Fractographie

Contents

4.1 Introduction **133**
4.2 Morphologie des chargements en traction **138**
4.2.1 Zone d'amorçage de fissure 140
4.2.2 Zone de rupture catastrophique 144
4.3 Morphologie des chargements multiaxiaux **147**
4.3.1 Zone d'amorçage de fissure 149
4.3.2 Zone catastrophique 151
4.4 Bilan **152**

4.1 Introduction

Connaître les mécanismes d'endommagement provoquant la rupture des pièces en caoutchouc est une étape importante dans l'optimisation de leur comportement en fatigue. Les chapitres précédents ont permis d'établir un critère, capable d'estimer les durées de vie en fatigue multiaxiale de diabolos en polychloroprène. Toutefois, ce paramètre ne fournit pas d'informations concernant les phénomènes microscopiques liés à la fatigue du matériau. Cela peut être obtenu par l'observation de faciès de rupture.

Legorju-Jago (1998) réalise une analyse fractographique d'éprouvettes de propagation de fissure en caoutchouc naturel pour différents niveaux de chargement, températures et fréquences. Elle montre l'apparition de languettes dans une zone proche de la pointe de fissure, de morphologies différentes suivant la fréquence de sollicitation (fig. 4.1). Elle les définit comme étant le résultat d'une thermo-oxydation du matériau.

Lacroix (2004) observe les faciès de rupture d'éprouvettes diabolos en polychloroprène ayant subi de la fatigue en traction. Il montre que la fissure se propage à partir de défauts microscopiques présents dans le matériau (fig. 4.2). Il optimise alors son comportement en fatigue uniaxiale en améliorant son homogénéité. Il montre également l'existence de languettes, similaires à celles observées par Legorju-Jago (1998) dans la zone d'amorçage en fatigue (fig. 4.3). Ces deux élastomères étant répertoriés dans la littérature comme "cristallisant sous contrainte", on peut se poser la question du rôle joué par les languettes dans la cristallisation sous contrainte.

Gauchet (2007) étudie l'influence du type de noir de carbone dans la morphologie des faciès de rupture pour un HNBR (fig.4.4 et 4.5). Elle y définit une zone rugueuse de propagation en forme de rosace (fig. 4.4). Elle constate qu'en diminuant la surface spécifique du noir de carbone, la rugosité des pétales [1] décroît, alors que la zone de propagation augmente (fig. 4.5). Elle montre également qu'en accentuant la contrainte maximale ou la température ambiante subie par le matériau, la zone de propagation se réduit et les pétales grossissent, mais sont moins nombreuses (fig. 4.6).

Le Cam et al. (2008) proposent d'identifier, dans un diagramme de Haigh en traction-compression, l'influence du rapport de déformation [2] sur la rupture observée des éprouvettes (fig. 4.7). Ils définissent ainsi trois zones principales, en fonction du rapport de déformation :

- Lorsque $R_\varepsilon \in [-0.25, 0]$, ils distinguent des rupture à mi-hauteur de l'éprouvette.
- Pour $R_\varepsilon \in [0, 0.25[$, ils remarquent des fissures en surface supérieure et dans la partie centrale de l'éprouvette.
- Quand $R_\varepsilon \in [0.25, 0.5]$, ils obtiennent une multifissuration, à mi-hauteur de la structure, caractéristique du comportement en fatigue du NR.

De nombreuses études ont été menées pour appréhender la fractographie de différents élastomères (NR (Bhowmick et al., 1979b), (Legorju-Jago, 1998), (Legorju-Jago et Bathias, 2002), (Le Cam et al., 2008), SBR (Setua et De, 1983), NBR (Bascom, 1977a), (Bascom, 1977b), (Bhowmick et al., 1979a), XNBR (Chakraborty et al., 1982), HNBR (Gauchet et al., 2007), (Gauchet, 2007), CR (Lacroix, 2004)). Peu d'entre elles traitent du polychloroprène.

L'influence de différents paramètres (contrainte maximale, température, fréquence) sur le faciès de rupture de caoutchoucs NR et HNBR a été explorée dans la littérature. Un travail a été réalisé pour décrire l'effet du rapport de déformation sur la rupture d'un caoutchouc naturel. En revanche, l'impact du rapport de chargement (rapport de charge, rapport de déplacement) sur la morphologie du faciès de rupture ne semble pas encore avoir été examiné. C'est l'objectif de ce chapitre. Celui-ci est divisé en deux

1. de la rosace
2. $R_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}}$

parties :

– L'étude fractographique en traction simple
– L'analyse des faciès de rupture en fatigue multiaxiale

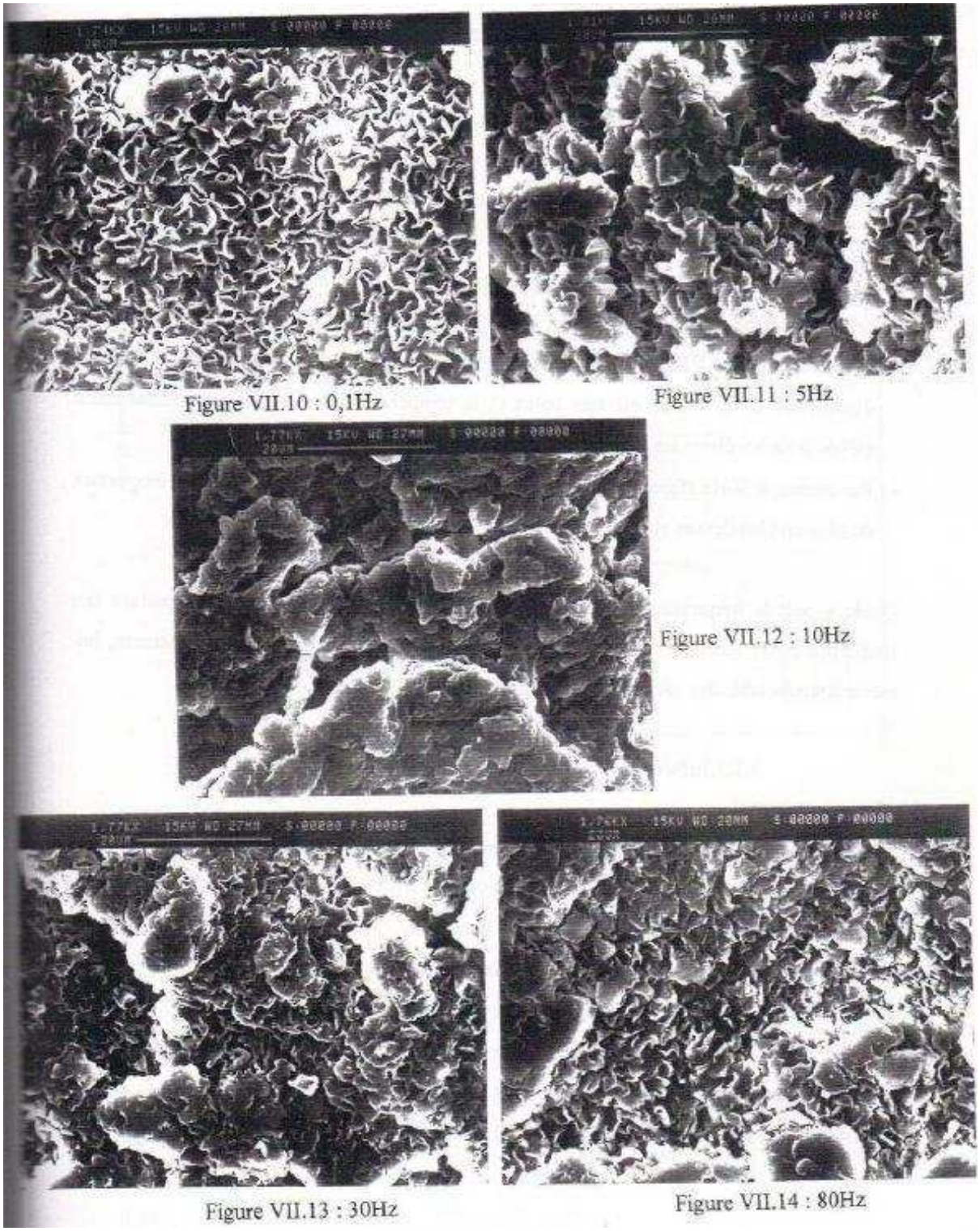


FIGURE 4.1 – Influence de la fréquence dans la morphologie des languettes (Legorju-Jago, 1998)

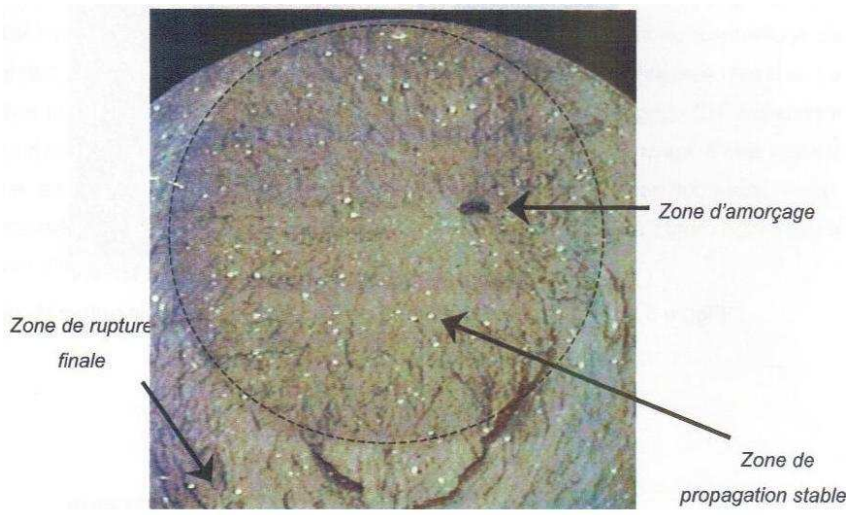


FIGURE 4.2 – Observation de la zone d'amorçage de fissure pour un polychloroprène (Lacroix, 2004)

