
ÉTUDE DE LA DUREE DE VIE EN FATIGUE DES JOINTS SOUDES

La compréhension et la modélisation du gradient de comportement mécanique du joint soudé réalisées dans le chapitre précédent permettent de connaître les niveaux de contraintes et de déformations à travers le joint. À partir de ces résultats, le comportement en fatigue de la structure soudée est étudié et est modélisé dans ce chapitre.

Les campagnes d'essais expérimentaux en fatigue uniaxiale et multiaxiale réalisées sur le métal de base et sur le joint soudé sont présentées. Différents rapports de charge ont été imposés dans le but de prendre en compte les effets de contraintes moyennes.

Les paramètres d'un modèle en fatigue sont identifiés afin d'estimer les durées de vie des soudures et de les comparer avec celles qui sont mesurées expérimentalement. Le modèle de fatigue n'est pas identifié avec des paramètres dépendant de l'espace ; c'est la loi de comportement mécanique qui induit cette dépendance.

4.1 Géométrie des éprouvettes et conditions d'essais

Comportement de fatigue en chargement uniaxial

La géométrie des éprouvettes diffère légèrement de celle des éprouvettes utilisées pour l'étude des comportements mécaniques (Figure 2.1). La largeur dans les têtes reste de 24 mm, celle dans la zone utile est de 12 mm et l'épaisseur pour les deux types d'éprouvettes est ramenée à 2,8 mm. L'état de surface est défini par une rugosité de 0,2 μm sur chaque surface. En effet, de nombreux travaux ont démontré l'importance de l'état de surface des éprouvettes qui, s'il ne respecte pas une certaine tolérance, fait apparaître un amorçage de fissures prématuré lors d'essais en fatigue [106] [107] [74].

L'éprouvette constituée uniquement du métal de base a une forme de « diabolo », le rayon des congés de raccordement est de 150 mm, ce qui permet d'avoir une largeur au centre de l'éprouvette de 12 mm (Figure 4.1 : gauche).

Pour l'éprouvette avec un joint soudé, la longueur de zone utile reste inchangée à 30 mm. Les rayons des congés de raccordement sont augmentés à 50 mm (Figure 4.1 : droite).

Les géométries de ces éprouvettes respectent la norme ASTM E-466-07 [59].

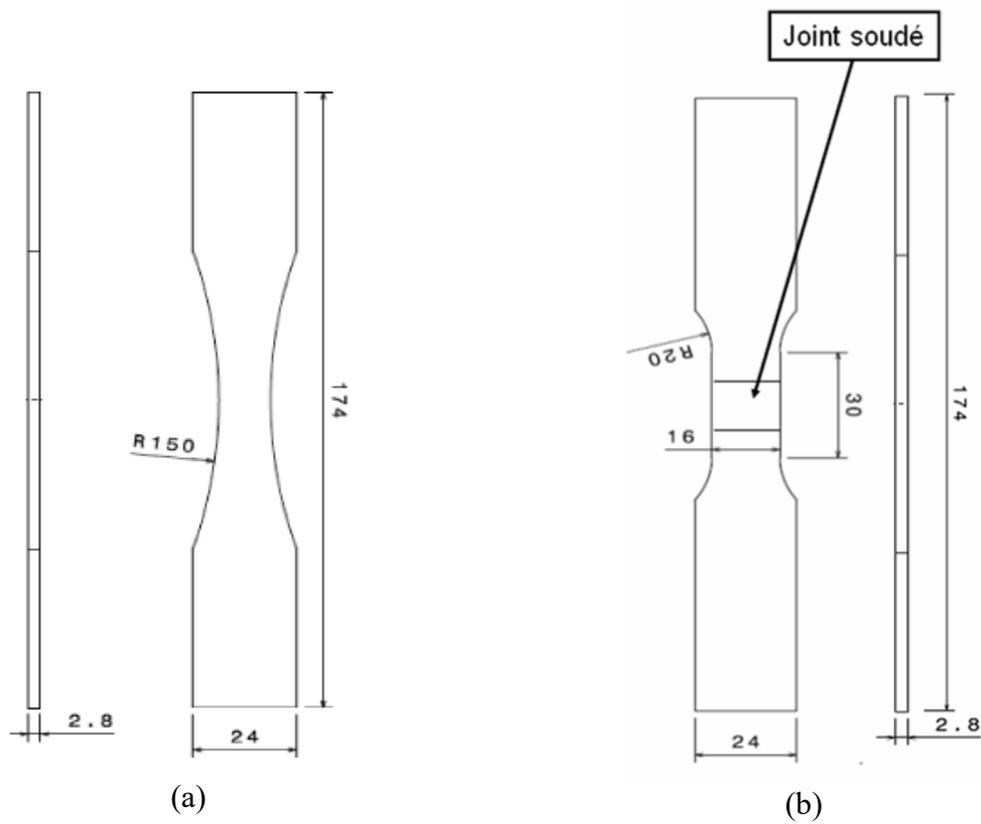


Figure 4.1 : Géométries d'éprouvettes utilisées pour les essais mécaniques sur le 2198-T8 seul (a) et sur le joint soudé FSW (b).

Le signal de chargement imposé est de type sinusoïdal, avec une fréquence de 5 Hz. Les essais sont pilotés en force avec différents rapports de charge (-0,3 ; 0,1 et 0,5). La figure 4.2 illustre les différents chargements appliqués.

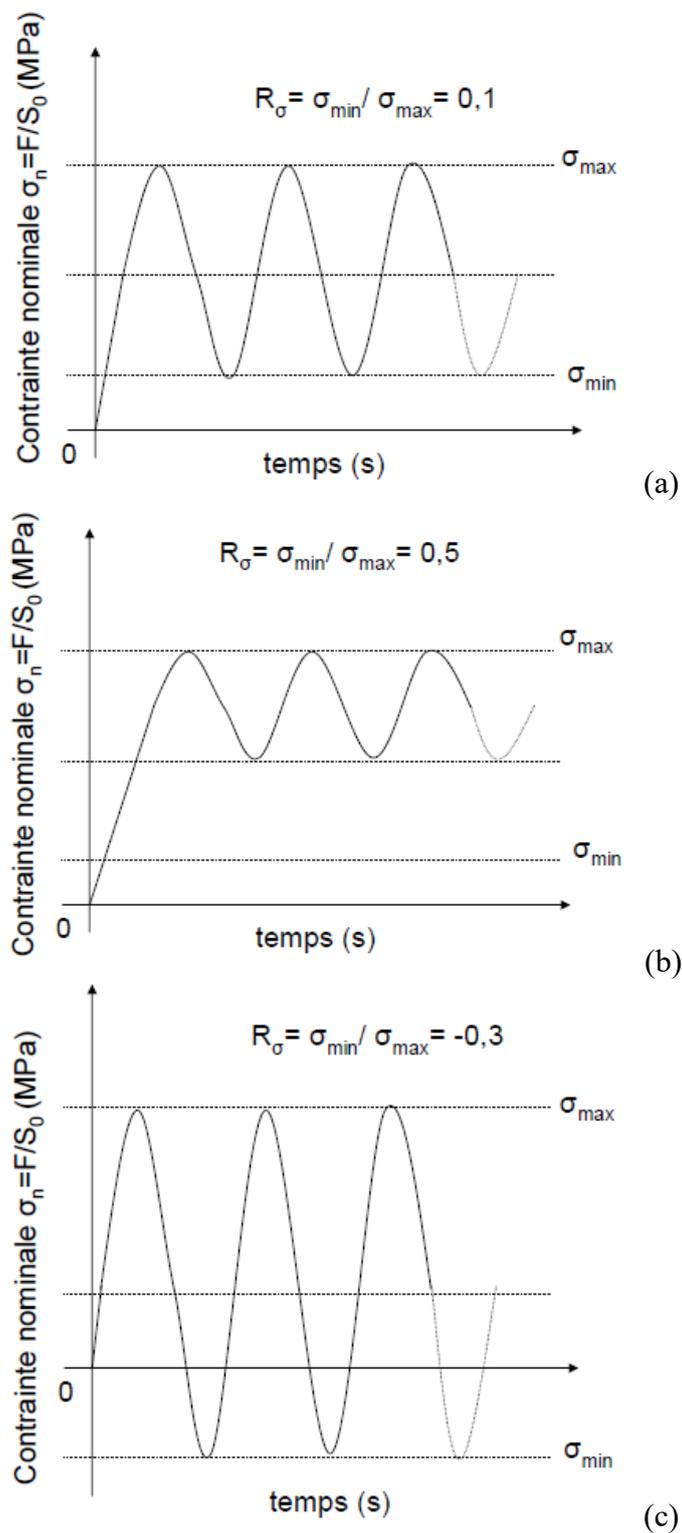


Figure 4.2 : Différents rapports de charge appliqués pour les essais de fatigue menés sur le 2198-T8 et sur le joint soudé FSW (a : rapport de charge de 0,1 – b : rapport de charge de 0,5 et c : rapport de charge de -0,3).

4.2 Étude expérimentale de fatigue sous chargement uniaxial

Les structures aéronautiques soudées par FSW sont sollicitées mécaniquement en fatigue lors de leur utilisation en service. Des effets de l'environnement s'ajoutent à ces sollicitations, en créant de l'oxydation entre les zones du joint soudé, ce qui est néfaste pour la tenue en fatigue de la structure. Ces phénomènes d'oxydation et de corrosion sont étudiés dans les travaux de Bousquet [102], Dhondt [103] ou encore de Proton [104].

Dans notre étude, le comportement mécanique du joint soudé et sa tenue en fatigue ont été étudiés à température ambiante. L'endommagement en fatigue des structures soudées est donc lié uniquement aux niveaux de contrainte auxquels elles sont soumises et au nombre de cycles réalisés. Il dépend cependant de la microstructure du matériau.

Le processus d'endommagement est souvent décomposé en trois phases qui sont l'amorçage de fissure, puis la propagation de fissure et enfin la rupture de la pièce.

Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés à la durée de vie en fatigue à l'amorçage ainsi qu'à la caractérisation de la zone où il se produit pour une structure soudée par FSW.

Les deux autres phases ne sont donc pas détaillées par la suite [105 et 106].

L'amorçage peut être causé par différents facteurs.

Premièrement, l'amorçage de fissure peut résulter du processus d'intrusion-extrusion lié au mouvement des dislocations en surface lors des essais de fatigue [107 et 108].

Deuxièmement, la présence de défauts, qui peuvent être internes à la structure soudée, tels que des inclusions, des lacunes ou des précipités, produit des concentrations de contraintes locales qui favorisent l'amorçage.

Un traitement thermique mal contrôlé du métal de base peut également modifier la taille des grains et provoquer un adoucissement ou un durcissement trop important qui peuvent impacter la tenue en fatigue.

Troisièmement, l'amorçage peut venir de défauts présents en surface de la structure, avec des concentrations de contraintes (entaille ou trou), des cordons de soudure, des impacts sur l'alliage d'aluminium ou encore un mauvais état de surface [3].

Pour réduire au maximum ces défauts, les surfaces des éprouvettes ont été reprises par usinage pour supprimer les cordons de soudure et diminuer les contraintes résiduelles présentes dans le joint. De plus, le soudage des éprouvettes a été réalisé en pleine tôle, et non entre deux tôles mises bout à bout, pour éviter l'apparition de défauts tels que le *Joint Line Remnant* (JLR) qui provient de la présence de couche d'oxyde sur les surfaces des deux tôles en contact [3].

Le principal intérêt industriel de ces travaux concerne des durées limitées en fatigue, c'est-à-dire des durées de vie en fatigue comprises entre 10^4 et 10^6 cycles. Les niveaux de chargement imposés ont été choisis afin de balayer les différentes durées de vie comprises dans cet intervalle.

4.2.1 Méthode électrique dite du potentiel

Au cours des essais, la méthode électrique dite du potentiel a été mise en place afin de localiser l'apparition de fissures et suivre leur propagation (Figure 4.4).

La première apparition de cette méthode du potentiel électrique est dans les travaux de Barnett et Troiano [74]. Elle consiste à mesurer la différence de potentiels entre deux bornes d'une pièce conductrice à laquelle est imposé un courant électrique continu ou alternatif. Cette pièce métallique est soumise à des chargements mécaniques qui vont l'endommager.

Lors de l'amorçage et la propagation de fissures, le contact entre les deux parties de l'éprouvette fissurée diminue, augmentant ainsi la résistance électrique. La variation de la résistance permet d'estimer l'apparition des fissures et de les suivre jusqu'à la rupture de la pièce.

Pour les essais multiaxiaux, cette méthode a été mise en place en utilisant un suiveur de fissures de la marque ANS Celiens (Figure 4.3). Cet appareil est fabriqué sous licence ONERA. Elle est constituée de trois voies sur lesquelles est imposé un courant de 0 à 20 A. La méthode particulière, développée à l'ONERA par Baudin [75], impose un courant continu par impulsions de fréquence 50 Hz. Cette technique permet de capter les extrémités de la tension à travers la pièce au cours du temps tout en limitant les perturbations liées au réseau électrique ou aux installations proches du suiveur de fissures.

L'amplitude du signal de mesure peut être augmentée à l'aide d'un amplificateur de signal incorporé au suiveur de fissures. Une amplification du signal de 100 à 20 000 est possible. Ce réglage du gain est réalisé avant l'essai. Il est dépendant de la taille de la pièce et de l'éloignement des prises de potentiel.

Ces prises de potentiel sont soudées sur la pièce métallique par la méthode de l'arc électrique. Ce type de soudage peut favoriser l'amorçage de fissures en fatigue. Pour éviter cela, les prises de potentiel doivent être suffisamment éloignées de la zone utile de la pièce. Cependant, plus la distance entre ces prises de potentiel est élevée et plus le signal de mesure sera faible et perturbé.



Figure 4.3 : Suiveur de fissure trois voies de ANS Celiens.

Comment considère-t-on l'amorçage d'une fissure ?

Cette méthode permet de capter, entre les prises de potentiel, l'évolution d'une tension (V) dans la pièce métallique en fonction du temps. Cette tension est très faible ($\sim 1V$) au début de l'essai mécanique, puis va croître au fur et à mesure de l'amorçage et de la propagation de fissures. On considérera qu'une évolution de la tension moyenne de l'ordre de 0,01V est synonyme d'amorçage de fissures. La taille des sites d'amorçage est fixée à quelques centaines de μm .

Une caméra optique placée perpendiculairement à l'éprouvette et couplée à la méthode du potentiel a permis d'enregistrer des images de l'amorçage de fissures jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Ainsi, la prise d'images se fait au fur et à mesure de l'apparition et de la propagation de fissures, évitant d'enregistrer un trop grand nombre d'images au cours de l'essai de fatigue.

