(4)**2)**0.5
C
C
If (Epc.LT.stateOld(z,4*(dirn+nshr)+8)) then
    stateNew(z,4*(dirn+nshr)+8)=stateOld(z,4*(dirn+nshr)+8)
Else
    stateNew(z,4*(dirn+nshr)+8)=Epc
Endif
C
C
C
C
If ((Epc.EQ.stateNew(z,4*(dirn+nshr)+8)).and.
+(stateOld(z,4*(dirn+nshr)+10).EQ.0)) then
    stateNew(z,4*(dirn+nshr)+9)=stateNew(z,4*(dirn+nshr)+8)
Elseif ((Epc.NE.stateNew(z,4*(dirn+nshr)+8)).and.
+(stateOld(z,4*(dirn+nshr)+10).EQ.0)) then
    stateNew(z,4*(dirn+nshr)+9)=stateOld(z,4*(dirn+nshr)+9)
    ++abs((stateNew(z,3*(dirn+nshr)+3)-stateOld(z,3*(dirn+nshr)
    ++3)))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
Elseif (stateOld(z,4*(dirn+nshr)+10).NE.0 ) then
    stateNew(z,4*(dirn+nshr)+9)=stateOld(z,4*(dirn+nshr)+9)
    ++abs((stateNew(z,3*(dirn+nshr)+3)-stateOld(z,3*(dirn+nshr)
    ++3)))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
Endif
C
C
----- Dcyclique
C
stateNew(z,4*(dirn+nshr)+10)=stateOld(z,4*(dirn+nshr)+10)
++(stateNew(z,4*(dirn+nshr)+9)-stateNew(z,4*(dirn+nshr)+8))
+**PROPS(8)*stateNew(z,4*(dirn+nshr)+8)/PROPS(7)*
+(stateNew(z,3*(dirn+nshr)+3)-
+stateOld(z,3*(dirn+nshr)+3))/(1-V(2*(dirn+nshr)+1))
C
C
-----Force thermodynamique associée à Dcyclique
C
stateNew(z,4*(dirn+nshr)+11)=1./(1+PROPS(8))*
+(stateNew(z,4*(dirn+nshr)+9)-stateNew(z,4*(dirn+nshr)+8))
+**(PROPS(8)+1)
C
C
-----Critère d'élimination-----
C
stateNew(z,4*(dirn+nshr)+12)=stateOld(z,4*(dirn+nshr)+12)+(
+stateNew(z,(dirn+nshr)+1)*(stateNew(z,3*(dirn+nshr)+2)-
+stateOld(z,3*(dirn+nshr)+2))+stateNew(z,4*(dirn+nshr)+11)*
+(stateNew(z,4*(dirn+nshr)+10)-stateOld(z,4*(dirn+nshr)+10)))
C
C
669 If (abs(StateNew(z,4*(dirn+nshr)+12)).GE.abs(Gc)) then
StateNew(z,4*(dirn+nshr)+13)=0.
Else
    StateNew(z,4*(dirn+nshr)+13)=StateOld(z,4*(dirn+nshr)+13)

```

Calcul de l'énergie volumique dissipée par l'endommagement statique et cyclique. Il est important de préciser que les énergies volumiques dissipées par des phénomènes autres, comme la plasticité, ne sont pas pris en compte dans le critère de rupture.

Le flag est une variable définie dans le « Statev ». Lorsque le critère de rupture est vérifié, sa valeur passe de 1 à 0. Si elle vaut 1, l'élément est considéré comme rompu. Le « Nblock » correspondant est relevé. Au pas suivant, Abaqus ne calculera pas les variables en se « Nblock » car il le considérera comme ayant rompu. Toutes les contraintes sont fixées à 0.



II) Résolution d'un système d'équations : fonction « Simeq »

```

C-----
C-----
C
C  Résolution d'un système d'équation par la méthode de substitution inverse.
C  La subroutine fournie en sortie un vecteur {b}. La matrice a doit avoir été
C  au préalable décomposé selon la méthode LU, c'est à dire
C  décomposé en deux matrices triangulaires.
C
C  Référence: "Numerical Recipes" Section 2.3 p. 31
C
C-----

```

Subroutine kLU_BackSub(n,a,index,b)

Include 'vaba_param.inc'

Dimension a(n,n), index(n), b(n)

ii = 0

```

C
C-----

```

C La substitution

```

C-----
C

```

```

Do i = 1,n
  m = index(i)
  sum = b(m)
  b(m) = b(i)
  If ( ii .ne. 0 ) then
    Do j = ii,i-1
      sum = sum - a(i,j) * b(j)
    Enddo
  Elseif ( sum .ne. 0.0 ) then
    ii = i
  Endif
  b(i) = sum
Enddo

```