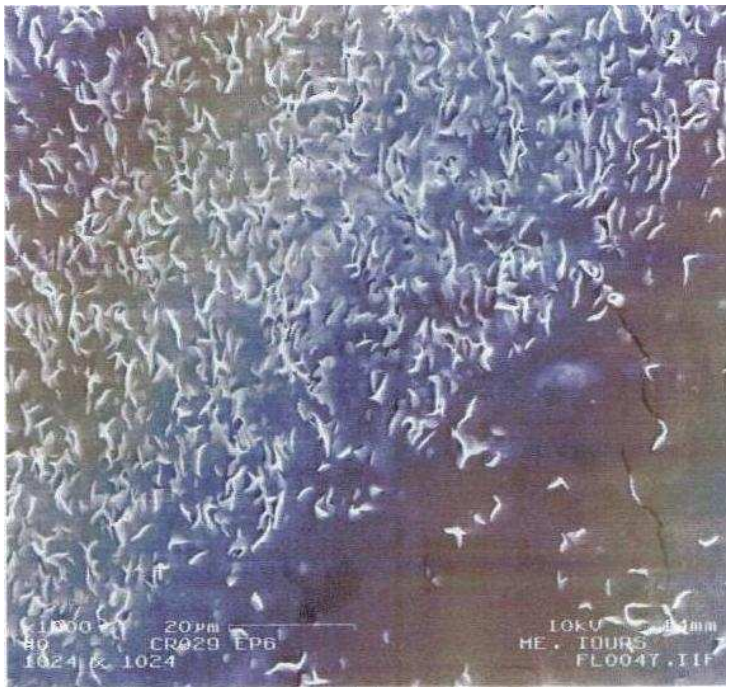


FIGURE 4.3 – Observation des languettes en zone d'amorçage de fissure dans un polychloroprène (Lacroix, 2004)

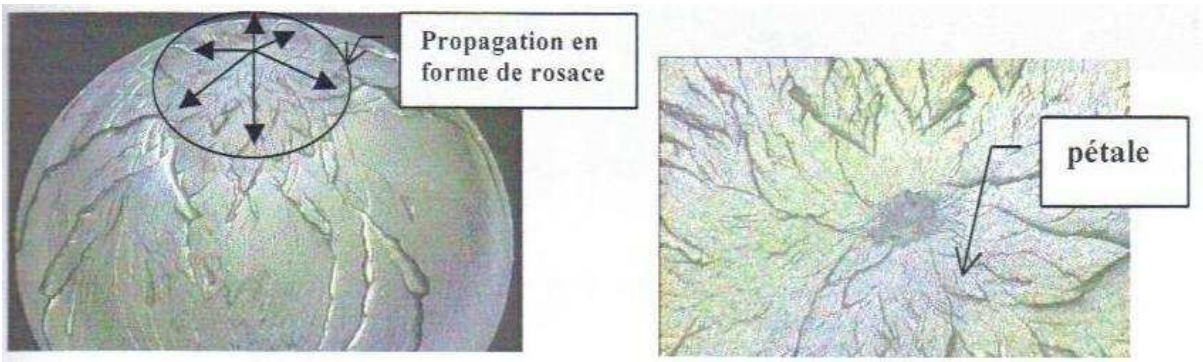


FIGURE 4.4 – Faciès de rupture en fatigue typique pour un HNBR (Gauchet, 2007)

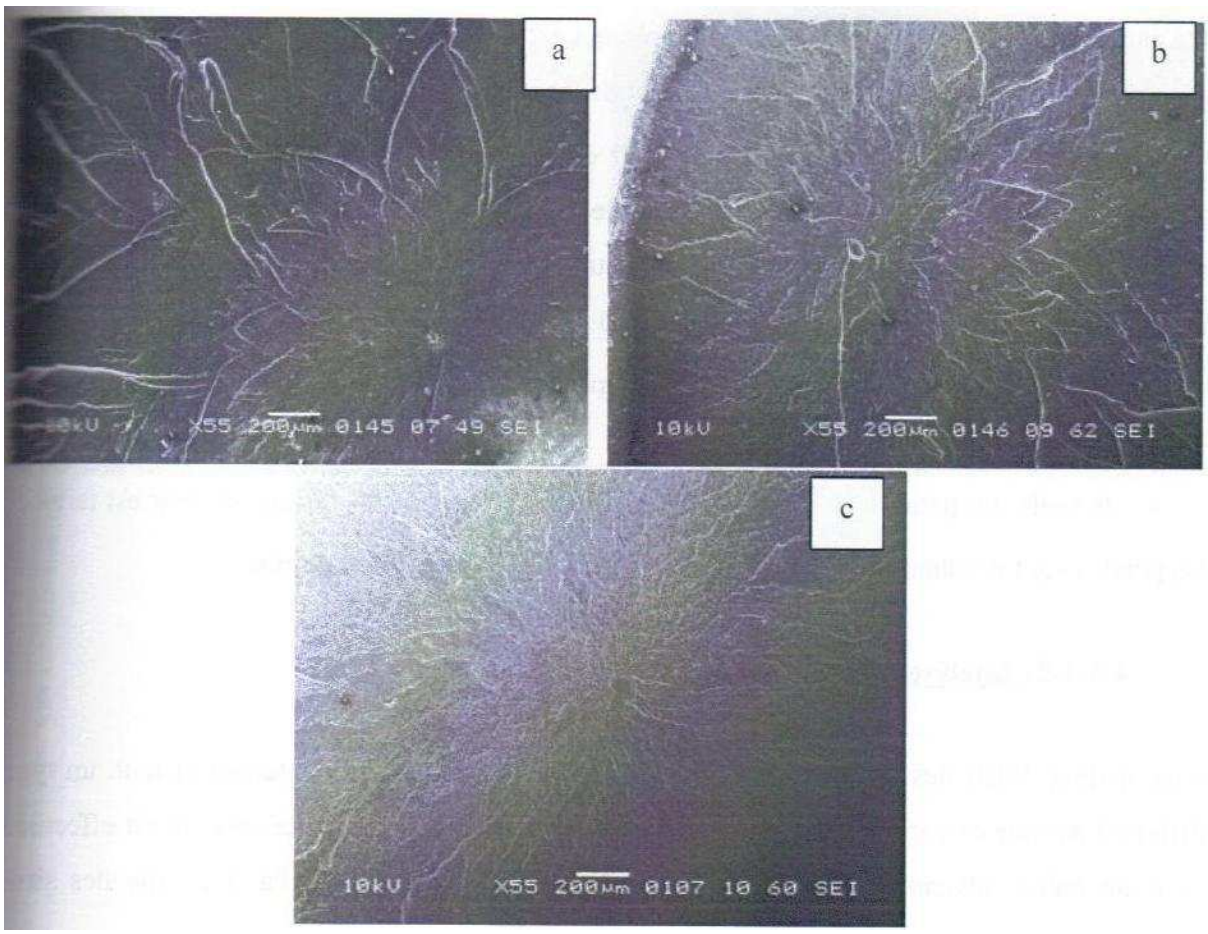


FIGURE 4.5 – Influence du type de noir de carbone dans la morphologie du faciès de rupture du HNBR, dans la zone de propagation stable (Gauchet, 2007) : (a) N550, (b) S6000, (c) N990

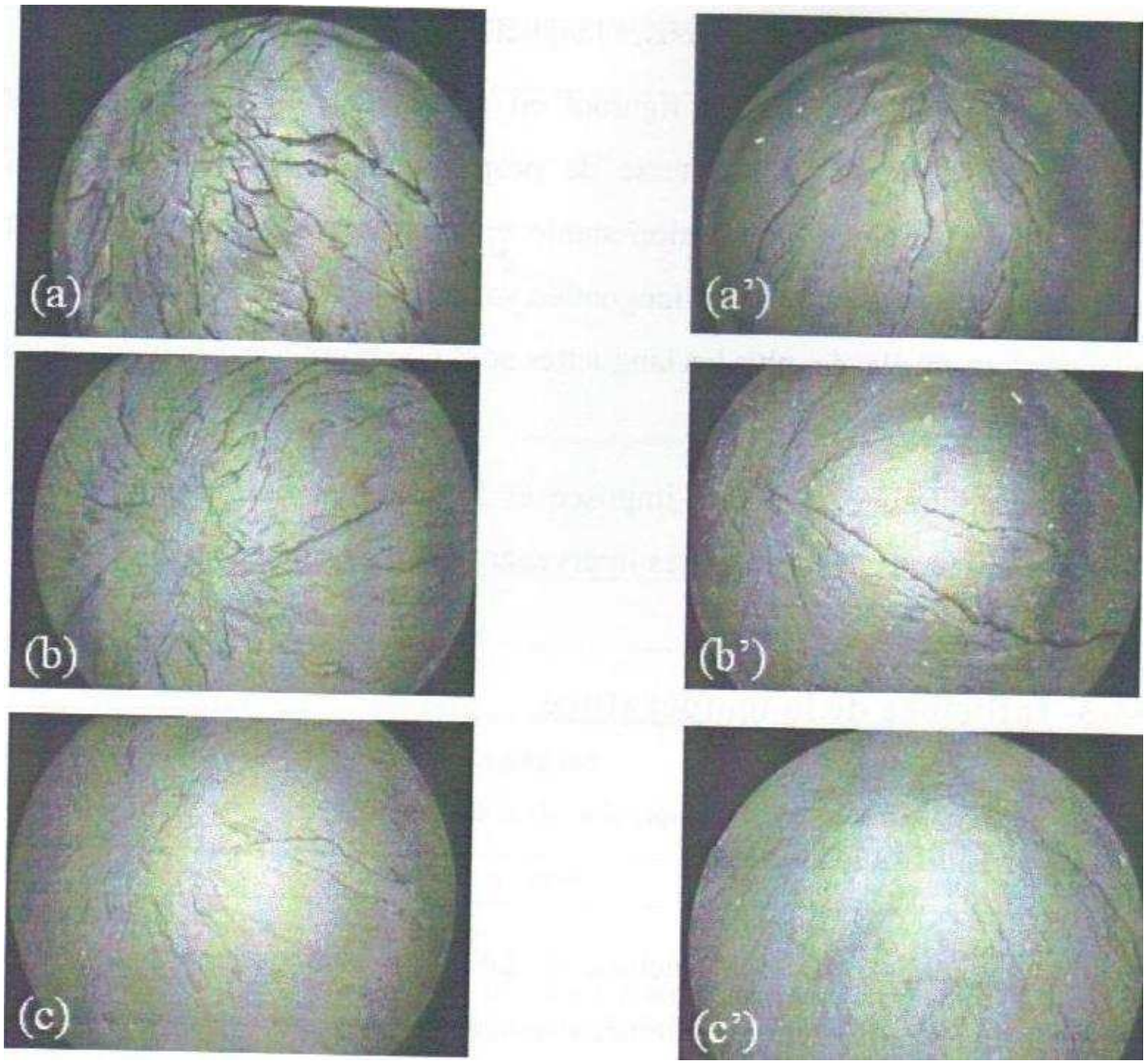


FIGURE 4.6 – Influence de la charge maximale sur le faciès de rupture d'un HNBR (Gauchet, 2007) : HNBR chargé au N550, ayant subi une charge maximale de 1,25 MPa (a) et de 1,45 MPa (a'), HNBR chargé au S6000, ayant subi une charge maximale de 1,25 MPa (b) et de 1,45 MPa (b'), HNBR chargé au N990, ayant subi une charge maximale de 1,25 MPa (a) et de 1,45 MPa (a')