L'utilisation de la méthode du potentiel permet également d'arrêter proprement l'essai lorsque se produit la rupture de l'éprouvette, c'est-à-dire lorsqu'un seuil de tension est atteint, et de conserver l'éprouvette en place.

La disposition des prises de potentiel est présentée sur les figures 4.4 et 4.5. Le suiveur de fissure possède trois sorties, ainsi trois couples de prises de potentiel ont été mis en place, face à face, de chaque côté du joint soudé. Pour un même couple, les prises sont espacées de 60 mm et sont centrées par rapport au joint soudé. Les couples sont espacés d'environ 60 mm le long du joint pour couvrir toute la zone utile de l'éprouvette cruciforme.

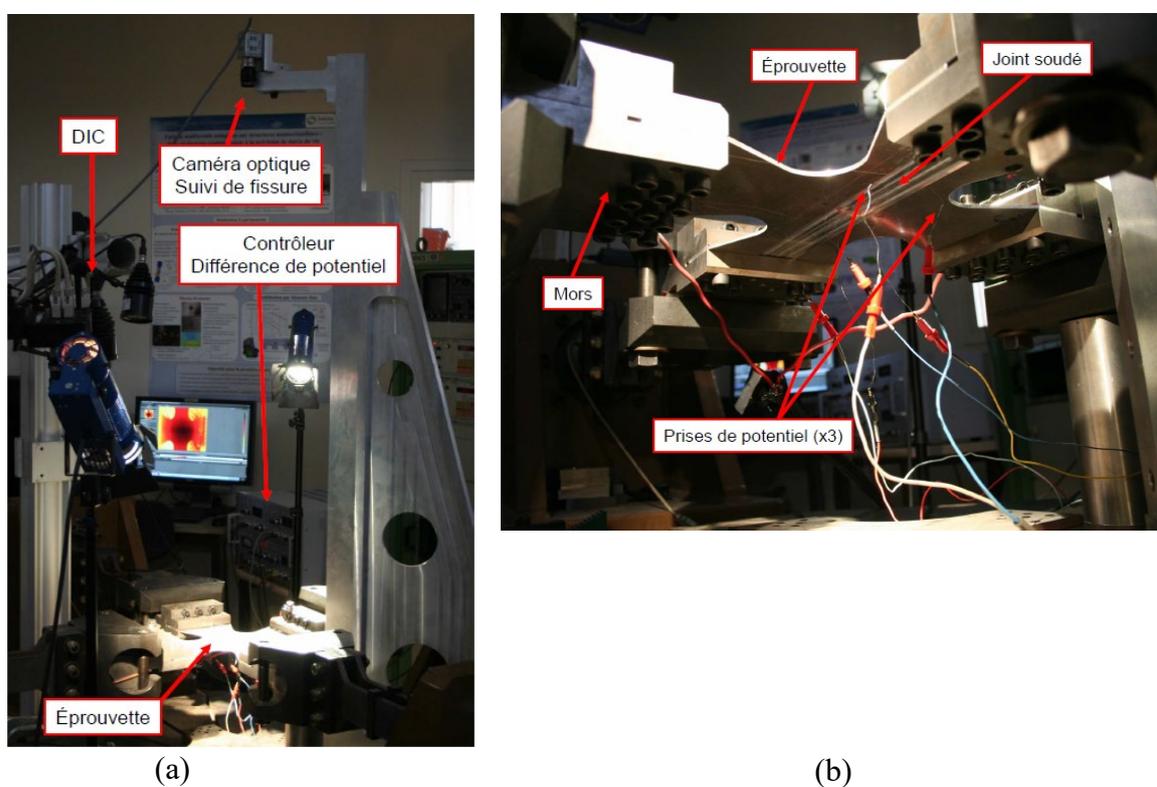


Figure 4.4 : Disposition des prises de potentiels et des caméras par rapport à l'éprouvette cruciforme (a : instrumentations en place et b : prises de potentiel installées sous l'éprouvette cruciforme).

Enfin deux caméras, également placées perpendiculairement, ont été utilisées pour réaliser la corrélation d'images numériques (Figure 4.4 a). Cette technique utilisée dans de nombreux travaux [73, 76] permet d'obtenir les champs de déformations sur la surface de l'éprouvette.

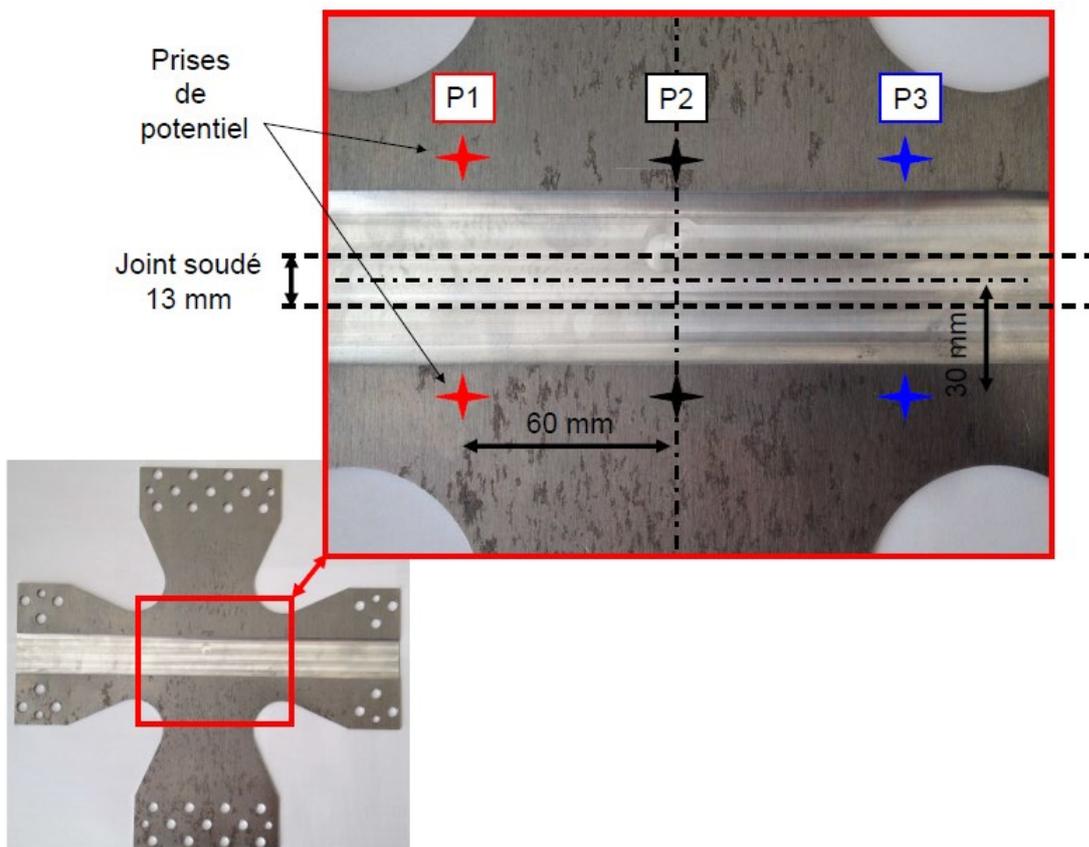


Figure 4.5 : Disposition des prises de potentiels, par rapport au joint soudé, sur une éprouvette cruciforme.

4.2.2 Essais de fatigue uniaxiale sur le métal de base

L'étude du comportement mécanique du joint soudé n'a pas permis d'étudier le comportement du métal de base puisque les déformations étaient localisées au centre de l'éprouvette. Une étude en parallèle a dû être réalisée pour comprendre le comportement mécanique du métal de base. Le cas des essais de fatigue est identique, le métal de base doit être soumis à des chargements cycliques séparément du joint soudé. Cela permet également de comparer les comportements en fatigue de structures soudées ou non soudées.

Les conditions expérimentales et les durées de vie mesurées pour des essais en fatigue uniaxiale sur le métal de base, sont rappelées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Résultats expérimentaux en fatigue pour le métal de base 2198-T8.

Numéro d'essai	Direction de laminage (sens de chargement)	R_σ global	$\Delta\sigma/2 = (\sigma_{\max}-\sigma_{\min})/2$ [MPa]	Durée de vie à amorçage
14	L	0,1	135	181428
17	T	0,1	162,5	80200
18	T	0,1	187,65	44429
20	L	0,1	175	77918
21	D	0,1	175	54547
22	D	0,1	135	635610
23	D	0,1	187,65	21266
24	L	0,1	187,65	57963
46	T	-0,3	200	70447
48	T	-0,3	162,5	390079
50	T	0,5	100	218666
51	T	0,5	115	183301
53	L	0,5	125	205186
55	L	0,5	130	64371
57	L	0,5	115	157292
58	L	0,5	132,5	59486

À partir de ces résultats, il est possible de tracer les courbes de Wöhler correspondant au métal de base pour différents rapports de charge (Figure 4.6).

Aucun effet du laminage n'est visible sur le comportement du métal de base en fatigue, comme a pu le montrer Le Jolu (Figure 1.13). Les points expérimentaux de la figure ci-dessous sont donc rassemblés selon le rapport de charge appliqué.

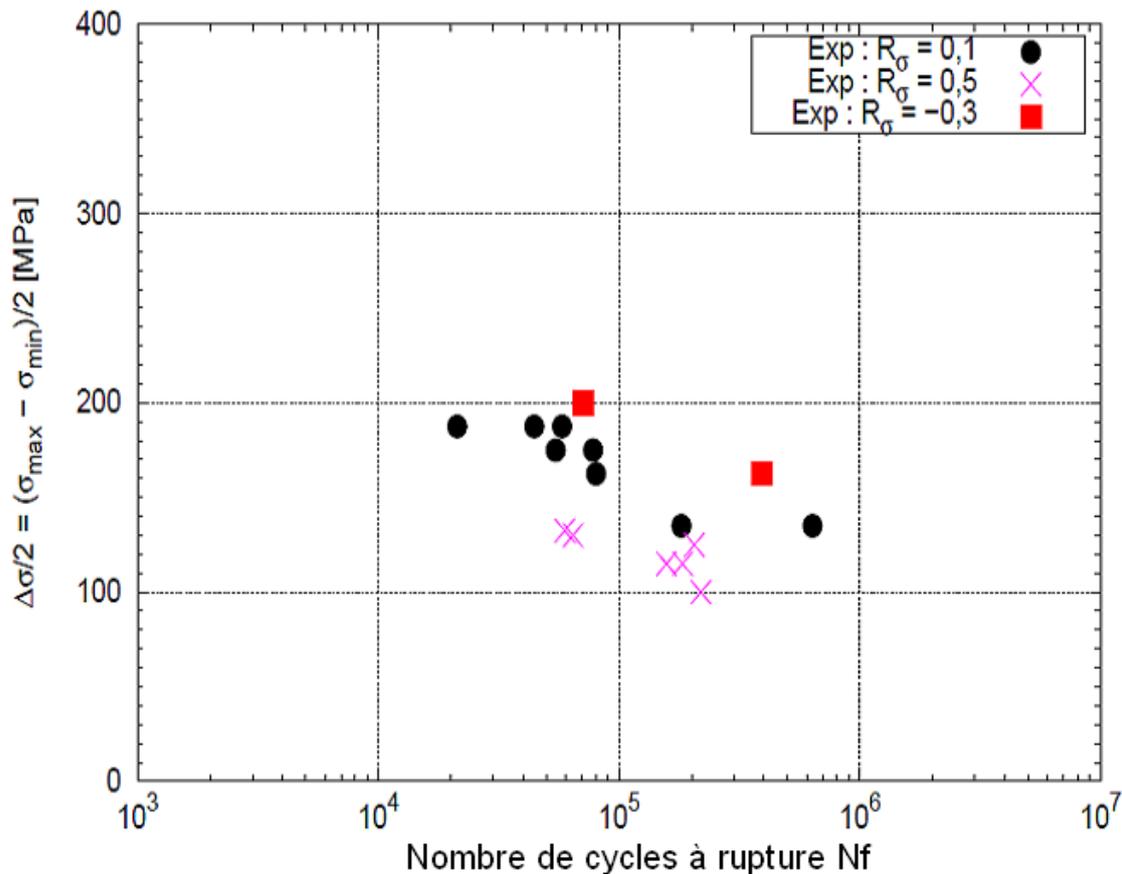


Figure 4.6 : Comparaison des courbes de Wöhler pour le métal de base (2198-T8) sollicité dans les directions L, T et D avec des rapports de charge de 0,1 ; 0,5 et -0,3.

Les durées de vie du métal de base sont comprises entre 10^4 et 10^6 cycles et les amplitudes de contrainte entre 200 et 400 MPa.

Pour une durée de vie de 10^5 cycles, l'amplitude de contrainte est de 300 MPa (Figure 1.13) lorsque le métal de base est sollicité avec un rapport de charge de 0,1. Cette amplitude augmente jusqu'à environ 380 MPa pour un rapport de charge de -0,3.

Cette amplitude correspond à une contrainte maximale d'environ 540 MPa, qui est largement supérieure à la limite élastique du métal de base. À ce niveau de contrainte, le métal subit une déformation plus grande que la valeur de 6% qui est appliquée lors des essais de traction (Figure 2.13).

L'amplitude de contrainte diminue approximativement à 250 MPa pour un rapport de charge de 0,5, ce qui correspond à une déformation d'environ 6%.

Ces résultats confirment que pour des durées de vie importantes, le matériau supporte de fortes déformations [20].

La forme géométrique des ruptures a été observée pour différents essais (Figure 4.7). Seule une différence entre la direction D et les directions T et L est observée. En effet, pour les directions L et T, et pour différents rapports de charge, l'amorçage de fissure se crée à partir d'un bord ou d'une arête de l'éprouvette. La fissuration est droite sur quelques millimètres, puis le reste de l'éprouvette se déchire très rapidement jusqu'à la rupture totale. Pour les essais réalisés sur des tôles avec une direction de laminage à 45° (direction D) par rapport à l'axe de chargement, la rupture des éprouvettes se fait avec un angle d'environ 30° .