```

C
C-----

```

C Substitution inverse

```

C-----
C

```

```

Do i = n,1,-1
  sum = b(i)
  If ( i .lt. n ) then
    Do j = i+1,n
      sum = sum - a(i,j) * b(j)
    End do
  End if
  b(i) = sum / a(i,i)
Enddo

```

```

Return
End
C
C-----
C-----
C
C  Nom :
C  ECHANG
C
C  Fonctionnalité :
C  Procédure de permutation de deux lignes d'une
C  matrice ou d'un vecteur
C
C  Entrée(s) :
C  A : matrice / vecteur
C  m, n : dimension
C  k, l: lignes a permuter
C
C  Sortie(s) :
C  B : matrice / vecteur
C
C-----
C-----
C
Subroutine ECHANGE (A, m, n, k, l, B)
Real A(m,n), B(n,n)
Real t
Integer m, n, k, l, j
Call DUPLIQ(A, m, n, B)
Do 600 j=1, n
    t = A(k, j)
    B(k, j) = A(l, j)
    B(l, j) = t
600 Continue
Return
End
C
C-----
C-----
C
C  Nom :
C  PIVOTE
C
C  Fonctionnalité :
C  Procédure de permettant d'effectuer le pivot a
C  l'etape i
C
C  Entree(s) :
C  p : étape du pivot
C  A : matrice carrée
C  m : dimension de A
C  B: matrice / vecteur
C  o : nombre de colonnes de B
C
C  Sortie(s) :

```

```

C   A : matrice
C   B : matrice / vecteur
C
C-----
C-----
C
Subroutine PIVOTE (p, A, m, B, o)
Real A(m, m), B(m, m)
Integer i, j, m, o, p
Real piv, t
piv = A(p, p)
Do 720 i=p+1, m
    t = A(i, p)
    A(i, p) = 0
C
C   Boucle de pivot de A
C
    Do 700 j=p+1,m
        A(i, j) = A(i, j) - A(p, j)*t/piv
700 Continue
C
C   Boucle de pivot de A
C
    Do 710 j=1,o
        B(i, j) = B(i, j) - B(p, j)*t/piv
710 Continue
720 Continue
Return
End
C
C-----
C-----
C
C   Nom :
C   TRIANG
C
C   Fonctionnalité :
C   Procédure de résolution d'un système triangulaire
C
C   Entrée(s) :
C   A : matrice triangulaire
C   m : dimension de A
C   B : matrice / vecteur
C   n : nombre de colonnes de B
C
C   Sortie(s) :
C   X : matrice / vecteur
C
C-----
C-----
C
Subroutine TRIANG (A, m, B, n, X)
Real A(m, m), B(n, n), X(n, n)

```

```

Integer m, n, i, j, k
Real t
Do 820 k=1, n
    X(m, k) = B(m, k) / A(m, m)
Do 810 i=m-1, 1, -1
    t = 0
    Do 800 j=i+1, m
        t = t + X(j, k) * A(i, j)
800 Continue
    X(i, k) = (B(i, k) - t) / A(i, i)
810 Continue
820 Continue
Return
End

```

```

C
C-----
C-----
C
C
C
C  Nom :
C  LIGNE
C
C  Fonctionnalité :
C  Procédure de recherche de la ligne de pivot a
C  l'étape n
C
C  Entree(s) :
C  A : matrice carrée
C  m : dimension de A
C  n : colonne de recherche
C
C  Sortie(s) :
C  -> : ligne de pivot (0 si celle-ci n'existe pas)
C
C
C-----
C-----
C

```

```

Integer FUNCTION LIGNE (A, m, n)
Real A(m, m)
Integer m, n, p
    p = n
400 If (.Not. ((p.LE.m) .And. (A(p, n) .EQ. 0)))
    + GO TO 410
    p = p + 1
    Goto 400
410 Continue
    IF (p .GT. m) p = 0
    LIGNE = p
Return
End

```

```

C
C-----
C-----

```

```
C
C
C
C  Nom :
C  DUPLIQ
C
C  Fonctionnalité :
C  Procédure de duplication matricielle / vectorielle
C
C  Entrée(s) :
C  A : matrice / vecteur
C  m, n : dimension
C
C  Sortie(s) :
C  B : matrice / vecteur
C
C
C-----
C-----
C
C  Subroutine DUPLIQ (A, m, n, B)
C  Real A(10,10), B(10,10)
C  Integer m, n, i, j
C  Do 510 i=1, m
C    Do 500 j=1, n
C      B(i, j) = A(i, j)
C  500 Continue
C  510 Continue
C  Return
C  End
C
C
C  Subroutine AFFICH (h, m, n)
C  REAL h(m,n)
C  Integer m, n, i, j
C  DO 100 i=1, m
C  100 Continue
C  Return
C  End
```