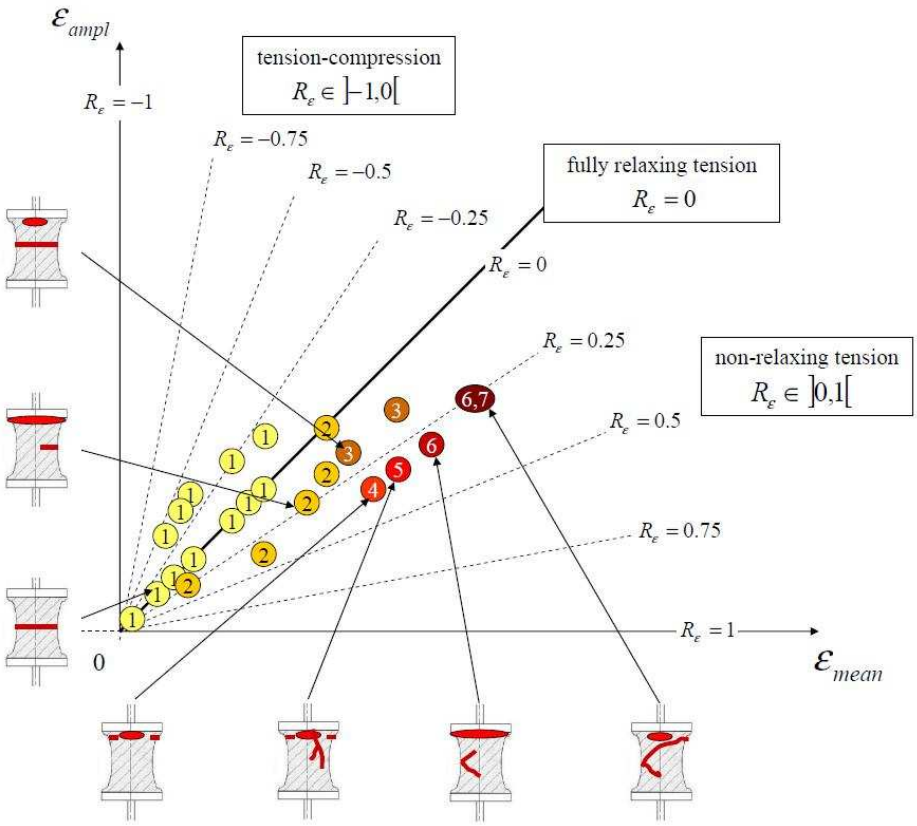


FIGURE 4.7 – Description des ruptures observées en fatigue uniaxiale à partir d'un diagramme de Haigh (Le Cam et al., 2008)

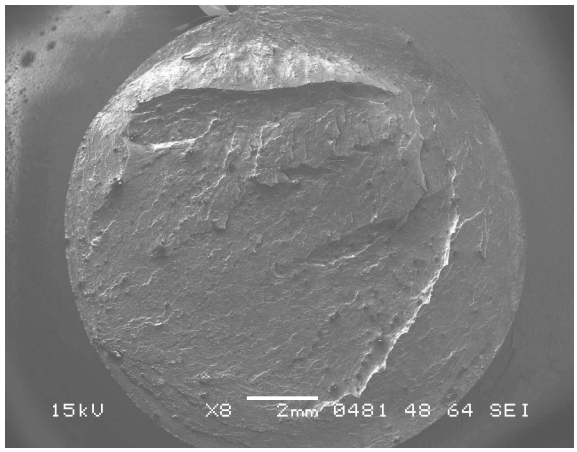
4.2 Morphologie des chargements en traction

L'étude fractographique en traction est réalisée pour identifier l'influence du rapport de charge dans la morphologie des faciès de rupture du polychloroprène. Dans un premier temps, les analyses sont menées à l'échelle macroscopique afin de voir l'effet du rapport de charge sur la morphologie globale du faciès de rupture (Fig. 4.8). Cette étude est réalisée sur un Microscope Electronique à Balayage de type JEOL JSM 5900 LV.

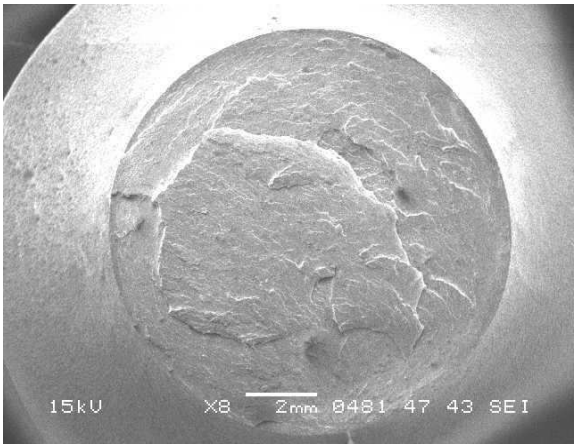
Pour des rapports de charges positifs, l'ensemble des faciès de rupture possèdent deux domaines : une zone rugueuse, qui semble être celle de propagation stable, et une autre, plus lisse, et assimilable celle de fin de vie. Cette description, ne fonctionne pas pour des faciès de rupture à rapports de charge négatifs, qui se distinguent par la présence de forts reliefs. Lacroix (2004) propose une décomposition de leur faciès de rupture en trois domaines : une zone d'amorçage, une zone de propagation stable et une zone de rupture finale (fig. 4.2).

La figure 4.9 propose un modèle de description des faciès de rupture relatifs à des rapports de charge positifs et peuvent être divisés en 4 zones : la zone d'amorçage de fissure (fig. 4.9-a), la zone de propagation stable (fig. 4.9-b), la zone de fin de vie (fig. 4.9-c) et la zone de déchirement, que nous appellerons également zone catastrophique (fig. 4.9-d)

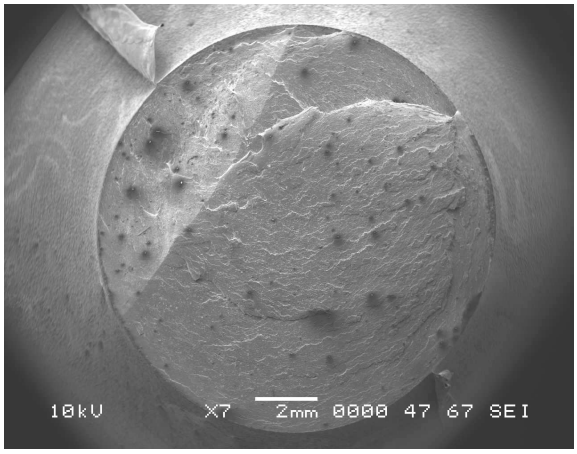
La figure 4.9 montre deux zones d'amorçage possible : l'image de gauche correspond à une amorçage de fissure en surface d'éprouvette, tandis que, dans la seconde, elle se localise au niveau d'un défaut



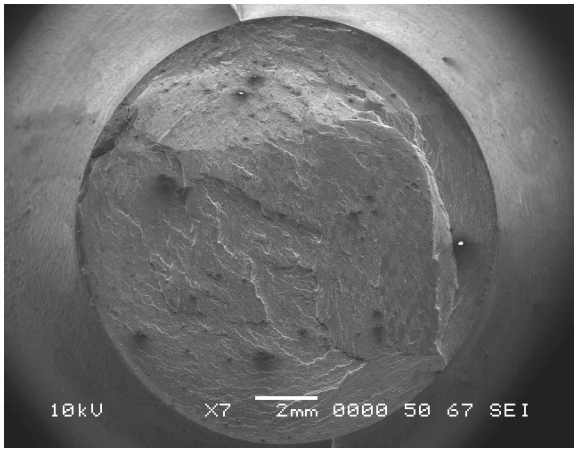
(a)



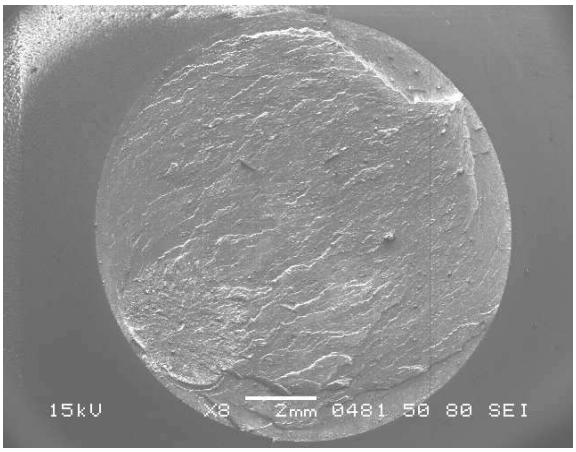
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURE 4.8 – Images macroscopiques, prises au MEB (Electrons secondaires), de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi un chargement en fatigue de traction, de force maximale 150 N, et de rapports de charge de (a) R=-0.3 (72482 cycles), (b) R=-0.1 (65385 cycles), (c) R=0.1 (36730 cycles), (d) R=0.2 (99979 cycles), (e) R=0.4 (491075 cycles)