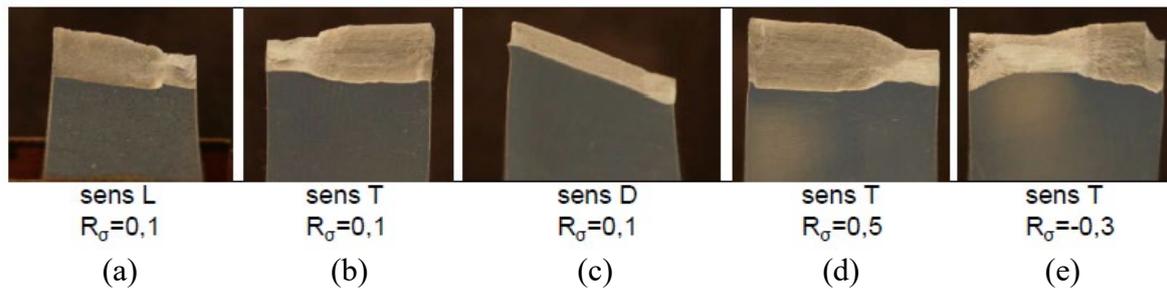


Figure 4.7 : Faciès de rupture macroscopiques observés sur le métal de base pour des sollicitations en direction L à $R_\sigma = 0,1$ (a), en direction T à $R_\sigma = 0,1$ (b) et en direction D à $R_\sigma = 0,1$ (c) ; les ruptures sont observées en direction T à $R_\sigma = 0,5$ (d) et à $R_\sigma = -0,3$ (e).

4.2.3 Essais de fatigue uniaxiaux sur le joint soudé par FSW

Le joint soudé a ensuite été sollicité à différents niveaux de chargement, et différents rapports de charge (0,1 ; 0,5 et -0,3) comme pour le métal de base. Le joint soudé a été testé selon les directions L, T et D. Le tableau 4.2 regroupe les conditions expérimentales et les durées de vie en fatigue mesurées.

Les résultats obtenus sont reportés sur une courbe de Wöhler (Figure 4.8).

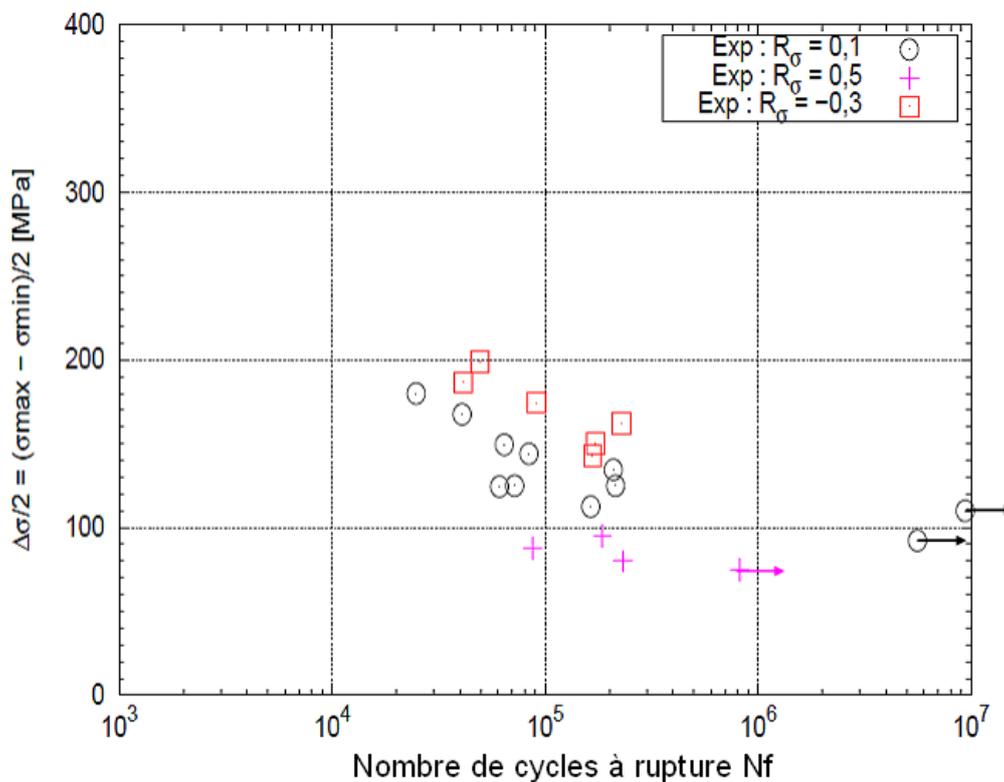


Figure 4.8 : Comparaison des courbes de Wöhler pour le joint soudé FSW (2198-T8) sollicité dans les directions L, T et D avec des rapports de charge de 0,1 ; 0,5 et -0,3.

Tableau 4.2 : Résultats expérimentaux en fatigue pour le joint soudé en 2198-T8.

Numéro d'essai	Direction de laminage (sens de chargement)	R_σ global	$\Delta\sigma/2 = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ [MPa]	Durée de vie à amorçage
13	L	0,1	112,5	163743
16	L	0,1	150	64306
25	T	0,1	167,5	40727
26	T	0,1	144,5	83928
28	L	0,1	180	24791
30	L	0,1	125	61051
32	D	0,1	125	71936
33	T	0,1	110	>9374450
52	L	0,1	135	209103
56	L	0,1	125	213858
34	L	0,5	75	822003
36	L	0,5	87,5	87192
37	T	0,5	95	186324
39	T	0,5	80	231730
40	T	-0,3	200	49103
41	L	-0,3	187,5	41264
42	T	-0,3	162,5	227613
43	T	-0,3	150	173174
44	L	-0,3	175	91104
45	L	-0,3	142,5	166702

Les courbes de Wöhler de la figure 4.8 comparent les durées de vie du joint soudé pour différents rapports de charge et pour les trois directions de laminage L, T et D. Les essais réalisés ne permettent pas de distinguer de différences entre les directions de laminage L, T et D comme a pu le constater Cavaliere dans ses travaux [18]. Les essais sont regroupés, comme pour le métal de base, selon le rapport de charge imposé globalement.

La réalisation des essais à différents rapports de charge permet de comparer les amplitudes de contrainte à durée de vie égale. Pour une durée de vie en fatigue de 10^5 cycles, l'amplitude de contrainte appliquée à la structure soudée est d'environ 340 MPa pour un rapport de charge de -0,3 tandis que l'amplitude de contrainte subie par le métal de base est de 380 MPa, soit une diminution de 10%. L'amplitude est de 260 MPa pour un rapport de charge de 0,1 sur le joint soudé et de 300 MPa pour le métal de base, soit une diminution de 13%. Enfin, l'amplitude de contrainte subie par le joint soudé pour un rapport de charge de 0,5 est d'environ 180 MPa et est d'environ 250 MPa pour le métal de base, soit une diminution de 28%.

Ces résultats montrent que, pour une durée de vie de 10^5 cycles, l'augmentation du rapport de charge va accroître l'écart de comportement mécanique entre une structure soudée et une

structure composée uniquement du métal de base. Bien qu'il y ait une importante chute de dureté entre le métal de base et le joint soudé, leurs comportements en fatigue restent très semblables pour des rapports de charge de $-0,3$ et $0,1$. En augmentant ce rapport de charge à $0,5$, on constate que la structure soudée est moins résistante que le métal de base.

Les faciès de rupture des éprouvettes avec un joint soudé ont été observés au microscope optique. Trois exemples sont donnés sur la Figure 4.9. Pour chacun des essais, la distance entre la zone de rupture et le centre du joint soudé a été mesurée optiquement. La première constatation est qu'il n'y pas suffisamment d'essais expérimentaux pour observer une tendance dans les zones d'amorçages. Les fissures peuvent apparaître dans n'importe quelles zones selon les amplitudes de contraintes imposées. La même observation est faite dans les travaux de Le Jolu [3].

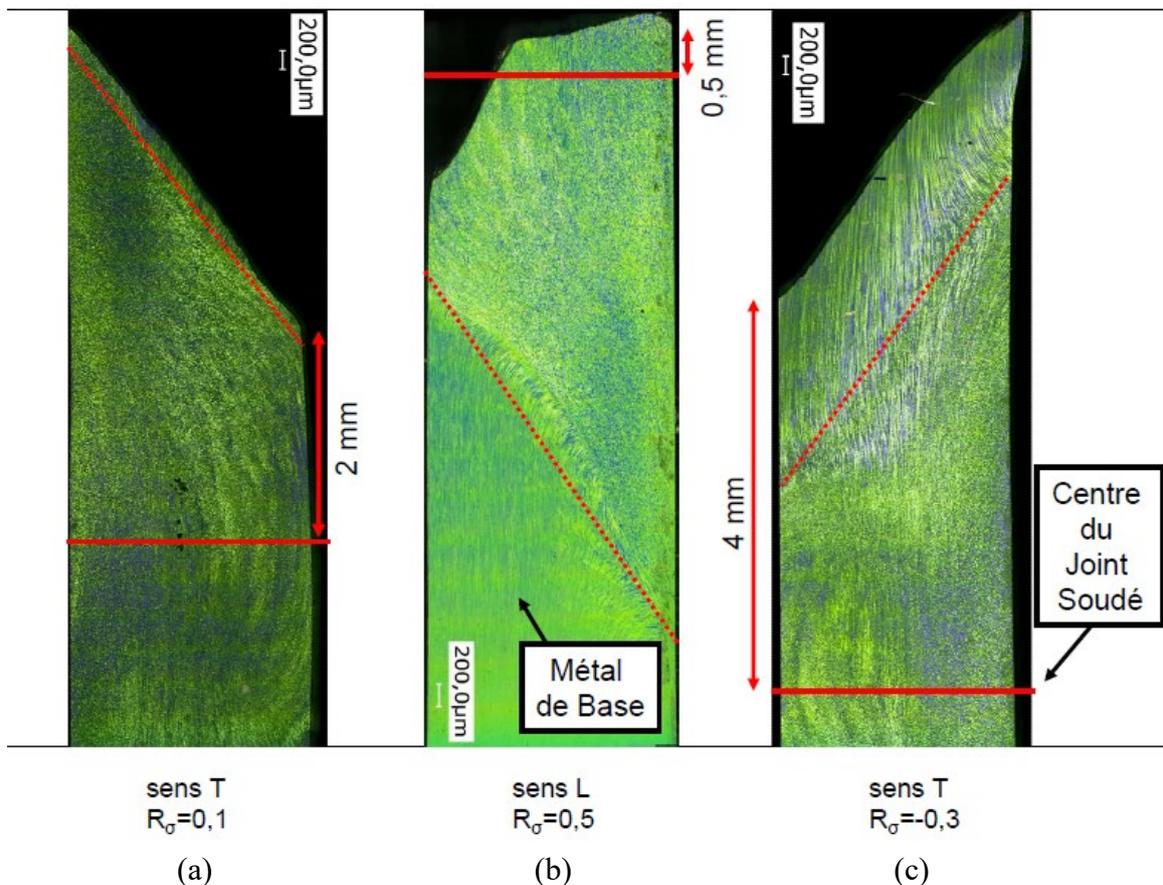


Figure 4.9 : Faciès de rupture macroscopiques observés sur le joint soudé pour différentes directions de traction et différents rapports de charge (a : rapport de charge de $0,1$ – b : rapport de charge de $0,5$ et c : rapport de charge de $-0,3$).

L'amorçage des fissures a été observée au MEB afin d'essayer de comprendre si la microstructure et la morphologie du joint ont un rôle important (Figure 4.10). Les résultats montrent que l'on ne peut pas conclure sur la nature de l'amorçage de fissure en fatigue. L'état de surface de l'éprouvette, bien que reprise par fraisage jusqu'à une tolérance de rugosité de $0,2 \mu\text{m}$, reste la principale cause pour l'amorçage [3].

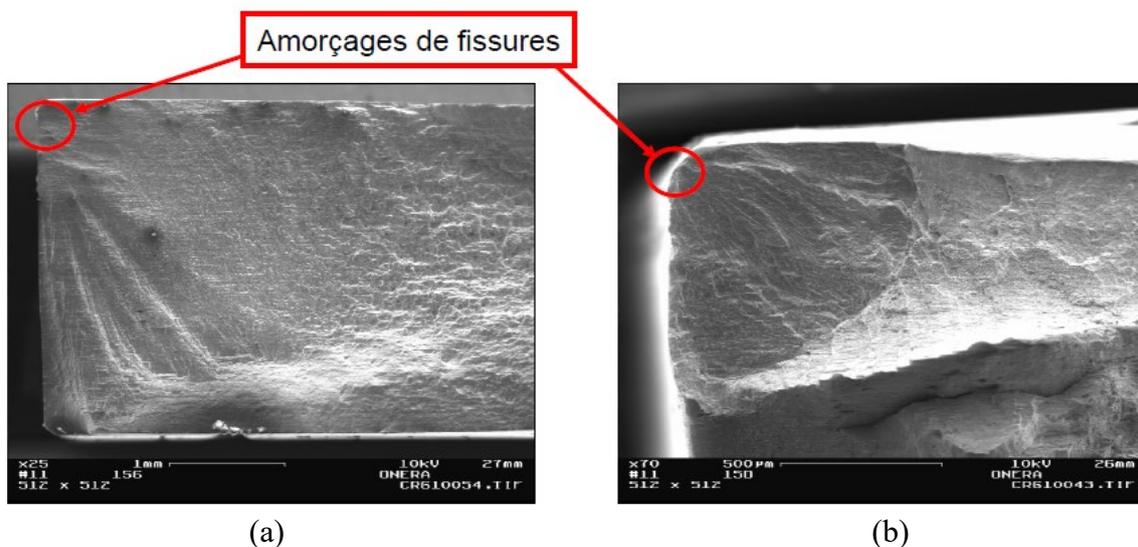


Figure 4.10 : Exemples de faciès de rupture de joint soudé observés au MEB pour deux essais en fatigue (a : essai n°13 et b : essai n°40).

Avant la modélisation de l'endommagement du joint soudé, quelques questions se posent. Tout d'abord, est-il nécessaire d'identifier les paramètres mécaniques d'un modèle d'endommagement pour chacune des zones du joint soudé comme pour le comportement mécanique ? Doit-on considérer le métal de base et le joint soudé ou est-il possible de différencier le comportement en fatigue des différentes zones du joint avec la méthode macroscopique utilisée dans cette étude, c'est-à-dire d'étudier une structure soudée dans son ensemble et non pas en découpant les zones les unes des autres ?

Ensuite, est-ce que le rapport de contraintes appliqué globalement au joint soudé est le même localement dans chacune des zones ? Serait-il possible que localement, certaines zones soient soumises à des rapports plus dangereux pour la structure ?

Enfin, il est nécessaire de s'intéresser aux amplitudes de contraintes et aux contraintes moyennes locales à travers le joint soudé.

Dans le but de répondre à ces questions et d'obtenir plus d'informations sur les contraintes locales subies par le joint soudé, l'ensemble des essais en fatigue sur le joint soudé ont été simulés à l'aide du modèle de comportement mécanique précédemment identifié.

En effet, les essais de fatigue réalisés ne permettent pas de mesurer les niveaux de contrainte sur les surfaces de l'éprouvette. L'utilisation des calculs de structure par éléments finis donne accès à ces informations dans la limite de la précision du modèle de comportement mécanique.