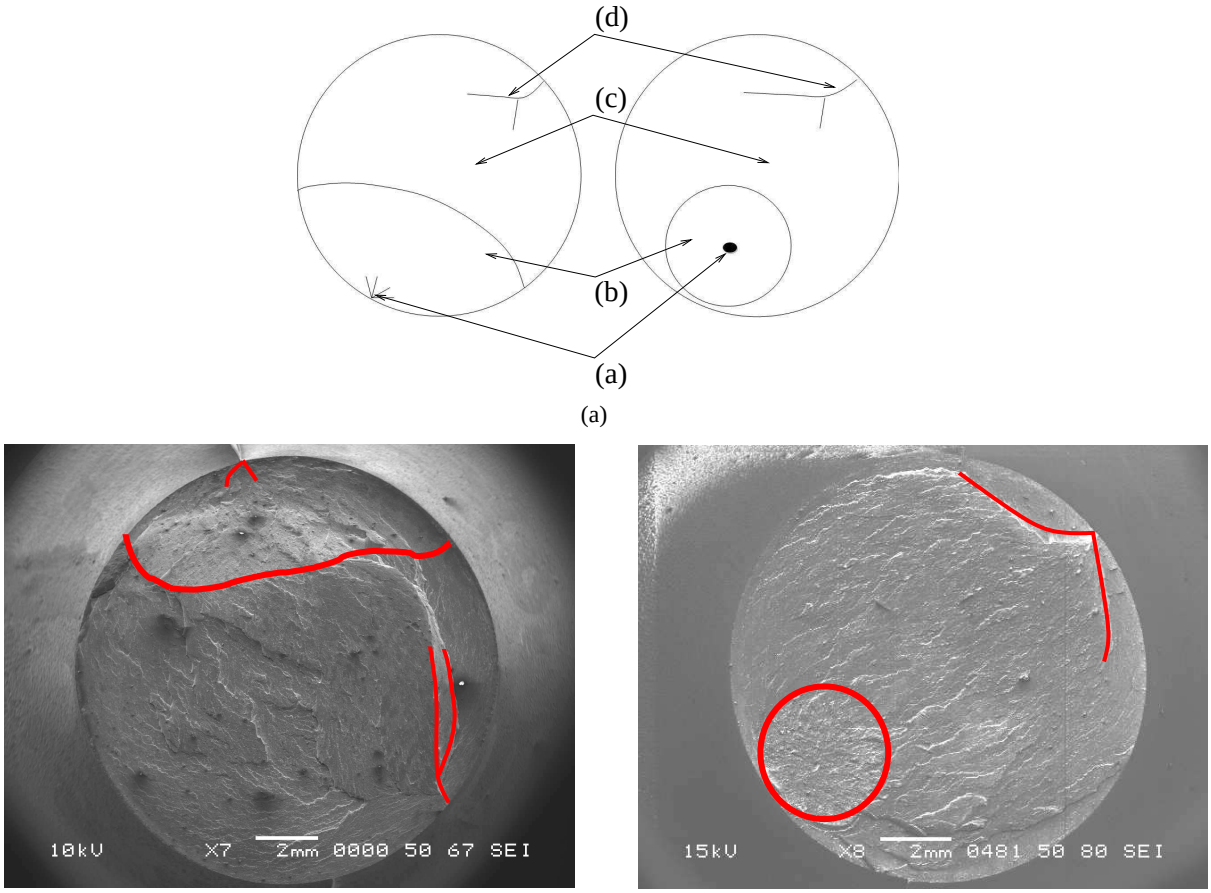
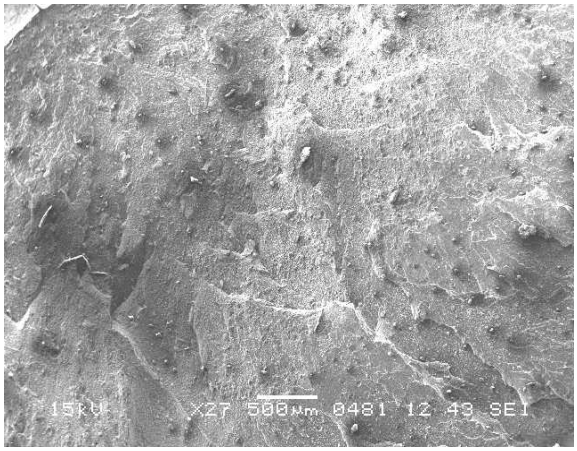


FIGURE 4.9 – Schématisation des faciès de rupture d'éprouvettes testées en fatigue en traction avec des rapports de charge positifs : (a) zone d'amorçage de fissure, (b) zone de propagation stable de fissure, (c) zone de fin de vie, (d) zone catastrophique de déchirement

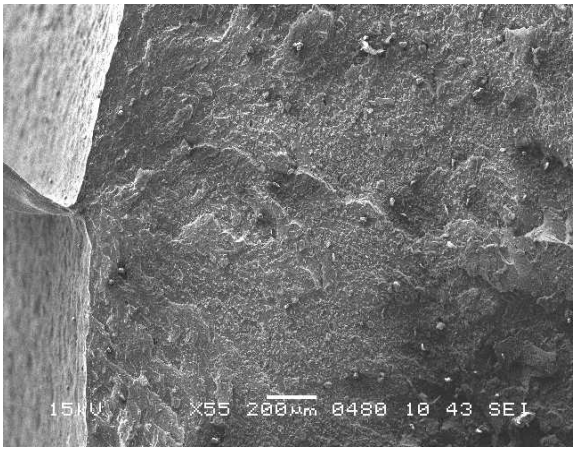
au sein de la matrice élastomère. Dans cette campagne de fatigue expérimentale, une grande majorité d'éprouvettes a rompu à partir du plan de joint (Poisson et al., 2011).
Afin de pouvoir quantifier les différences liées aux conditions de fatigue, une observation macroscopique, puis microscopique sera menée dans deux zones distinctes : la zone d'amorçage de fissure et la zone catastrophique. Nous avons montré (Poisson et al., 2011) des languettes en zone d'amorçage de fissure de faciès de rupture d'un polychloroprène, semblables à celles observées par Legorju-Jago (1998) sur du NR, par Lacroix (2004) sur du polychloroprène et par Gauchet (2007) sur du HNBR. Nous avons supposé la possibilité que ces languettes aient un lien avec la cristallisation du matériau sous contrainte, sans apporter d'éléments suffisants pour le prouver (Poisson et al., 2011). C'est pourquoi l'objectif de la partie suivante sera de quantifier l'influence des conditions de chargement dans la densité et la morphologie des languettes dans les deux zones étudiées. Nous allons maintenant nous focaliser sur la zone d'amorçage de fissure.

4.2.1 Zone d'amorçage de fissure

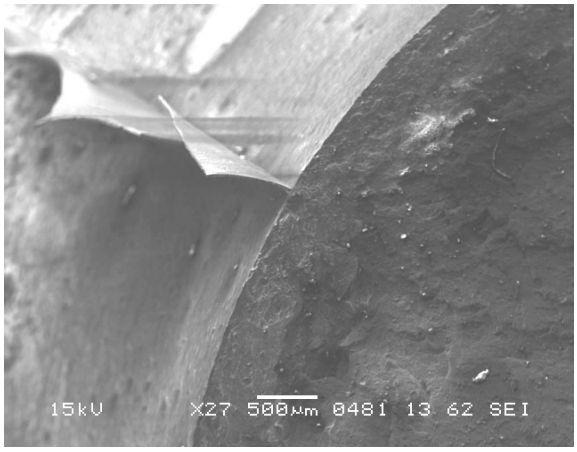
La morphologie de la zone d'amorçage de fissure a été observée pour des éprouvettes ayant subi des chargements en fatigue avec un rapport de charge variant de 0 à 0.4 (fig. 4.10). Les images ont été



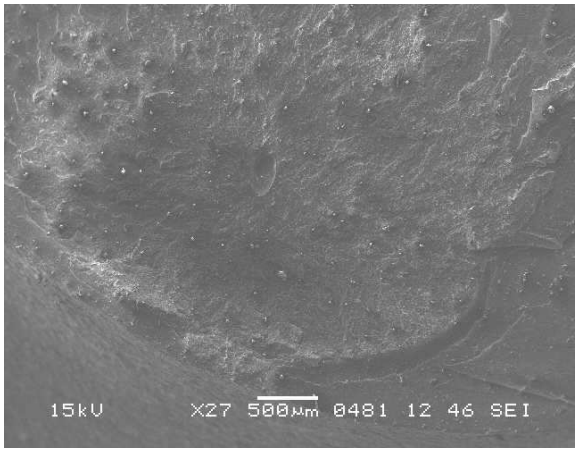
(a)



(b)



(c)



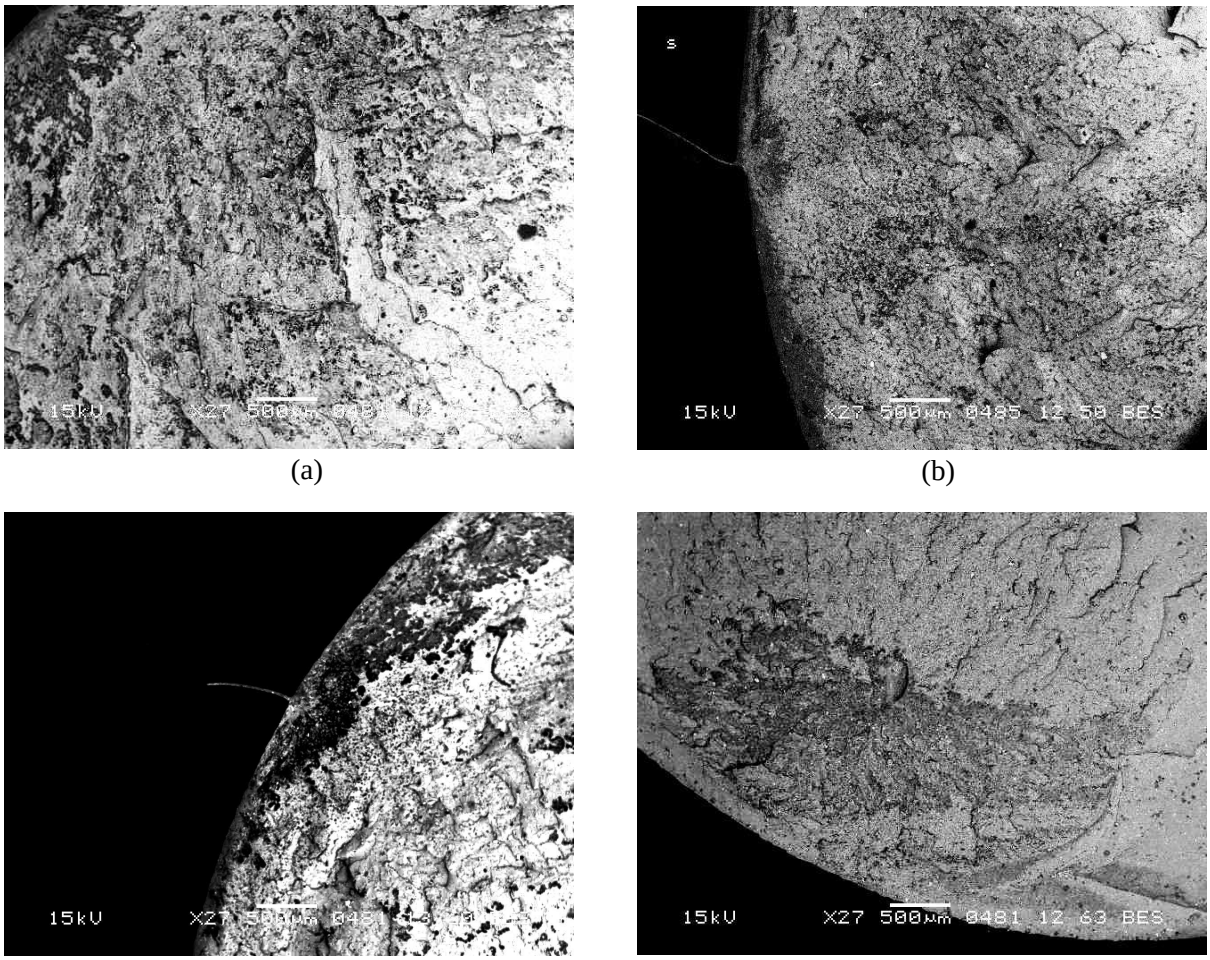
(d)

FIGURE 4.10 – Images de la zone d'amorçage de fissure, prises au MEB (Electrons secondaires), de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi un chargement en fatigue de traction, de force maximale 150 N, et de rapports de charge de (a) R=0 (40615 cycles), (b) R=0.1 (36730 cycles), (c) R=0.2 (99979 cycles), (d) R=0.4 (491075 cycles)

prises avec le détecteur d'électrons secondaires du MEB. Nous constatons une amorçage de fissure des trois premières éprouvettes en surface extérieure de celle-ci, et plus précisément au niveau de son plan de joint. L'amorçage à partir d'un défaut interne correspond à la plus forte durée de vie, ce qui rejoint l'analyse de Lacroix (2004), qui montre que les ruptures en surface extérieure aboutissent à des plus faibles durées de vie.
Des informations complémentaires sont obtenues à partir de l'observation des signaux émis par le détecteur d'électrons rétrodiffusés du MEB. La fig. 4.11 représente l'homologue de la fig. 4.10.

Dans la zone d'amorçage de fissure, il apparait des languettes noires, dont la densité semble diminuer avec le rapport de charge. Une description qualitative de l'influence du rapport de charge sur la densité de languettes est proposée (fig. 4.12)

L'évolution de la densité de languettes est comparée avec les durées de vie observées précédemment (fig. 4.11) pour différents rapports de charges. On constate que l'évolution de la densité de languette suit une tendance opposée à celle des durées de vie. D'autre part, il semble également qu'il y ait "inversion



(a) (b) (c) (d)

FIGURE 4.11 – Image de la zone d'amorçage de fissure prise au MEB (Electrons rétrodiffusés), de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi un chargement en fatigue de traction, de force maximale 150 N, et de rapports de charge de (a) R=0 (40615 cycles), (b) R=0.1 (36730 cycles), (c) R=0.2 (99979 cycles), (d) R=0.4 (491075 cycles)

des tendances" lorsque le rapport de charge est égal à 0.2, suggérant un changement dans le processus d'endommagement. Une observation, à plus fort grossissement, est proposée dans la fig. 4.13.

Nous pouvons voir que les languettes, que nous avions observées en zone d'amorçage de fissure, sont semblables à celles observées par Legorju-Jago (1998), Lacroix (2004), Gauchet (2007) et Poisson et al. (2011). La fig. 4.14 apporte plus de clarté sur la morphologie des languettes, présentées dans la fig. 4.13, avec l'information prise par le détecteur d'électrons secondaires.

Un regroupement important de languettes est observé pour les rapports de charge de 0 et 0.1. Celui-ci l'est beaucoup moins pour un rapport de charge de 0.2, et semble inexistant pour un rapport de charge $R = 0.4$, suivant la tendance exposée dans la fig. 4.12. D'autre part, pour $R = 0$, les languettes sont de forme "saillante", puis semblent s'arrondir avec l'augmentation du rapport de charge.

Dans ce paragraphe, nous avons vu que le rapport de charge, utilisé lors de la sollicitation en fatigue uniaxiale, influence la morphologie de la rupture du polychloroprène. L'analyse qualitative de la densité

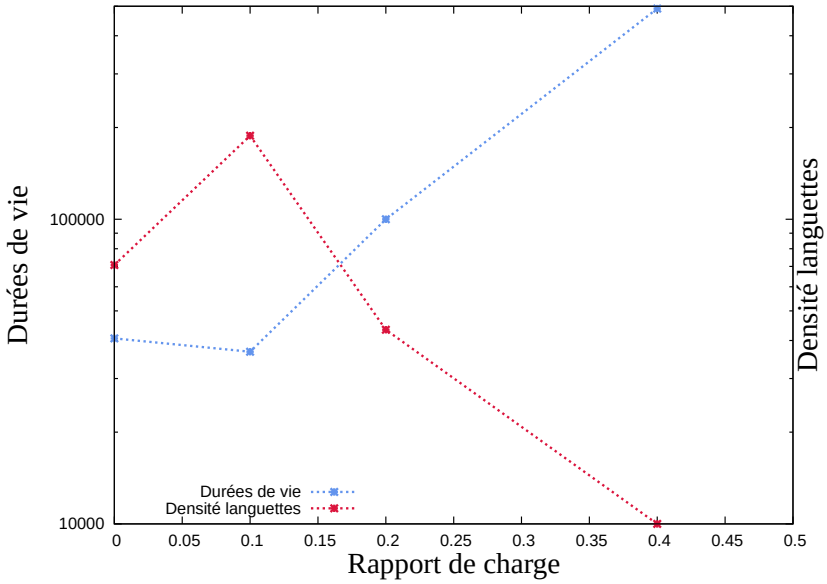
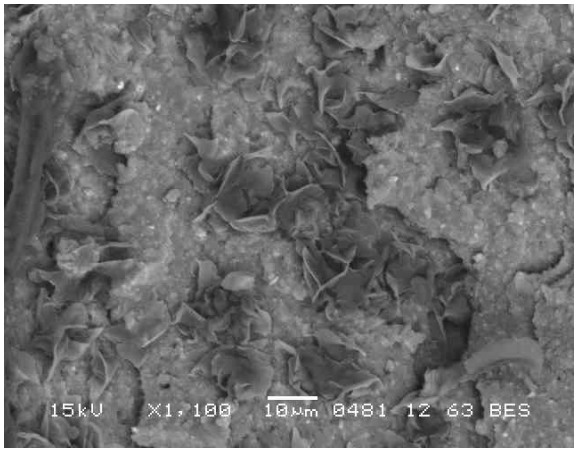
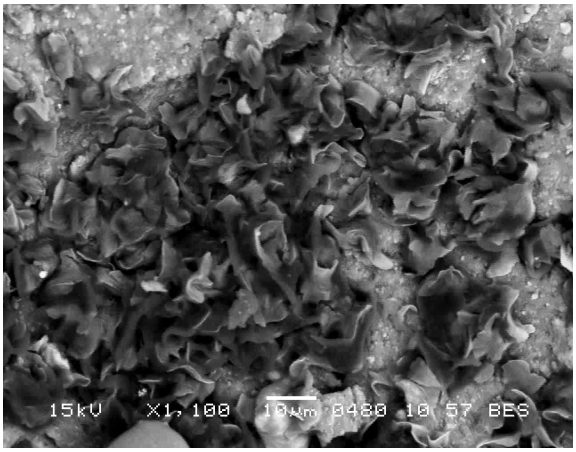


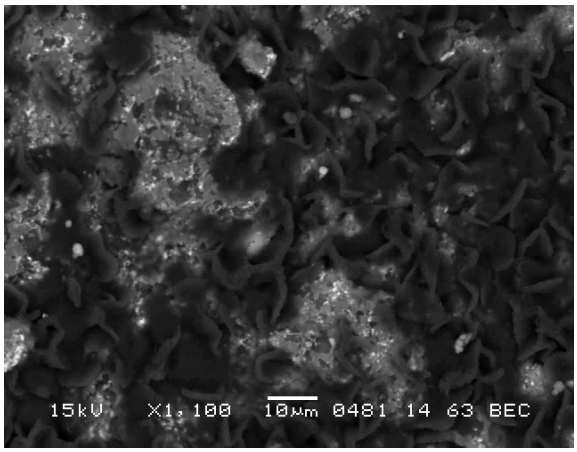
FIGURE 4.12 – Influence du rapport de charge sur la densité de languette et la durée de vie du matériau



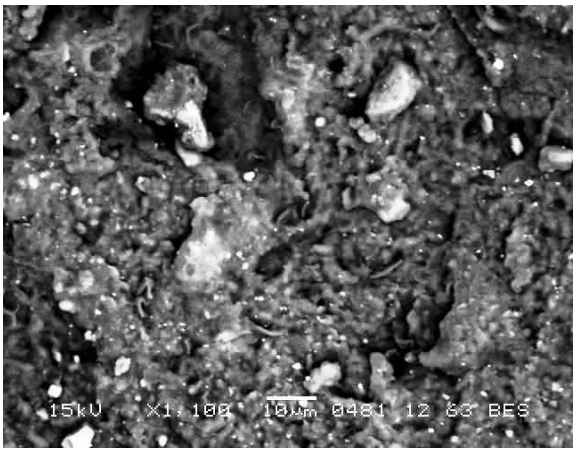
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 4.13 – Images de la zone d'amorçage de fissure, prises au MEB (Electrons rétrodiffusés), de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi un chargement en fatigue de traction, de force maximale 150 N, et de rapports de charge de (a) R=0 (40615 cycles), (b) R=0.1 (36730 cycles), (c) R=0.2 (99979 cycles), (d) R=0.4 (491075 cycles)

de languette suggère un changement dans l'endommagement en fatigue du matériau à partir d'un rapport de charge égal à 0.2. D'autre part, les languettes paraissent de morphologie différente (plus ou moins arrondie) suivant le chargement vécu par le matériau et semblent être constituées d'atomes légers car elles apparaissent en noir dans l'image obtenue avec le détecteur d'électrons rétrodiffusés.
L'observation du signal émis par ce détecteur est une méthode intéressante pour localiser la présence de languettes. Cette démarche sera utilisée pour qualifier leur densité zone de rupture catastrophique.