L'observation des zones d'amorçage expérimentales est effectuée pour les différentes éprouvettes. Elle déterminera les points sur lesquels les niveaux de contraintes et de déformations seront extraits des simulations numériques.

Le tableau 4.3 récapitule les niveaux de contraintes imposés globalement, les durées de vie en fatigue mesurées ainsi que les distances d'amorçages des fissures par rapport au centre de l'éprouvette.

Tableau 4.3 : Données expérimentales des essais de fatigue uniaxiaux sur le joint soudé.

N° essai	Durée de vie	Distance d'amorçage par rapport au centre (mm)	Zone d'amorçage	Contrainte nominale max imposée (MPa)	Contrainte nominale min imposée (MPa)	Amplitude de contrainte (MPa)	Rapport de Charge global
13	163743	10	ZAT2	250	25	112,5	0,1
16	64306	10	ZAT2	333	33,3	150	0,1
25	40727	1	Noyau Soudé	372	37,2	167,5	0,1
26	83928	7	ZAT1	321	32,1	144,5	0,1
28	24791	6,5	ZATM2	400	40	180	0,1
30	61051	5	ZATM2	278	27,8	125	0,1
32	71936	6	ZATM2	278	27,8	125	0,1
33	>9374450	-	-	244	24,4	110	0,1
52	209103	4	ZATM1	300	30	135	0,1
56	213858	0	Noyau Soudé	278	27,8	125	0,1
34	822003	-	-	300	150	75	0,5
36	87192	4	ZATM1	350	175	87,5	0,5
37	186324	6	ZATM2	380	190	95	0,5
39	231730	0	Noyau Soudé	320	160	80	0,5
40	49103	2	Noyau Soudé	308	-92	200	-0,3
41	41264	2,5	Noyau Soudé	288	-87	187,5	-0,3
42	227613	3	ZATM1	250	-75	162,5	-0,3
43	173174	0,5	Noyau Soudé	231	-69	150	-0,3
44	91104	4,5	ZATM1	269	-81	175	-0,3
45	166702	2	Noyau Soudé	219	-66	142,5	-0,3

4.3 Simulation du comportement local pour un joint soudé sous chargement uniaxial

Les calculs sont effectués en utilisant un critère isotrope, et le même maillage que pour la définition du comportement. Les conditions du calcul ont déjà été données au paragraphe 3.3.

Au vu des grands nombres de cycles réalisés expérimentalement, il est très coûteux en temps de calcul de simuler entièrement ces essais pour obtenir les niveaux des contraintes locales.

Différents nombres de cycles en fatigue ont été testés pour observer les variations de contrainte et de déformation dans le joint. L'exemple d'un essai de fatigue simulé durant 1000 cycles est proposé. La figure 4.11 montre la forme des boucles « contrainte-déformation » (σ_{yy} - ε_{yy}) dans la zone d'amorçage expérimentale. Seuls les cycles 1, 10, 100 et 1000 sont présentés.

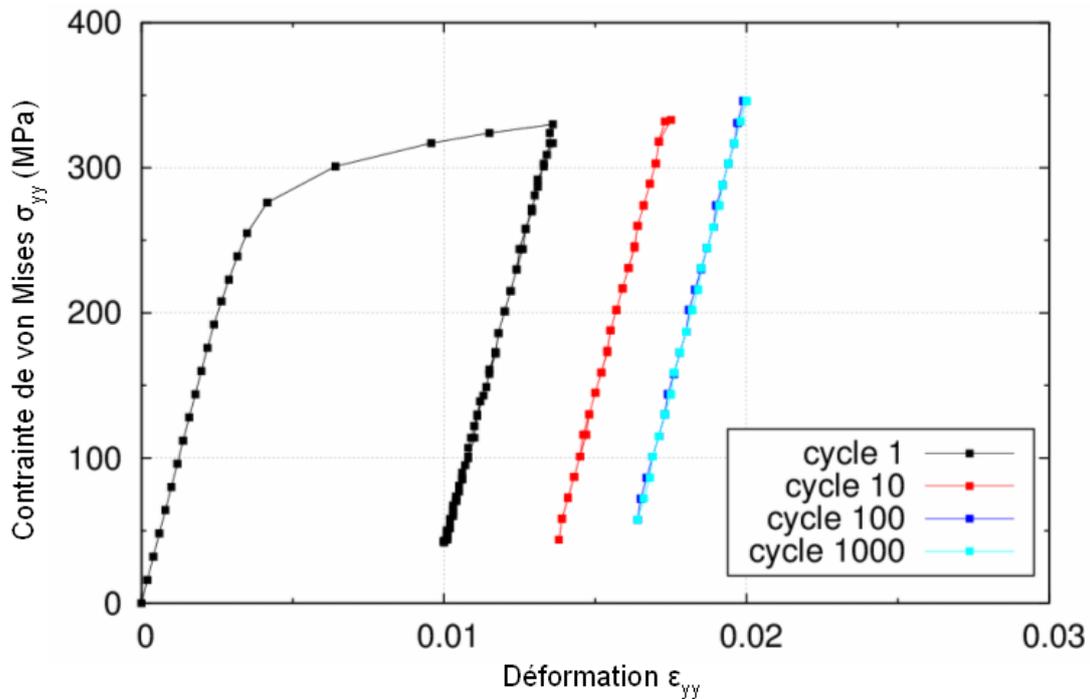


Figure 4.11 : Évolution de la déformation locale, selon l'axe du chargement, en fonction de la contrainte équivalente de von Mises locale – Courbe prélevée au nœud du maillage correspondant à la zone d'amorçage de la fissure.

L'essai utilisé en exemple (essai n°13) est réalisé avec un rapport de charge de 0,1. La zone d'amorçage se situe en ZAT2. On remarque que les boucles d'hystérésis restent fermées, l'amplitude de déformation plastique est négligeable. L'amplitude de contrainte évolue légèrement avec le temps. Ainsi pour cet essai réalisé avec un rapport de charge global de 0,1, le rapport de charge calculé localement est de 0,16 au cycle stabilisé. Les valeurs obtenues pour les différents cycles sont regroupées dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Résultats de simulation d'un essai en fatigue uniaxiale sur le joint soudé sollicité jusqu'à 1000 cycles.

Cycle	Amplitude de contrainte $\Delta\sigma_{Mises}$ (MPa)	Contrainte moyenne $\sigma_m Mises$ (MPa)
1	144	186
10	144	188
100	144	200
1000	144	200

La principale conclusion de ces tests est que la simulation d'un seul cycle en fatigue n'est pas suffisante pour connaître les niveaux de contrainte stabilisés localement dans le joint soudé.

On remarque que le millième cycle est identique au centième cycle. On en déduit que la simulation du comportement mécanique du joint sur 100 cycles semble être adapté pour réaliser un calcul d'endommagement en post-traitement.

À présent, le but recherché est d'obtenir les niveaux de contraintes localement dans la zone d'amorçage de fissure afin de retrouver les rapports de charge locaux. La simulation des essais en fatigue permet de mesurer les niveaux des contraintes dans la direction du chargement.

Le tableau 4.5 regroupe l'ensemble des résultats obtenus. La dernière colonne du tableau rappelle le rapport de charge au loin imposé au joint soudé lors des essais expérimentaux. On constate pour des rapports de 0,5 et de -0,3 que les rapports de charge calculés localement sont semblables aux rapports globaux imposés expérimentalement au joint soudé. Certains essais, comme les essais n°40, n°41 ou n°44, subissent tout de même des rapports proches de -0,2 qui jouent un rôle important sur la durée de vie en fatigue de la structure soudée. Enfin, pour les essais avec un rapport de charge global de 0,1, on remarque des niveaux de contraintes et des rapports de charge localement qui sont beaucoup plus dangereux pour la tenue en fatigue du joint soudé que ceux qui sont imposés initialement sur la structure.

Tableau 4.5 : Données extraites de la simulation des essais de fatigue uniaxiaux.

N° essai	Zone d'amorçage observée	Contrainte locale max (MPa)	Contrainte locale min (MPa)	Amplitude de contrainte (MPa)	Rapport de Charge local	Rapport De Charge global
13	ZAT2	254	30	112	0,12	0,1
16	ZAT2	456	157	149,5	0,34	0,1
26	ZAT1	361	73	144	0,20	0,1
30	ZATM2	314	65	124,5	0,21	0,1
32	ZATM2	330	80	125	0,24	0,1
52	ZATM1	330	60	135	0,18	0,1
56	Noyau Soudé	331	80	125,5	0,24	0,1
36	ZATM1	359	184	87,5	0,51	0,5
37	ZATM2	403	214	94,5	0,53	0,5
39	Noyau Soudé	334	174	80	0,52	0,5
40	Noyau Soudé	333	-68	200,5	-0,20	-0,3
41	Noyau Soudé	311	-65	188	-0,21	-0,3
42	ZATM1	252	-74	163	-0,29	-0,3
43	Noyau Soudé	232	-68	150	-0,29	-0,3
44	ZATM1	289	-62	175,5	-0,21	-0,3
45	Noyau Soudé	220	-65	142,5	-0,30	-0,3

Les figures 4.12, 4.13 et 4.14 regroupent respectivement pour les rapports de charge « globaux » 0,1, 0,5 et -0,3, les résultats expérimentaux concernant la localisation d'amorçage de fissure et la durée de vie, ainsi que les contraintes maximales et les rapports de charge simulés au niveau de la zone d'amorçage, dont on déduit le rapport de charge local.

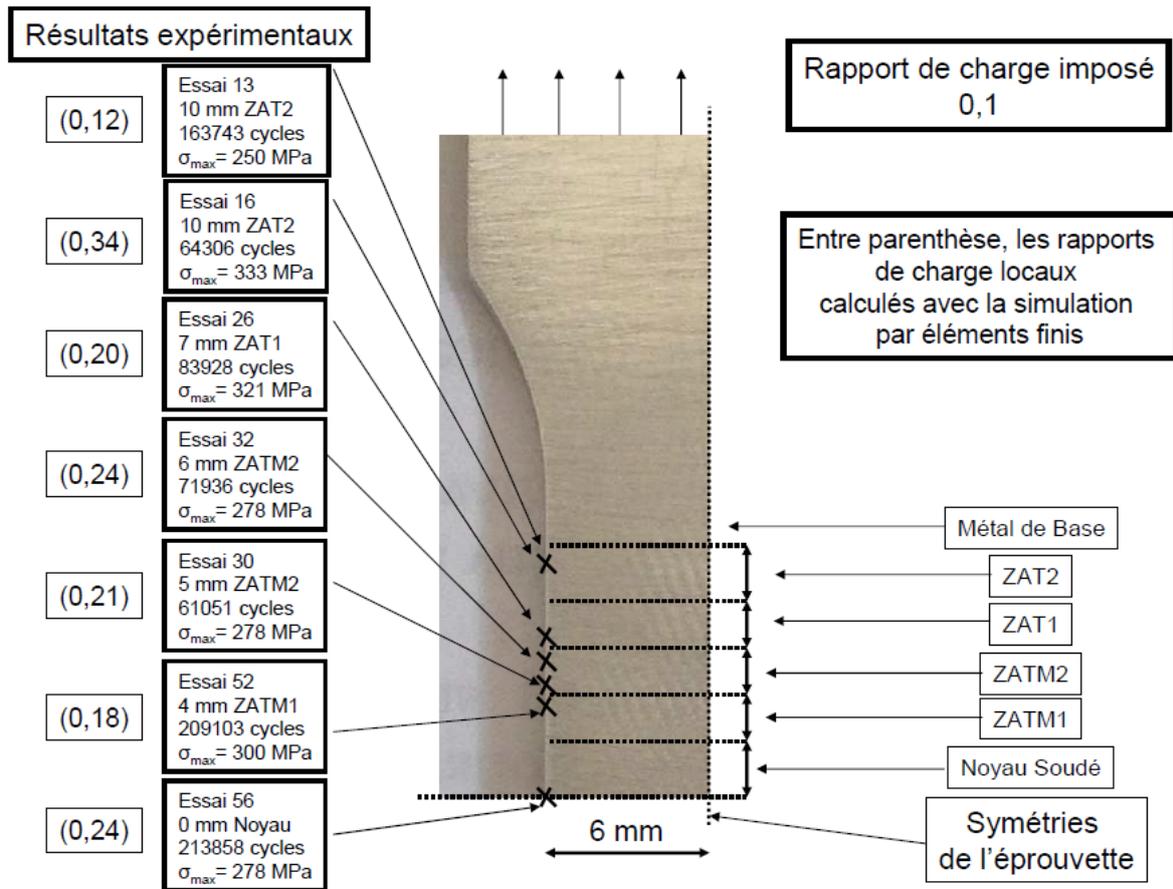


Figure 4.12 : Représentation des zones d'amorçage de fissures expérimentales pour différents essais de fatigue à rapport de charge imposé de 0,1.

Résultats expérimentaux

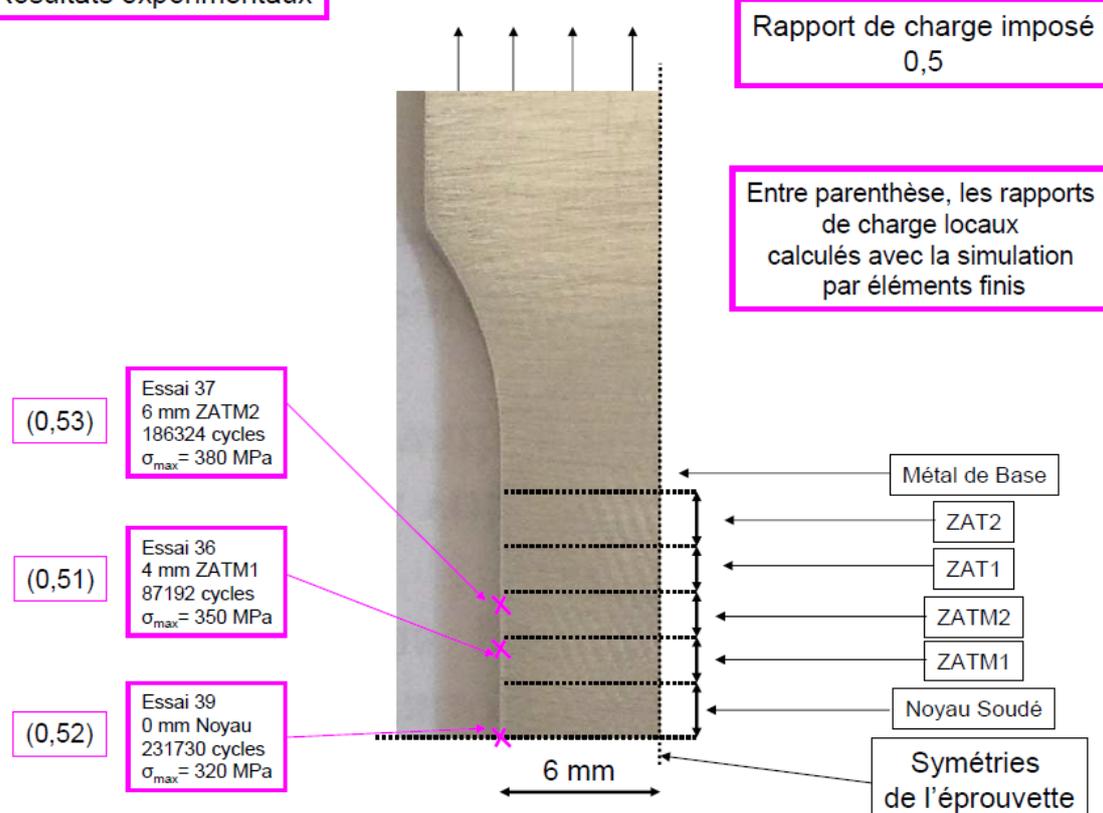


Figure 4.13 : Représentation des zones d'amorçage de fissures expérimentales pour différents essais de fatigue à rapport de charge imposé de 0,5.