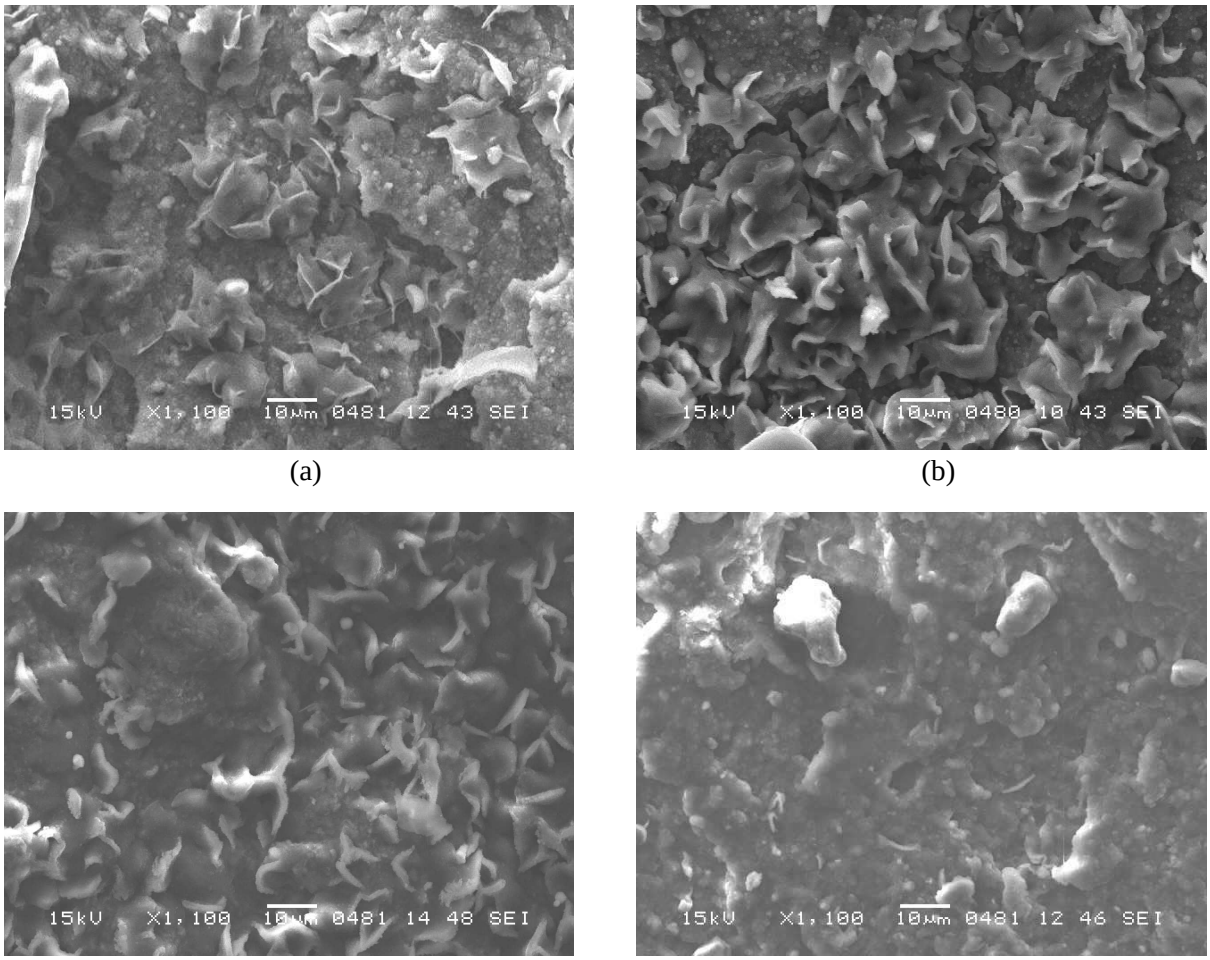


FIGURE 4.14 – Images de la zone d'amorçage de fissure, prises au MEB (Electrons secondaires), de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi un chargement en fatigue de traction, de force maximale 150 N, et de rapports de charge de (a) R=0 (40615 cycles), (b) R=0.1 (36730 cycles), (c) R=0.2 (99979 cycles), (d) R=0.4 (491075 cycles)

4.2.2 Zone de rupture catastrophique

Une première analyse est réalisée, dans cette zone, à faible grossissement (x 140), afin de pouvoir qualifier la densité de languettes dans cette zone suivant les conditions de fatigue vécues par le matériau (fig. 4.15).
Une description qualitative de l'influence du rapport de charge sur la densité de languettes est proposée (fig. 4.16). On constate que l'évolution de la densité de languette suit une tendance similaire à celle des

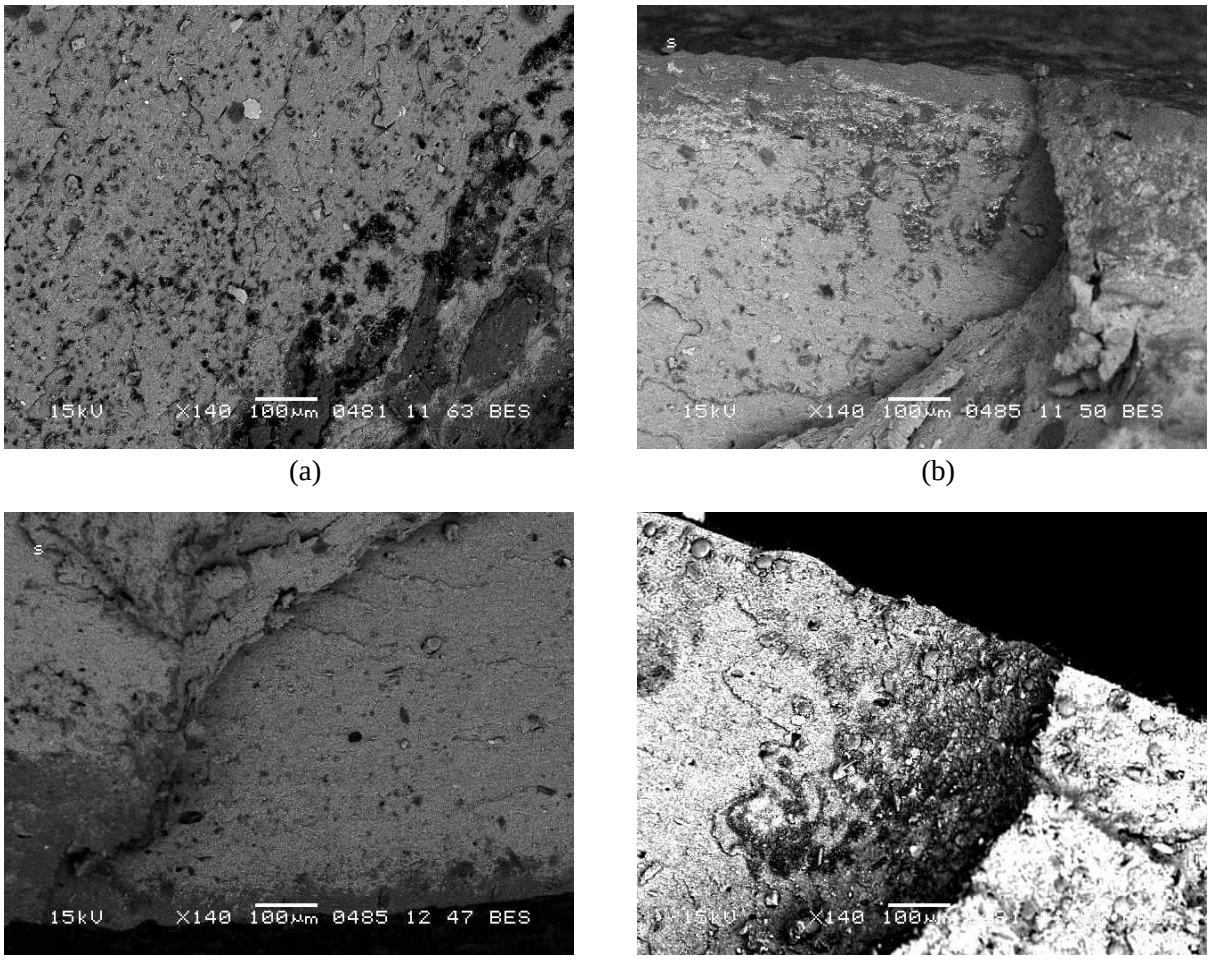


FIGURE 4.15 – Images de la zone de rupture catastrophique, prises au MEB (Electrons rétrodiffusés), de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi un chargement en fatigue de traction, de force maximale 150 N, et de rapports de charge de (a) R=0 (40615 cycles), (b) R=0.1 (36730 cycles), (c) R=0.2 (99979 cycles), (d) R=0.4 (491075 cycles)

durées de vie. D'autre part, il semble également qu'il y ait "inversion des tendances" lorsque le rapport de charge est égal à 0.2, suggérant un changement dans le processus d'endommagement.

La fig. 4.17 corespond à une image, prise au MEB avec le détecteur d'électrons rétrodiffusés, de la zone catastrophique du faciès de rupture pour différents rapports de charge. Le grossissement utilisé est x1100. Les images équivalentes prises avec le détecteur d'électrons secondaires sont présentées en figure 4.18.

L'observation des languettes, à l'échelle microscopique, corrobore celles réalisées à l'échelle macroscopique, avec une plus forte densité de languettes obtenue pour un rapport de charge égal à 0.4.
Les durées de vie en fatigue, indiquées pour chaque rapport de charge observé, nous ont permis de faire un rapprochement intéressant entre la densité des languettes et les durées de vies, et ce, pour les deux zones étudiées. Nous remarquons donc un changement de régime dans l'endommagement du matériau à partir d'un rapport de charge égal à 0.2. Ce résultat coïncide avec le changement, observé avec le diagramme de Haigh (fig. 3.38), dans le comportement en fatigue du polychloroprène. D'autre part,