La différence entre rapport de charge global et local sera négligée dans un premier temps lors de notre première estimation de durée de vie (paragraphe 4.5.2). Le résultat obtenu n'étant pas satisfaisant, on utilisera donc les données de la figure 4.12 à 4.14 pour l'estimation finale (paragraphe 4.5.3).

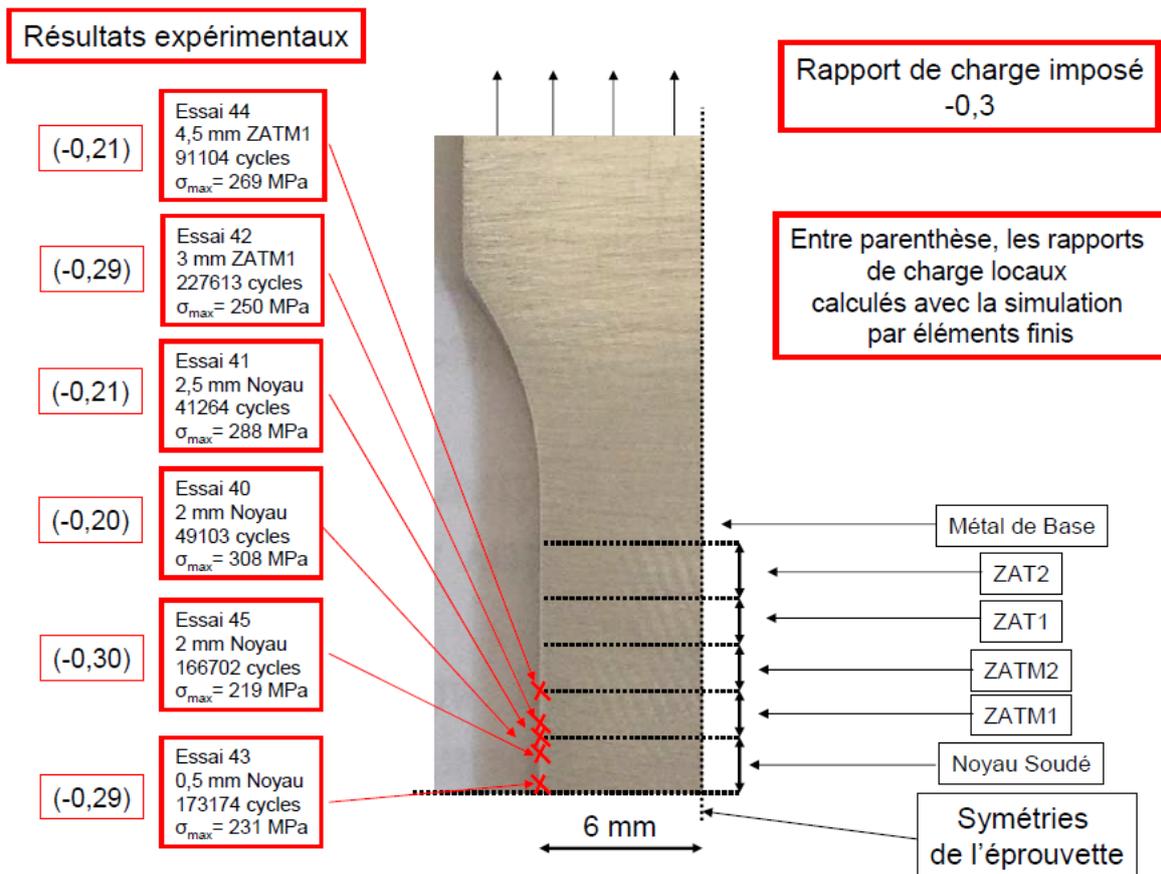


Figure 4.14 : Représentation des zones d'amorçage de fissures expérimentales pour différents essais de fatigue à rapport de charge imposé de -0,3.

4.4 Étude expérimentale de fatigue sous chargement multiaxial

Avant d'en venir à la partie simulation en fatigue, les résultats obtenus sur les essais expérimentaux sous chargements multiaxiaux sont présentés. Dans le but de réduire la durée des essais, les vitesses de pilotage en force varient pour obtenir une fréquence de cycle d'environ 0,39 Hz.

Les conditions expérimentales des essais biaxiaux n°4, n°6 et n°7 réalisés en fatigue sont présentées dans le chapitre 1. Les durées de vie en fatigue sont indiquées dans le tableau 4.6 ci-dessous.

Tableau 4.6 : Résultats expérimentaux en fatigue biaxiale pour le joint soudé en 2198-T8.

Numéro d'essai	Direction de laminage (direction de soudure)	Durée de vie à l'amorçage
4	L	59437
6	T	161420
7	T	83505

Au cours des essais, le couplage entre la caméra optique et le suiveur de fissures a permis de ne prendre des photos qu'aux temps souhaités. La réalisation d'un essai en fatigue peut être très longue (plusieurs jours) et il n'est pas envisageable de stocker des photos pendant toute la durée de l'essai. De plus, pour apercevoir l'amorçage d'une fissure et suivre son évolution, il est nécessaire de prendre des photos rapidement. La caméra mise en place a permis de prendre jusqu'à 10 images par seconde au cours de ces essais.

L'observation des photos post-essai permet de localiser la zone d'amorçage de la fissure sur l'éprouvette. Cependant, il est difficile à l'œil de voir apparaître un amorçage plus petit que 2mm. Cela est dû à la qualité de l'image et à la présence du mouchetis sur la surface de l'éprouvette. De plus, l'amorçage peut se produire sur la surface observée, mais aussi sur la face opposée de l'éprouvette.

La figure 4.15 est un exemple qui permet de visualiser l'amorçage de fissure (essai n°7). L'image de gauche, montre l'apparition du premier défaut sur la surface de l'éprouvette visible à l'œil. Et sur l'image de droite, il s'agit de la dernière photo prise lors de la rupture de l'éprouvette.

L'heure à laquelle est prise la photo permet de déterminer le nombre de cycles réalisés.

La fréquence imposée au cours de ces essais est de 0,39 Hz, cela permet de déterminer le nombre de cycles réalisés jusqu'à l'apparition d'un défaut visible à l'œil.

Le nombre de cycles est de 82869 lors du premier défaut et de 83505 lors de la ruine de l'éprouvette.

La méthode du potentiel électrique aide à déclencher la prise d'images par la caméra optique mais elle permet aussi de capter l'évolution de la tension de sortie en fonction du temps. On observe cette évolution, lors de l'essai n°7, pour le couple central de prises de potentiel P2 (Figure 4.5) sur la figure 4.16. La fissure apparaissant au centre de l'éprouvette cruciforme, ce couple de prises de potentiel a réagi avant les deux autres P1 et P3.

La tension moyenne mesurée connaît une forte augmentation à partir du temps 211072 s. Cet instant correspond à la détection de l'amorçage de fissure par le suiveur de fissure. Le nombre de cycles, à ce temps donné, est de 82842 et est plus précis que celui qui est déduit de l'analyse de l'image optique. Une meilleure précision de la tension calculée en sortie permettrait d'améliorer encore l'estimation du nombre de cycles lors de l'apparition d'une fissure.

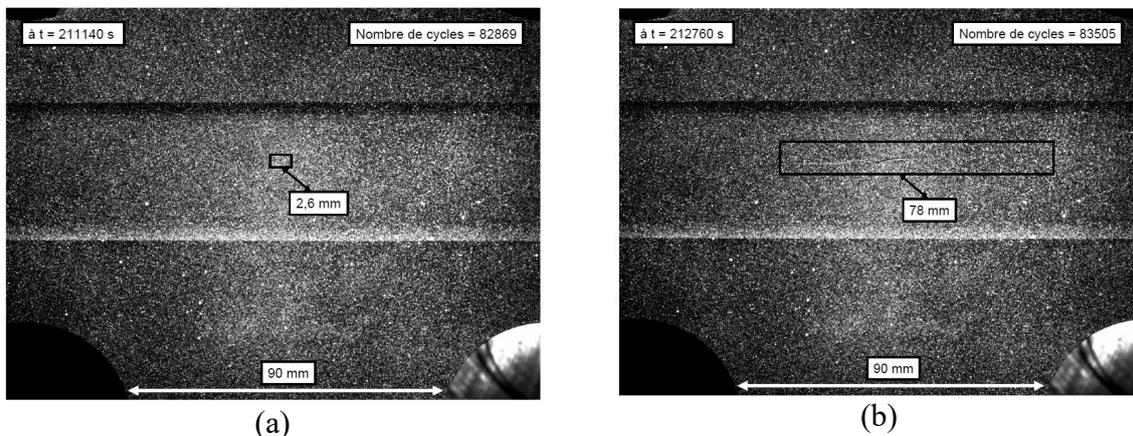


Figure 4.15: Prise d'images par caméra optique au cours de l'essai multiaxial n°7, apparition d'un défaut sur l'éprouvette (a) et rupture de l'éprouvette (b).

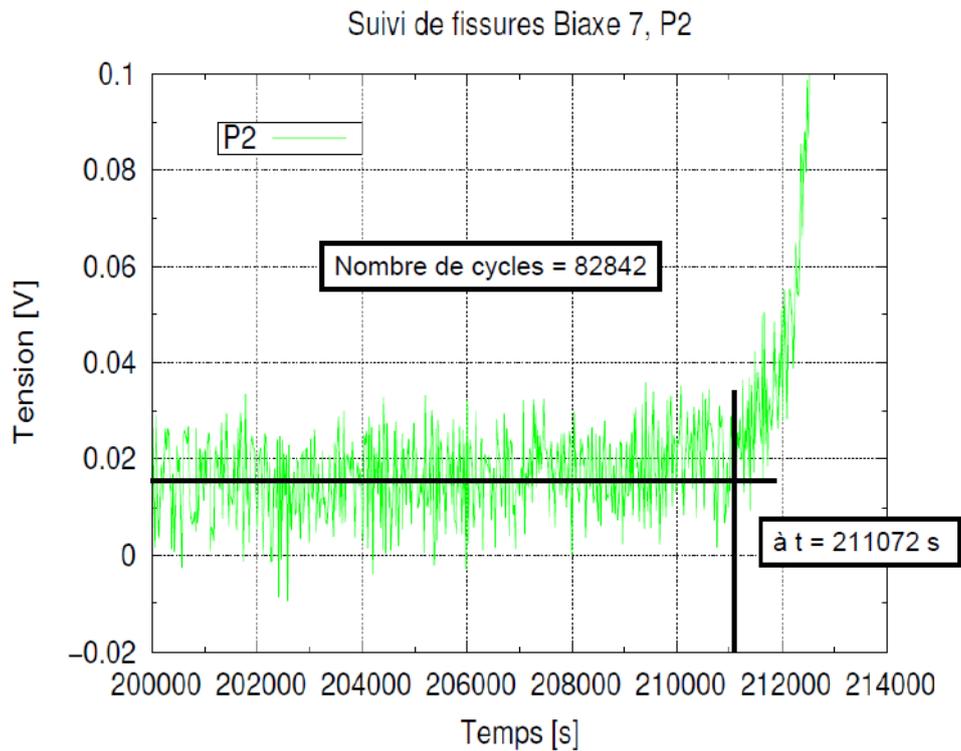


Figure 4.16 : Méthode du potentiel, évolution de la tension de sortie P2 au cours du temps.

Les durées de vie à l’amorçage de fissures, obtenues par la méthode du potentiel pour chaque essai sont rassemblées dans le tableau 4.7.

La courbe de la figure 4.16 montre que l’essentiel du temps de vie de la structure se situe avant l’apparition d’une fissure. Lorsqu’un défaut apparaît, la rupture de l’éprouvette survient très rapidement.

Tableau 4.7 : Durées de vie à l’amorçage et à rupture des essais biaxiaux.

Numéro d’essai	Sens de laminage (sens de soudure)	Durée de vie à l’amorçage (DVA)	Durée de vie à rupture (DVR)	Rapport DVA / DVR
4	L	55665±100	59437	0,94
6	T	152552±100	161420	0,94
7	T	82818±100	83505	0,99

Finalement, les positions des zones d’amorçages, repérées optiquement, sont représentées sur la surface de l’éprouvette par des losanges (Figure 4.17).

Les zones du joint soudé où apparaissent les fissures varient selon le sens de laminage des tôles et selon le type et les niveaux de chargements imposés.