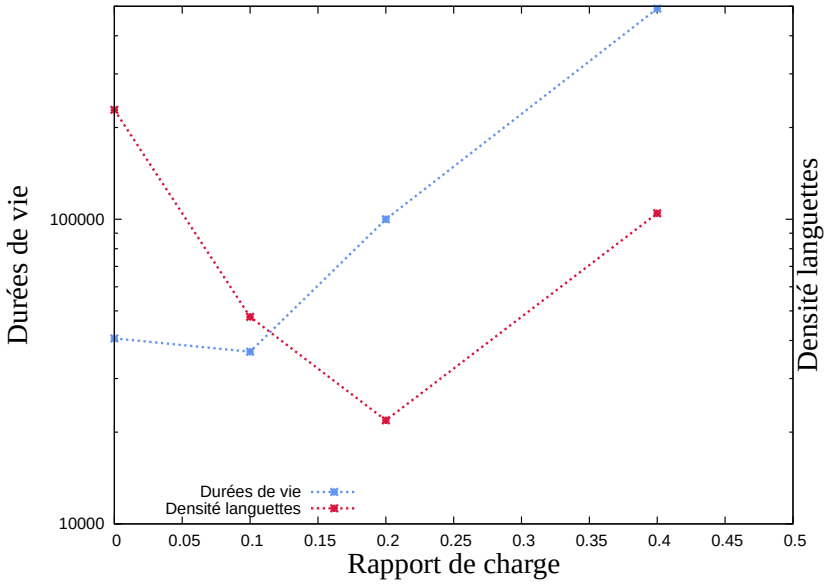
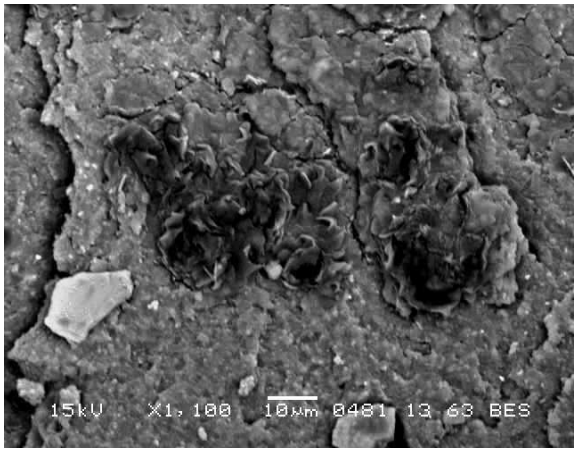
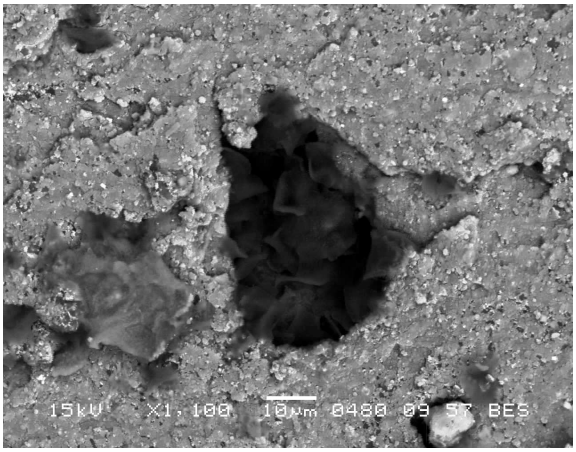


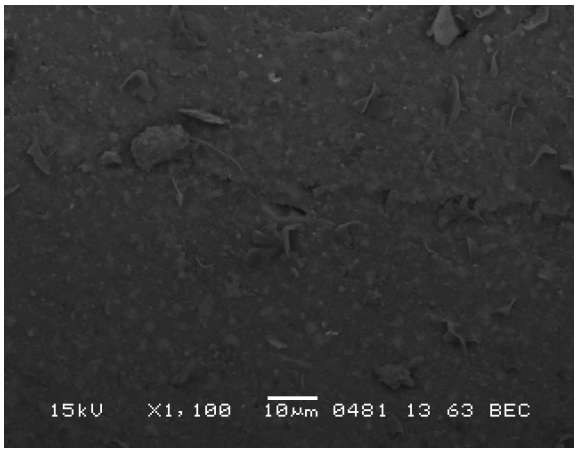
FIGURE 4.16 – Influence du rapports de charge sur la densité de languette et la durée de vie du matériau



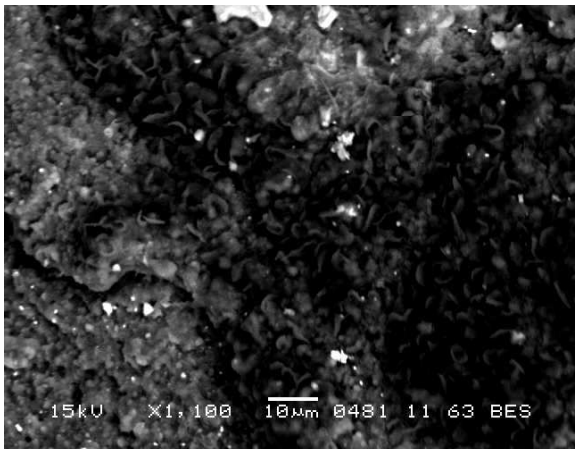
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 4.17 – Images de la zone de rupture catastrophique, prises au MEB (Electrons rétrodiffusés), de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi un chargement en fatigue de traction, de force maximale 150 N, et de rapports de charge de (a) R=0 (40615 cycles), (b) R=0.1 (36730 cycles), (c) R=0.2 (99979 cycles), (d) R=0.4 (491075 cycles)

nous constatons que la densité de languettes semble suivre l'évolution inverse de celle des durées de vie dans la zone d'amorçage de fissure, alors qu'elle adopte une tendance similaire à cette dernière dans la zone catastrophique. Ce résultat nous amène à nous poser des questions, car les languettes semblent représentatives de l'endommagement du matériau en zone d'amorçage de fissure, et caractéristiques de la tenue en fatigue dans la zone catastrophique. En effet, il semble plus naturel d'avoir des éléments représentatifs de la tenue en fatigue dans la zone d'amorçage de fissure.

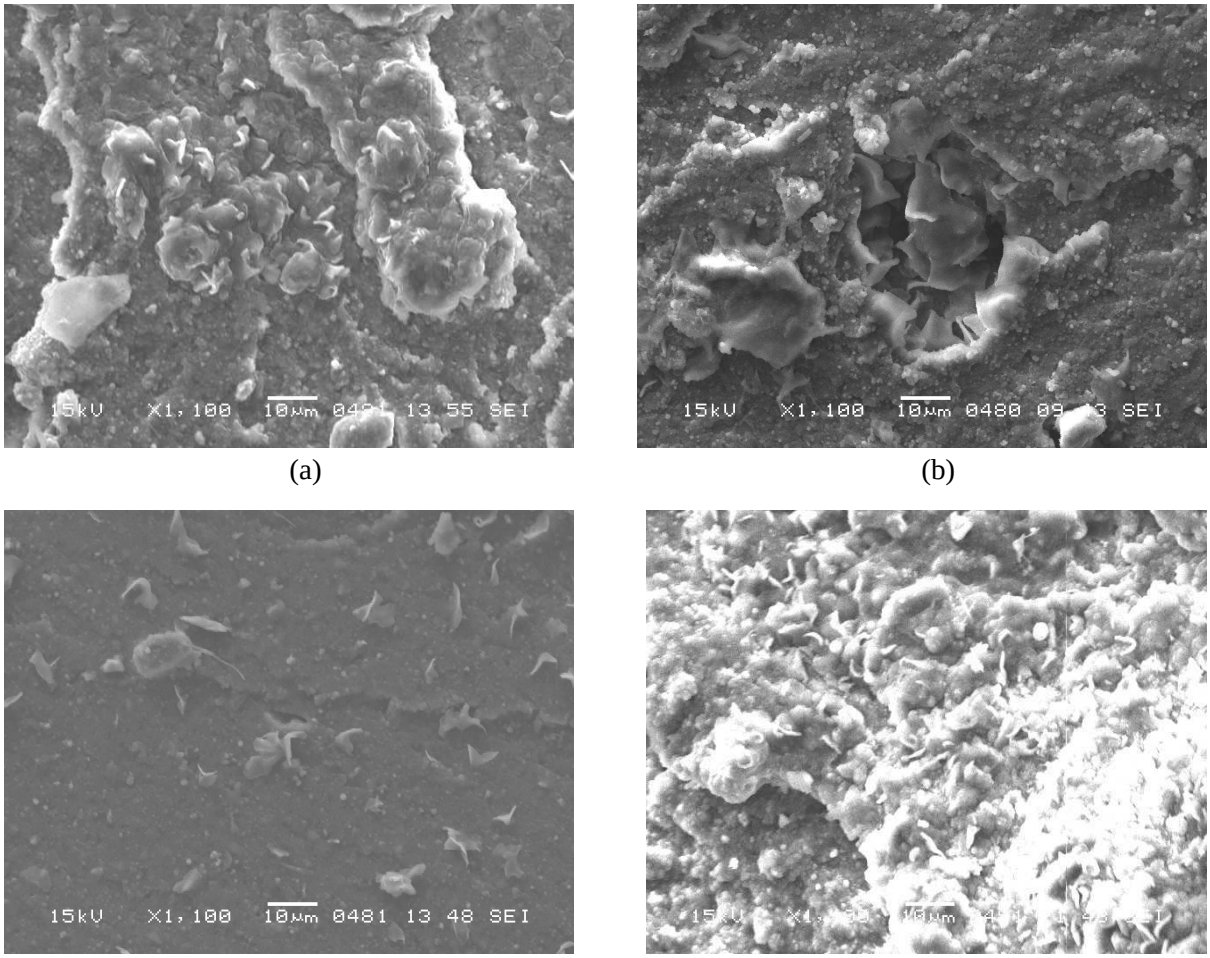


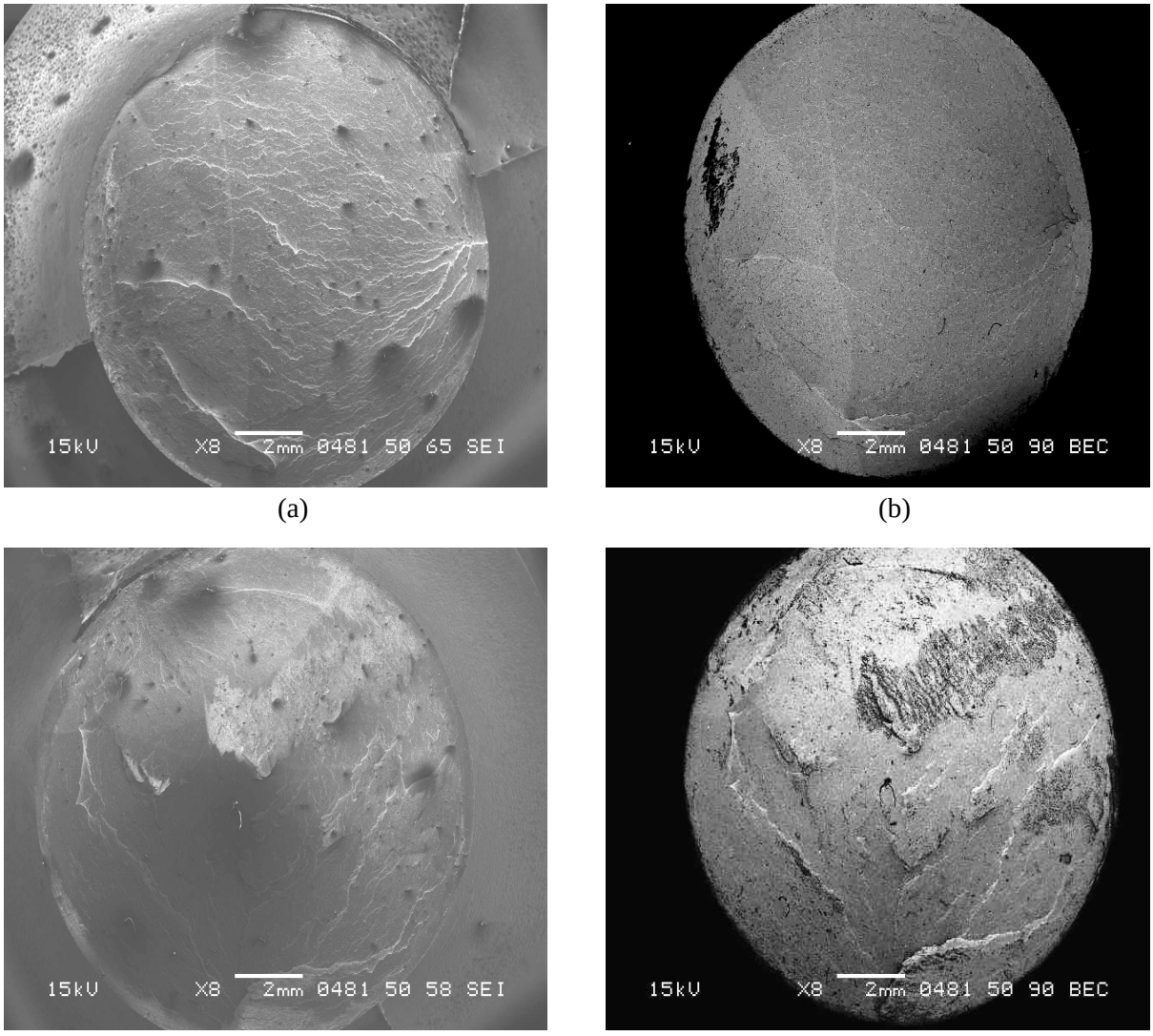
FIGURE 4.18 – Images de la zone de rupture catastrophique, prises au MEB (Electrons secondaires), de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi un chargement en fatigue de traction, de force maximale 150 N, et de rapports de charge de (a) R=0 (40615 cycles), (b) R=0.1 (36730 cycles), (c) R=0.2 (99979 cycles), (d) R=0.4 (491075 cycles)