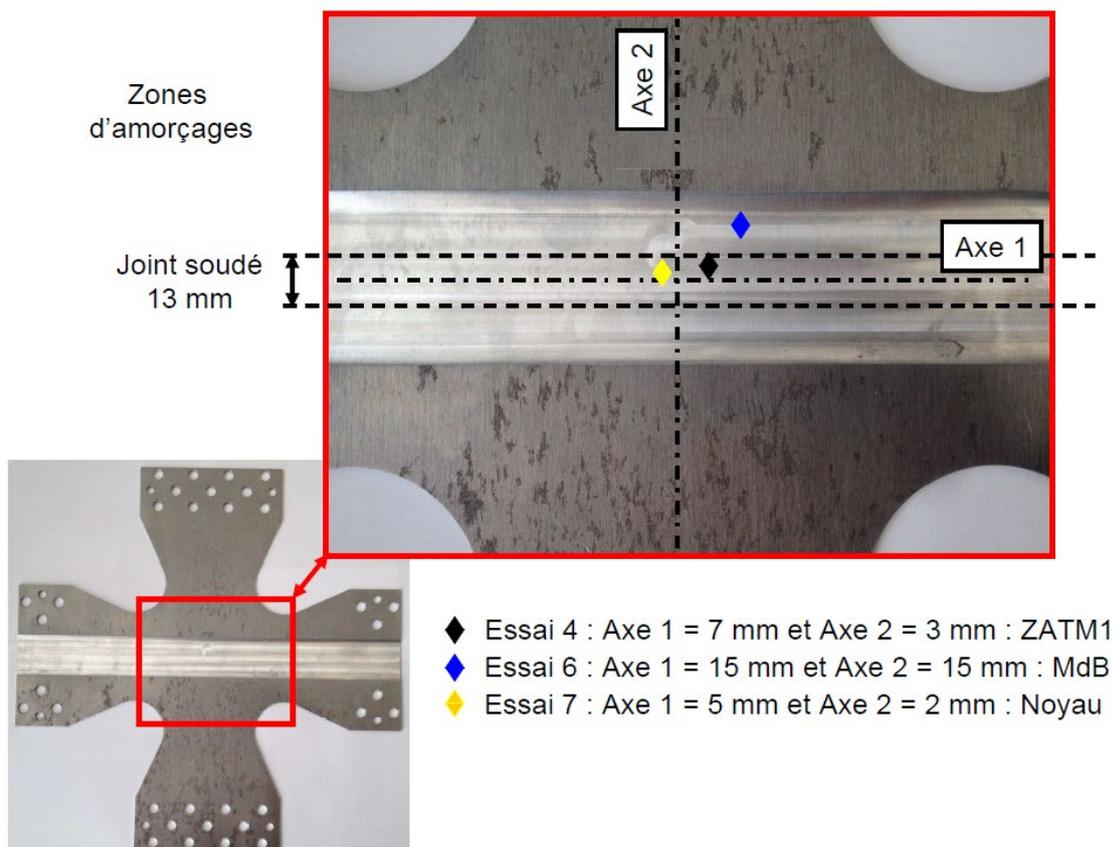


Figure 4.17 : Zones d'amorçages de fissures pour les essais biaxiaux.

Comme pour l'analyse en fatigue uniaxiale, le nombre d'essais réalisés en multiaxial ne permet pas de conclure sur une tendance de la localisation de l'amorçage selon le chargement ou le sens du laminage. Les durées de vie mesurées pour ces trois essais seront utilisées comme moyen de validation du modèle d'endommagement identifié sur les essais de fatigue uniaxiaux dans la prochaine partie modélisation.

4.5 Modélisation du comportement en fatigue d'une structure soudée par FSW

4.5.1 Formulation du modèle

Le modèle Onera utilisé couvre les domaines de faible durée de vie ou Low Cycle Fatigue (LCF) et les grandes durées de vie ou High Cycle Fatigue (HCF). Il prend en compte les effets de multiaxialité, les effets de contraintes moyennes et permet de cumuler l'endommagement dans les cas de chargements complexes. Enfin, le modèle utilise un critère de limite de fatigue fonction de la contrainte moyenne. La loi d'évolution de l'endommagement, supposé scalaire, est donnée par l'équation suivante :

$$dD = (1 - (1 - D)^{1+\beta})^\alpha \left(\frac{J_a}{M(1-D)} \right)^\beta dN \quad (4.1)$$

La variable α est fonction du chargement imposé [115]:

$$1 - \alpha = a \left\langle \frac{J_a - \sigma_f'}{\sigma_u - J_{max}} \right\rangle \quad (4.2)$$

Finalement, lorsque l'amorçage a lieu, la variable D est égale à 1 et le nombre de cycles à amorçage est estimé par l'équation :

$$N_f = \frac{1}{a(1+\beta)} \left\langle \frac{\sigma_u - J_{max}}{J_a - \sigma_f'} \right\rangle \left(\frac{J_a}{M} \right)^{-\beta} \quad (4.3)$$

Les effets de contrainte moyenne σ_m sont contenus dans les paramètres M et σ_f' :

$$\sigma_f' = \sigma_f (1 - 3b_1 \sigma_m) \quad (4.4)$$

$$M = M_0 (1 - 3b_2 \sigma_m) \quad (4.5)$$

4.5.2 Identification des paramètres sur les essais de fatigue sous chargement uniaxial à partir des données globales

Les essais de fatigue uniaxiaux réalisés sont pilotés en force avec un rapport de charge global imposé à la structure soudée. Le choix a été fait, dans un premier temps, de considérer ces rapports de charge globaux et d'étudier la structure soudée en deux zones, le joint soudé et le métal de base. Les paramètres du modèle ont été identifiés à l'aide des courbes de Wöhler précédemment proposées. Le tableau 4.8 présente ces paramètres mécaniques et les figures 4.18 et 4.19 présentent les courbes identifiées sur un élément de volume.

Tableau 4.8 : Paramètres identifiés pour un modèle d'endommagement d'une structure soudée (Joint soudé + métal de base).

Zones	M / σ_n	β	b1	b2	a	σ_f' / σ_n	σ_u / σ_n	σ_n
MdB	2,8	3,5	0,3	0,8	0,01	0,18	1,3	560
Joint Soudé	2,7	3,5	0,3	0,8	0,01	0,11	1	560

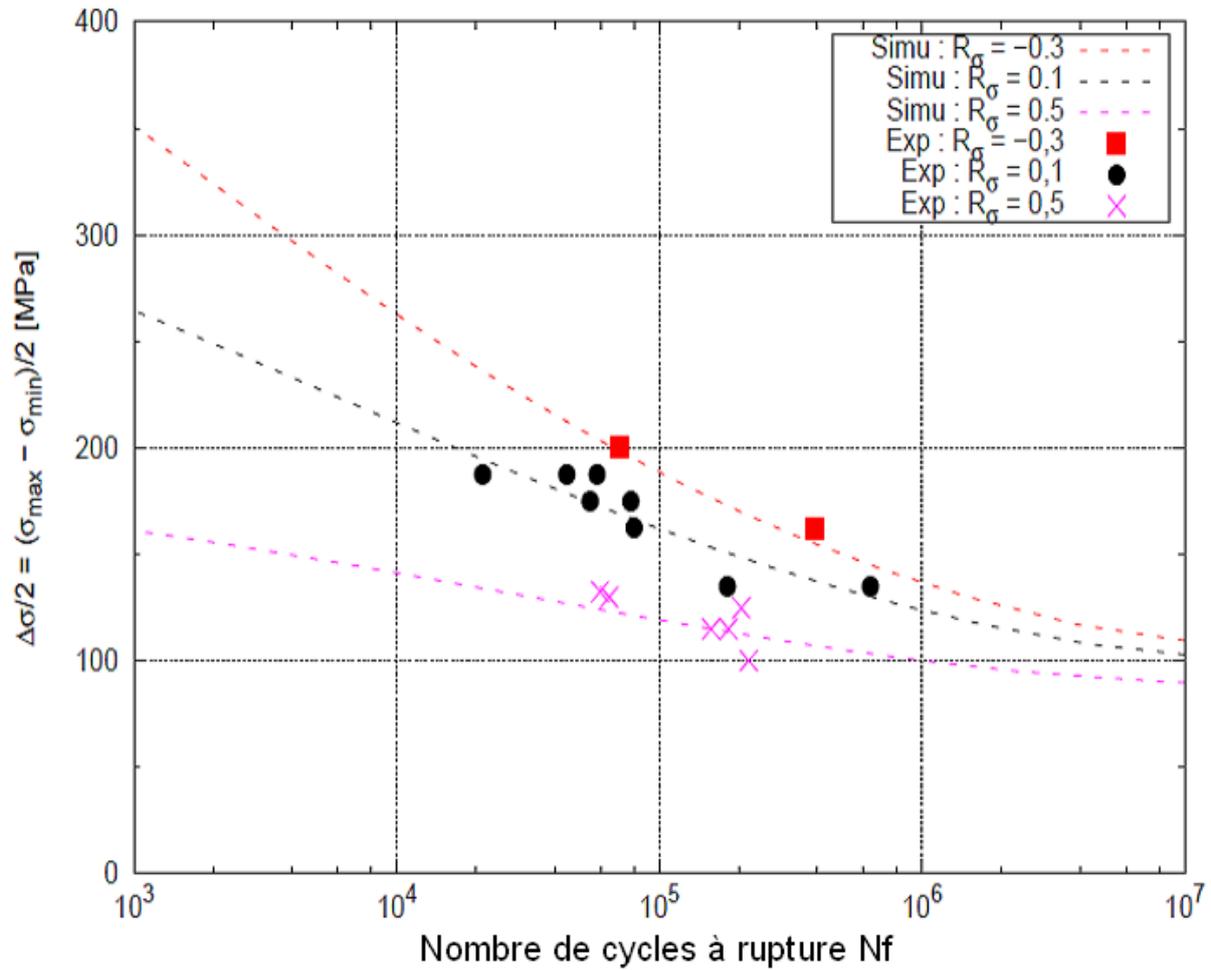


Figure 4.18 : Simulation des courbes de Wöhler pour le métal de base.

Les courbes de Wöhler simulées permettent de bien reproduire le comportement en fatigue du métal de base et de respecter les rapports de charge. La contrainte limite σ_f n'est pas directement mesurable pour le métal de base, les essais de comportement mécanique réalisés ne permettent pas d'obtenir cette information.

La figure 4.19 présente la simulation des courbes de Wöhler pour le joint soudé et pour différents rapports de charge.

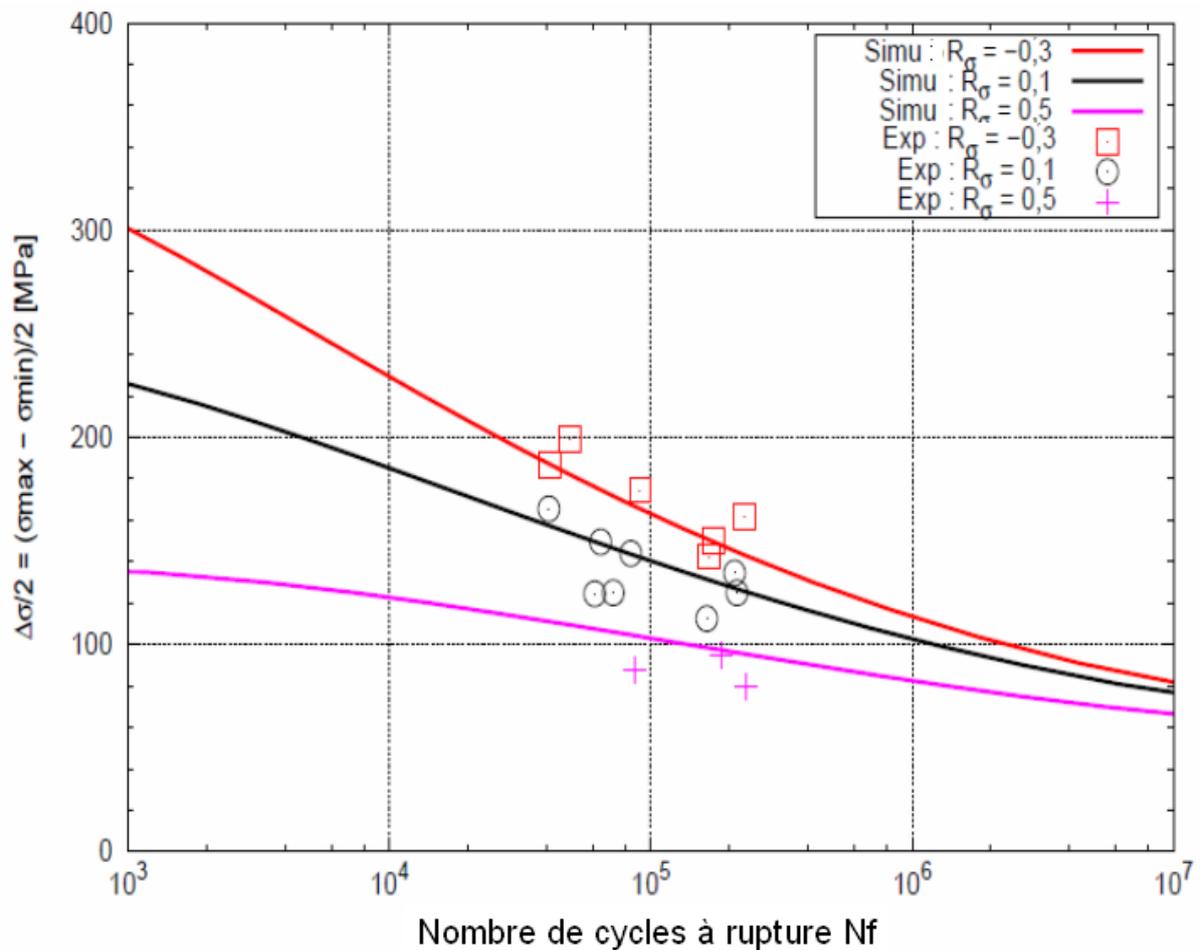


Figure 4.19 : Simulation des courbes de Wöhler pour le joint soudé, en considérant les rapports de charge imposés globalement aux éprouvettes.

À présent, les paramètres du tableau 4.8 sont utilisés en post-traitement pour calculer les durées de vie en fatigue des différents essais simulés par éléments finis avec le modèle de comportement mécanique. Les calculs de fatigue sont également réalisés pour les essais sollicités par des chargements multiaxiaux. On considère le joint soudé et le métal de base comme deux zones distinctes. Les différentes zones du joint constituent une seule et même zone pour les calculs de fatigue en post-traitement. La mise en données du post-traitement pour calculer les durées de vie des essais simulés, ainsi que le fichier matériau utilisé, sont fournis en annexes 3.1 et 3.2.

La figure 4.20 présente un exemple de post-traitement réalisé sur une éprouvette de fatigue.

La figure 4.21 compare les durées de vie prédites par les calculs 3D aux durées de vie expérimentales. Les essais uniaxiaux sont regroupés selon les rapports de charge globaux. Pour ce qui concerne les essais multiaxiaux, des symboles géométriques différents sont utilisés pour différencier les quatre essais.

La durée de vie expérimentale correspond au nombre de cycles subis par l'éprouvette jusqu'à l'apparition d'une fissure détectée par le dispositif de différence de potentiel.

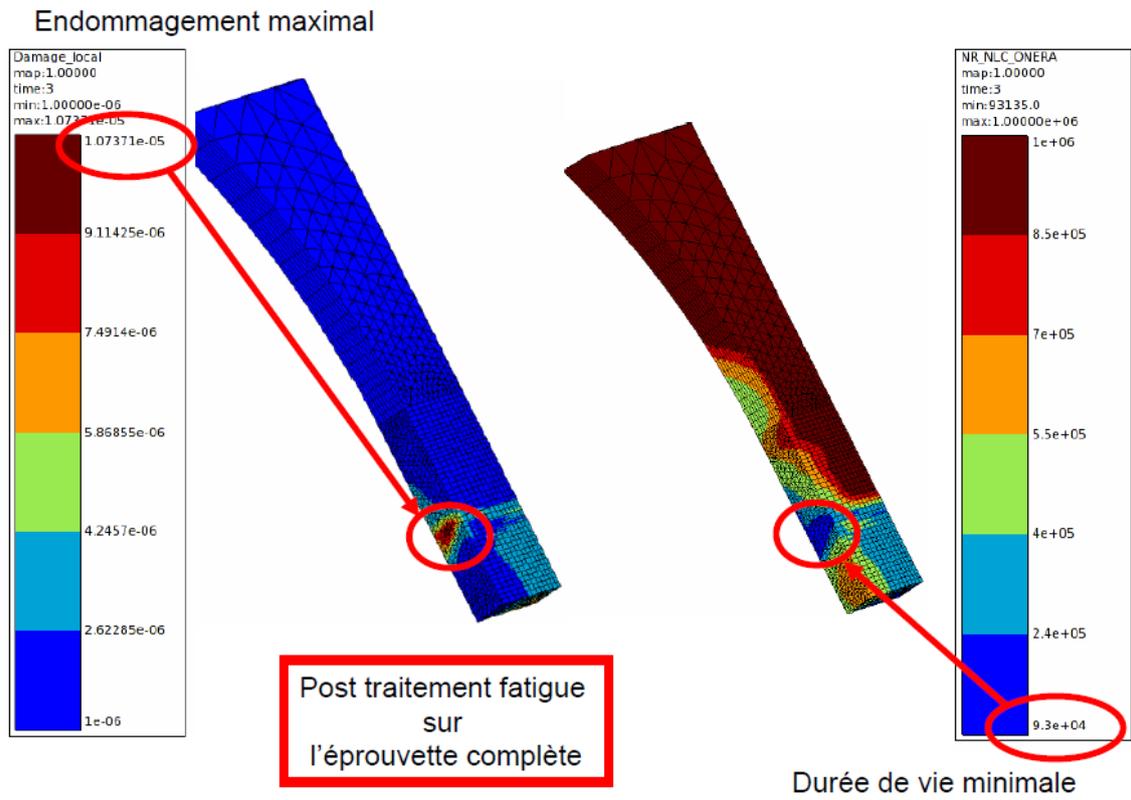


Figure 4.20 : Exemple d'un endommagement et d'une Durée De Vie (DDV) simulés sur une éprouvette de fatigue uniaxiale.

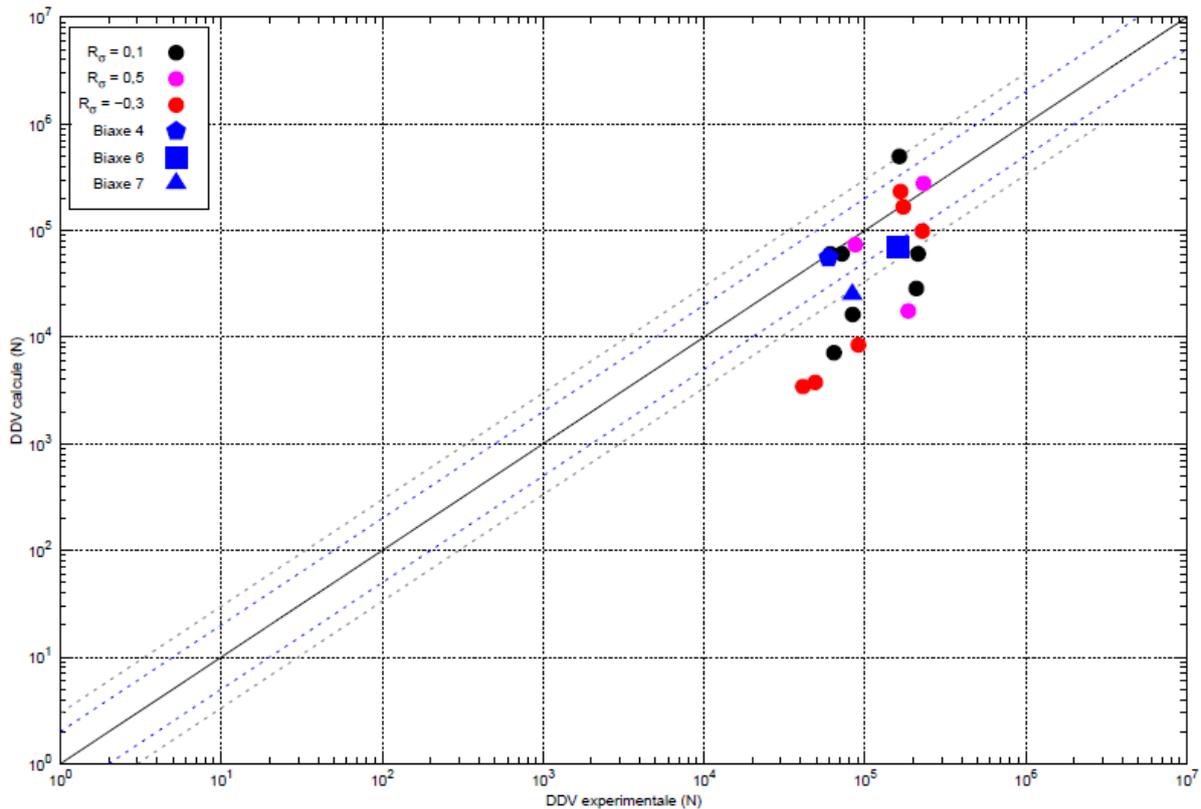


Figure 4.21 : Comparaison des Durées De Vie (DDV) simulées et des durées de vie expérimentales.

Les résultats observés montrent que cette première identification ne permet pas d'estimer les bonnes durées de vie en fatigue pour de nombreux essais. Quelques essais sont compris dans des intervalles, admis de trois fois plus ou moins, aux résultats expérimentaux. Le reste des durées de vie prédites sont très conservatrices par rapport aux durées de vie mesurées.

Une analyse des niveaux des contraintes locales sur les essais simulés a montré un lien entre les durées de vie les moins bien prédites et des contraintes locales maximales les plus importantes. Les tableaux 4.9 et 4.10 regroupent les différents résultats obtenus. La simulation numérique fournit la contrainte maximale et le rapport de charge au point d'amorçage expérimental. On constate que les essais dont les amplitudes de contraintes sont les plus élevées, sont également les essais pour lesquels les durées de vie d'amorçage et les zones sont les moins bien prédites. De plus, les zones prédites par le modèle ne correspondent pas aux zones d'amorçages expérimentales. Ce résultat n'est pas étonnant puisque les mesures des contraintes locales effectuées sur les essais simulés ont montré que localement le comportement mécanique est différent des conditions de chargement imposées globalement à la structure soudée (Tableau 4.5).

Tableau 4.9 : Résultats des durées de vie et des zones d'amorçages de fissure en fatigue obtenues expérimentalement.

N° essai	Expérience		Simulation		Rapport De Charge global
	Zone d'amorçage Observée Exp.	Durée de vie Exp.	Contrainte maximale locale (MPa)	Rapport de Charge local	
13	ZAT2	163743	254	0,12	0,1
16	ZAT2	64306	456	0,34	0,1
26	ZAT1	83928	361	0,20	0,1
30	ZATM2	61051	314	0,21	0,1
32	ZATM2	71936	330	0,24	0,1
52	ZATM1	209103	330	0,18	0,1
56	Noyau Soudé	213858	331	0,24	0,1
36	ZATM1	87192	359	0,51	0,5
37	ZATM2	186324	403	0,53	0,5
39	Noyau Soudé	231730	334	0,52	0,5
40	Noyau Soudé	49103	333	-0,20	-0,3
41	Noyau Soudé	41264	311	-0,21	-0,3
42	ZATM1	227613	252	-0,29	-0,3
43	Noyau Soudé	173174	232	-0,29	-0,3
44	ZATM1	91104	289	-0,21	-0,3
45	Noyau Soudé	166702	220	-0,30	-0,3
Biaxe 4	ZATM1	59437	255	-	-
Biaxe 6	MdB	161420	268	-	-
Biaxe 7	Noyau Soudé	83505	247	-	-

Tableau 4.10 : Résultats des durées de vie et des zones d'amorçages de fissure en fatigue obtenues par simulation.

N° essai	Simulation				Rapport De Charge global
	Zone d'amorçage Observée Sim.	Durée de vie Sim.	Contrainte maximale locale (MPa)	Rapport de Charge local	
13	ZAT1	496768	254	0,12	0,1
16	ZAT2	7141	437	0,34	0,1
26	ZAT2	16349	453	0,36	0,1
30	ZAT1	60532	388	0,36	0,1
32	ZAT1	60532	388	0,36	0,1
52	ZAT2	28629	442	0,39	0,1
56	ZAT1	60532	388	0,36	0,1
36	ZAT2	73747	452	0,62	0,5
37	ZAT2	17630	483	0,61	0,5
39	ZAT2	276989	423	0,62	0,5
40	ZAT2	3761	473	0,15	-0,3
41	ZAT2	3446	444	0,16	-0,3
42	ZAT1	98915	254	-0,28	-0,3
43	ZATM2	166780	232	-0,29	-0,3
44	ZAT1	8445	412	0,15	-0,3
45	ZATM2	232392	220	-0,30	-0,3
Biaxe 4	ZAT1	55715	315	-	-
Biaxe 6	ZATM1	70242	311	-	-
Biaxe 7	ZATM1	25027	324	-	-

4.5.3 Identification des paramètres sur les essais de fatigue sous chargement uniaxial à partir des données locales

Les courbes de Wöhler précédemment présentées permettent de dissocier les comportements en fatigue des ZAT d'une part et ceux du noyau soudé et des ZATM d'une autre part. Les paramètres identifiés sur un élément de volume sont regroupés dans le tableau 4.11 et les courbes identifiées sont présentées sur les figures 4.22 et 4.23. La courbe de Wöhler pour le métal de base reste identique à la figure 4.18.

Tableau 4.11 : Paramètres identifiés pour un modèle d'endommagement dans différentes zones de la structure soudée.

Zones	M/σ_n	β	b1	b2	a	σ_f/σ_n	σ_u/σ_n	σ_n
MdB	2,8	3,5	0,3	0,8	0,01	0,18	1,3	560
ZAT	3,2	3,5	0,3	0,8	0,01	0,1	1,4	560
NS + ZATM	3,6	3,5	0,3	0,8	0,01	0,1	0,75	560

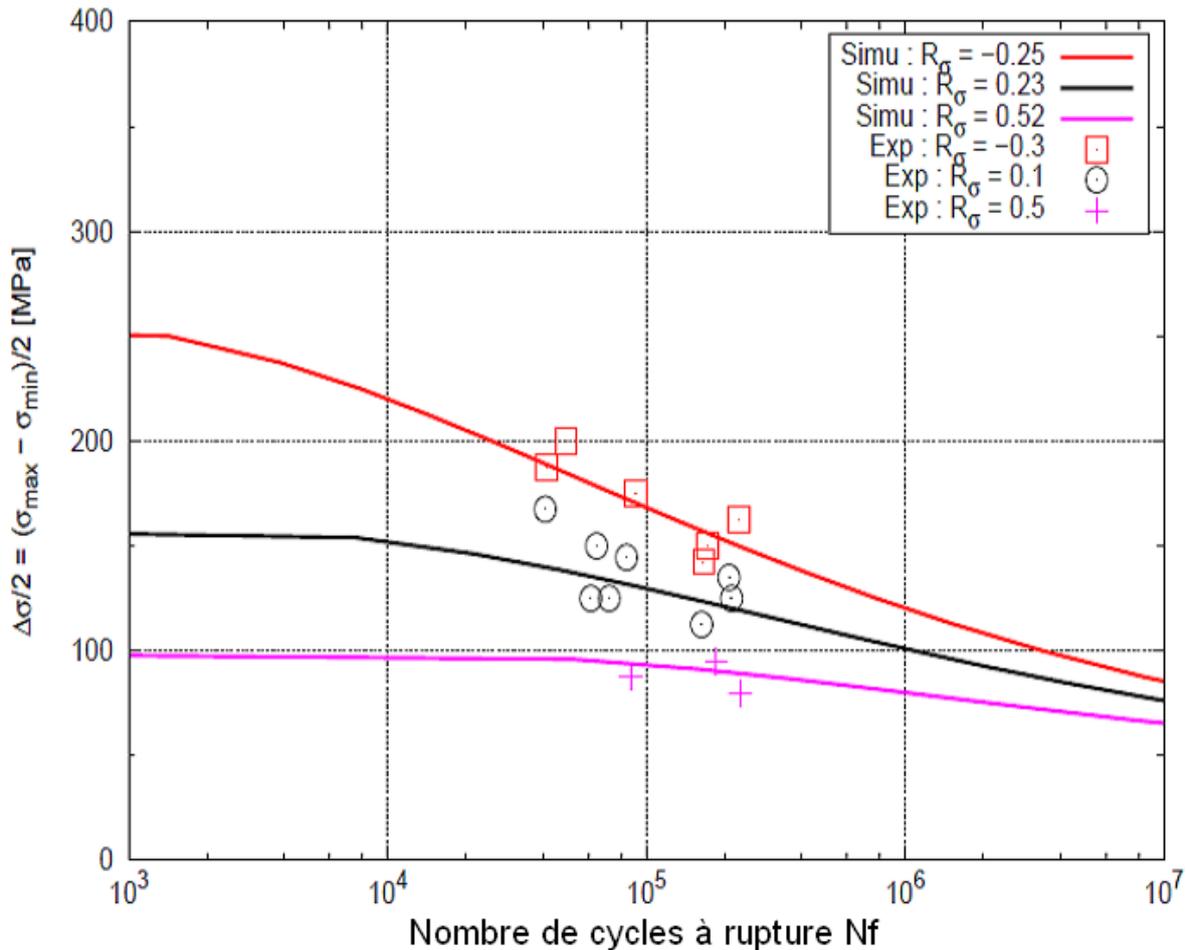


Figure 4.22 : Simulation des courbes de Wöhler pour le NS et la ZATM.

Chaque essai est simulé avec un rapport de charge local moyenné pour les essais d'un même rapport de charge global. Pour les essais uniaxiaux avec un rapport de charge global de 0,1, les rapports de charge locaux calculés sont de 0,12 pour l'essai n°13, de 0,34 pour l'essai n°16, de 0,20 pour l'essai n°26, ... (Tableau 4.9). Un rapport de charge moyen de 0,23 est calculé et est attribué à chacun de ces essais. La même démarche est appliquée pour les essais avec des rapports de charge globaux de -0,3 et de 0,5.

Le comportement affiché pour cette zone est très proche de celui du joint soudé précédemment proposé par la figure 4.19, bien que les rapports de charge locaux soient différents.

La figure 4.23 propose la courbe de Wöhler pour la ZAT avec les tracées obtenus sur un élément de volume. Un compromis est trouvé sur la valeur des paramètres afin de prendre en compte les rapports de charge locaux ainsi qu'une variation assez lisse de ces paramètres au passage du noyau soudé jusqu'au métal de base.

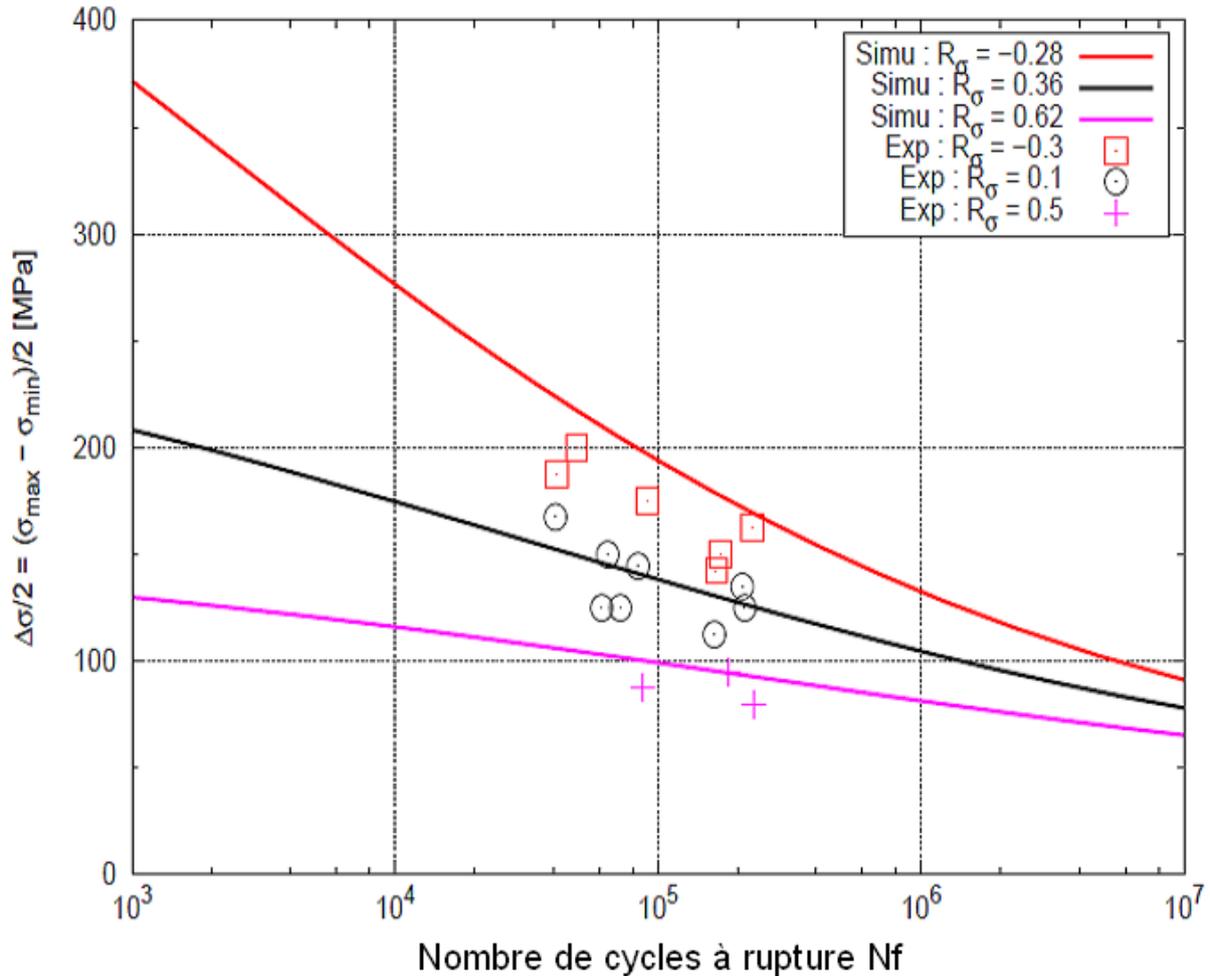


Figure 4.23 : Simulation des courbes de Wöhler pour la ZAT.

De la même façon que pour la première méthode, les paramètres du tableau 4.11 sont utilisés en post-traitement des essais sur structures 3D pour calculer les durées de vie en fatigue du joint soudé (Annexe 3.3). Dans ce second cas, on considère la structure soudée en trois zones, comme décrite précédemment, avec une zone centrale comprenant le noyau soudé avec les ZATM, puis la ZAT et enfin le métal de base. Les paramètres mécaniques du modèle de comportement évoluent dans l'espace à travers le joint soudé. Les essais simulés ont été à nouveau post-traités et les comparaisons des durées de vie sont proposées sur la figure 4.24.

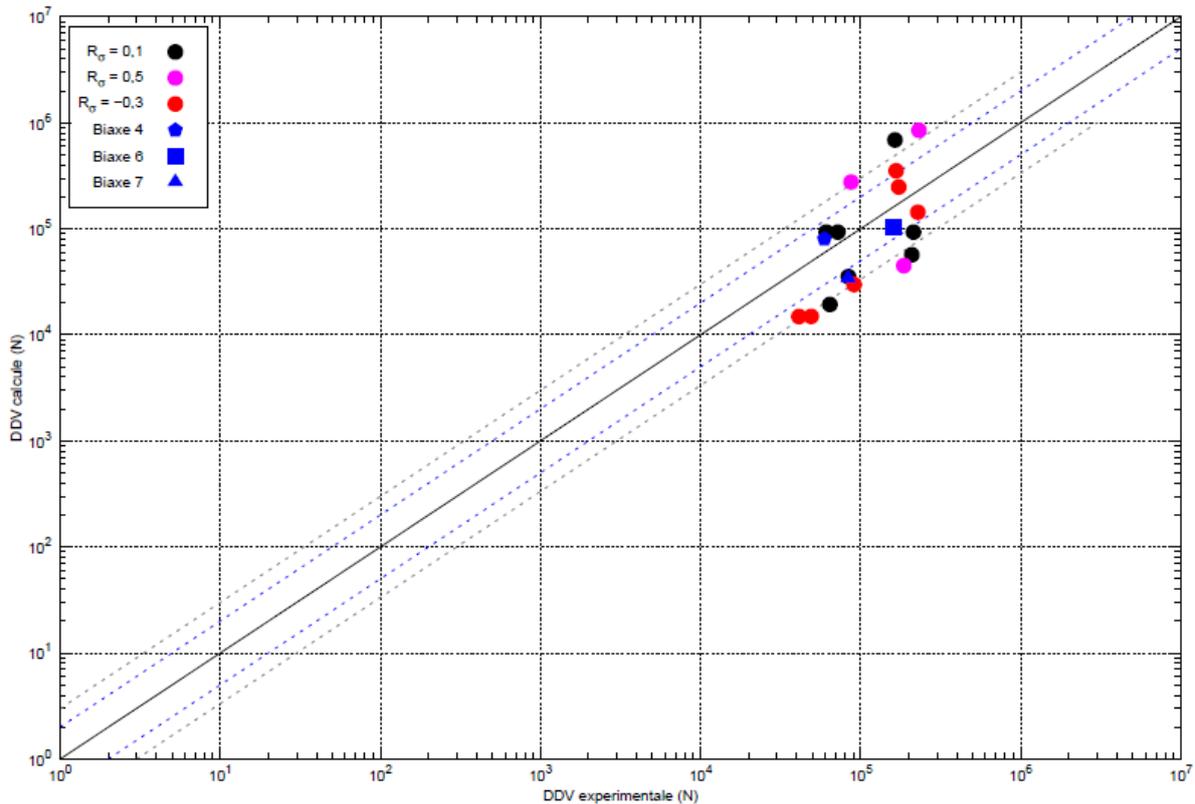


Figure 4.24 : Comparaison des durées de vie simulées et des durées de vie expérimentales pour une structure soudée comprenant trois zones (NS, ZAT et MdB).

On note une forte amélioration de l'estimation des durées de vie. Les tableaux 4.12 et 4.13 regroupent les résultats expérimentaux et les prévisions réalisées à l'aide du modèle local, qui sont globalement en bon accord. Seuls quelques essais sont à l'extérieur du domaine $\times 3$ ou $\times 1/3$. Ces essais correspondent, le plus souvent à ceux dont les niveaux de contraintes sont les plus endommageant. Ces observations se confirment par les calculs 3D. L'éprouvette de l'essai n°40, réalisé avec un rapport de charge de -0,3 et dont la durée de vie prédite est la moins bonne, subit une contrainte locale d'environ 333 MPa dans la zone d'amorçage expérimentale, soit un rapport de charge d'environ -0,20. Bien que le modèle de comportement mécanique ne soit pas parfaitement optimisé, le rapport de charge obtenu reste proche de celui imposé globalement. Tandis que pour l'essai simulé, une contrainte maximale de 473 MPa est calculée dans la zone de prédiction d'amorçage, soit un rapport de charge de 0,15. Ce rapport est nettement plus endommageant pour la structure, mais n'est pas obtenu dans la même zone qu'expérimentalement.

En ce qui concerne les essais multiaxiaux, les durées de vie et les zones d'amorçages prédites par les calculs sont fortement améliorées par cette méthode d'affinement des zones.

Une amélioration du gradient de comportement mécanique du joint soudé qui tient compte des effets multiaxiaux pourrait s'avérer efficace pour optimiser encore les résultats.

Tableau 4.12 : Résultats des durées de vie et des zones d'amorçage de fissure en fatigue obtenues expérimentalement.

N° essai	Expérience		Simulation		Rapport De Charge global
	Zone d'amorçage Observée Exp.	Durée de vie Exp.	Contrainte maximale locale (MPa)	Rapport de Charge local	
13	ZAT2	163743	254	0,12	0,1
16	ZAT2	64306	456	0,34	0,1
26	ZAT1	83928	361	0,20	0,1
30	ZATM2	61051	314	0,21	0,1
32	ZATM2	71936	330	0,24	0,1
52	ZATM1	209103	330	0,18	0,1
56	Noyau	213858	331	0,24	0,1
36	ZATM1	87192	359	0,51	0,5
37	ZATM2	186324	403	0,53	0,5
39	Noyau	231730	334	0,52	0,5
40	Noyau	49103	333	-0,20	-0,3
41	Noyau	41264	311	-0,21	-0,3
42	ZATM1	227613	252	-0,29	-0,3
43	Noyau	173174	232	-0,29	-0,3
44	ZATM1	91104	289	-0,21	-0,3
45	Noyau	166702	220	-0,30	-0,3
Biaxe 4	ZATM1	59437	255	-	-
Biaxe 6	MdB	161420	268	-	-
Biaxe 7	Noyau	83505	247	-	-

Tableau 4.13 : Résultats des durées de vie et des zones d'amorçage de fissure en fatigue obtenues par simulation.

N° essai	Simulation				Rapport De Charge global
	Zone d'amorçage Observée Sim.	Durée de vie Sim.	Contrainte maximale locale	Rapport de Charge local	
13	ZATM1	687047	251	0,10	0,1
16	Noyau	19359	382	0,21	0,1
26	Noyau	35383	374	0,23	0,1
30	ZATM2	93135	343	0,27	0,1
32	ZATM2	93135	343	0,27	0,1
52	Noyau	56936	356	0,24	0,1
56	ZATM2	93135	343	0,28	0,1
36	ZATM2	275912	359	0,51	0,5
37	ZATM2	44858	403	0,53	0,5
39	ZATM2	847380	343	0,53	0,5
40	ZATM2	14940	473	0,15	-0,3
41	ZAT2	14877	444	0,16	-0,3
42	ZATM1	143207	251	-0,21	-0,3
43	ZATM1	247690	232	-0,29	-0,3
44	ZAT1	29742	412	0,15	-0,3
45	ZATM2	352312	220	-0,30	-0,3
Biaxe 4	ZATM2	79674	315	-	-
Biaxe 6	ZATM1	103960	311	-	-
Biaxe 7	ZATM1	34066	324	-	-

Synthèse

À la suite de la modélisation du gradient de comportement mécanique du joint soudé par FSW réalisée dans le chapitre précédent, le comportement en fatigue a été étudié.

Les essais de fatigue réalisés avec des chargements uniaxiaux ont permis d'identifier les paramètres d'un modèle d'endommagement pour un joint soudé par FSW. L'hypothèse d'une structure du joint soudé composée de deux zones, le joint et le métal de base, a été posée dans un premier temps. Les post-traitements en fatigue des simulations 3D par éléments finis ont montré des durées de vie et des zones d'amorçages prédites bien trop conservatives par rapport aux résultats expérimentaux. Deux principaux problèmes sont ressortis de cette première analyse. Le choix de considérer le joint soudé comme une seule zone, sans dissocier les zones affectées et donc les comportements mécaniques différents, ne permet pas d'obtenir

des résultats satisfaisants. Enfin, les essais en fatigue multiaxiaux, dont le but est de valider les modèles de comportement et de fatigue, ont permis de constater que le modèle de comportement ne permet pas de tenir compte des effets multiaxiaux subis par la structure soudée. Cela a un impact ensuite sur l'évolution de l'endommagement dans les essais multiaxiaux et uniaxiaux lorsque les déformations plastiques sont importantes.

Bien que le modèle de comportement mécanique doive être amélioré, une nouvelle modélisation de l'endommagement du joint soudé a été réalisée à partir des essais uniaxiaux en considérant des rapports de charge locaux dans les zones d'amorçages de fissures expérimentales. Face au faible nombre d'essais expérimentaux réalisés, seules les ZAT ont pu être dissociées du métal de base et du noyau soudé et des ZATM. Les paramètres des trois zones distinctes ont été identifiés.

De nouveau, les essais de fatigue ont été simulés puis post-traités afin d'obtenir les durées de vie et les zones d'amorçage du joint soudé. Cette nouvelle méthode diminue considérablement l'écart entre l'expérience et la simulation des essais uniaxiaux. La prévision de durée de vie n'est pas encore totalement satisfaisante, mais ces résultats peuvent être mis en lien avec des niveaux de contraintes locaux très largement supérieurs aux contraintes imposées globalement lors des essais expérimentaux. Ces contraintes ont également un impact sur la localisation des amorçages de fissures.