4.3 Morphologie des chargements multiaxiaux

Nous allons observer les faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi des chargements en fatigue multiaxiale. La fig. 4.19 montre des images macroscopiques d'éprouvettes rompues, prises au MEB avec les détecteurs d'électrons secondaires (a et c) et les détecteurs d'électrons rétrodiffusés (b et d). Les images a et b représentent les images macroscopiques d'un diabolo rompu par un chargement multiaxial en traction-torsion proportionnel, alors que les images c et d correspondent à une rupture par chargement

multiaxial avec un déphasage de 180° entre la traction et la torsion.

> REMARQUE 4.1
> Les faciès de rupture des éprouvettes ayant subi des chargements multiaxiaux ont été choisis de sorte que la partie axiale du chargement soit équivalente aux conditions étudiées dans le paragraphe 4.2.



(a) (b) (c) (d)

FIGURE 4.19 – Images macroscopiques, prises au MEB, de faciès de rupture d'éprouvettes ayant subi des sollicitations en fatigue multiaxiales avec $d_{max} = 17mm$, $R_d = 0.1$ et (a) $\delta = 0^o$ (électrons secondaires) (74700 cycles), (b) $\delta = 0^o$ (électrons rétrodiffusés) (74700 cycles), (c) $\delta = 180^o$ (électrons secondaires) (41875 cycles) et (d) $\delta = 180^o$ (électrons rétrodiffusés) (41875 cycles)

La morphologie des faciès de rupture en fatigue multiaxiale semble proche de celles examinées dans le cas uniaxial, reprenant les zones définies dans la fig. 4.9. Le faciès présentant le plus de rugosité correspond à celui qui possède une durée de vie plus importante. En revanche, la surface correspondante

à la zone de propagation stable semble identique pour les deux éprouvettes, malgré une différence d'un facteur deux des durées de vie respectives.

L'image 4.19.b révèle la présence de taches noires en zone d'amorçage de fissures tandis que l'image 4.19.c ne montre pas de détails significatifs. Nous allons suivre une démarche similaire à celle réalisée pour l'analyse des ruptures en traction, et ainsi évaluer la densité de languettes dans les zones d'amorçage de fissure et de rupture catastrophique.

4.3.1 Zone d'amorçage de fissure

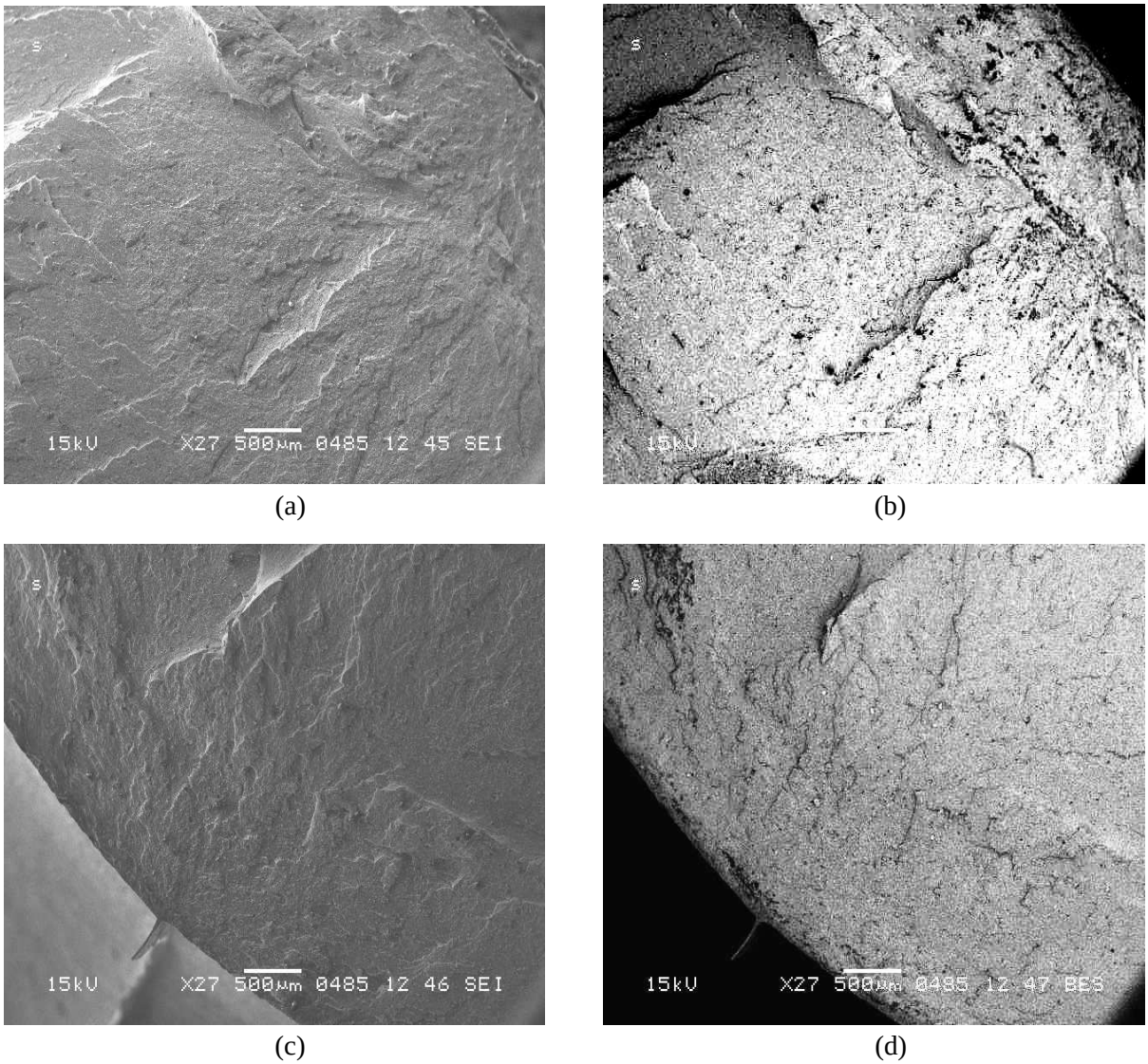
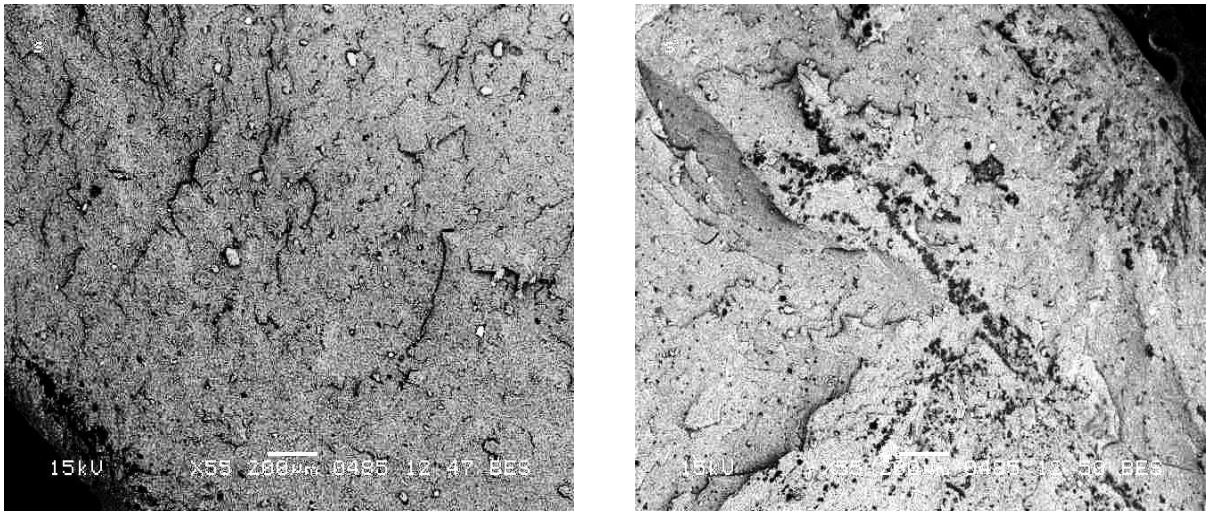


FIGURE 4.20 – Images de la zone d'amorçage de fissure de faciès de rupture, prises au MEB (x27), d'éprouvettes ayant subi des sollicitations en fatigue multiaxiales avec $d_{max} = 17mm$, $R_d = 0.1$ et (a) $\delta = 0^o$ (électrons secondaires) (74700 cycles), (b) $\delta = 0^o$ (électrons rétrodiffusés) (74700 cycles), (c) $\delta = 180^o$ (électrons secondaires) (41875 cycles) et (d) $\delta = 180^o$ (électrons rétrodiffusés) (41875 cycles)

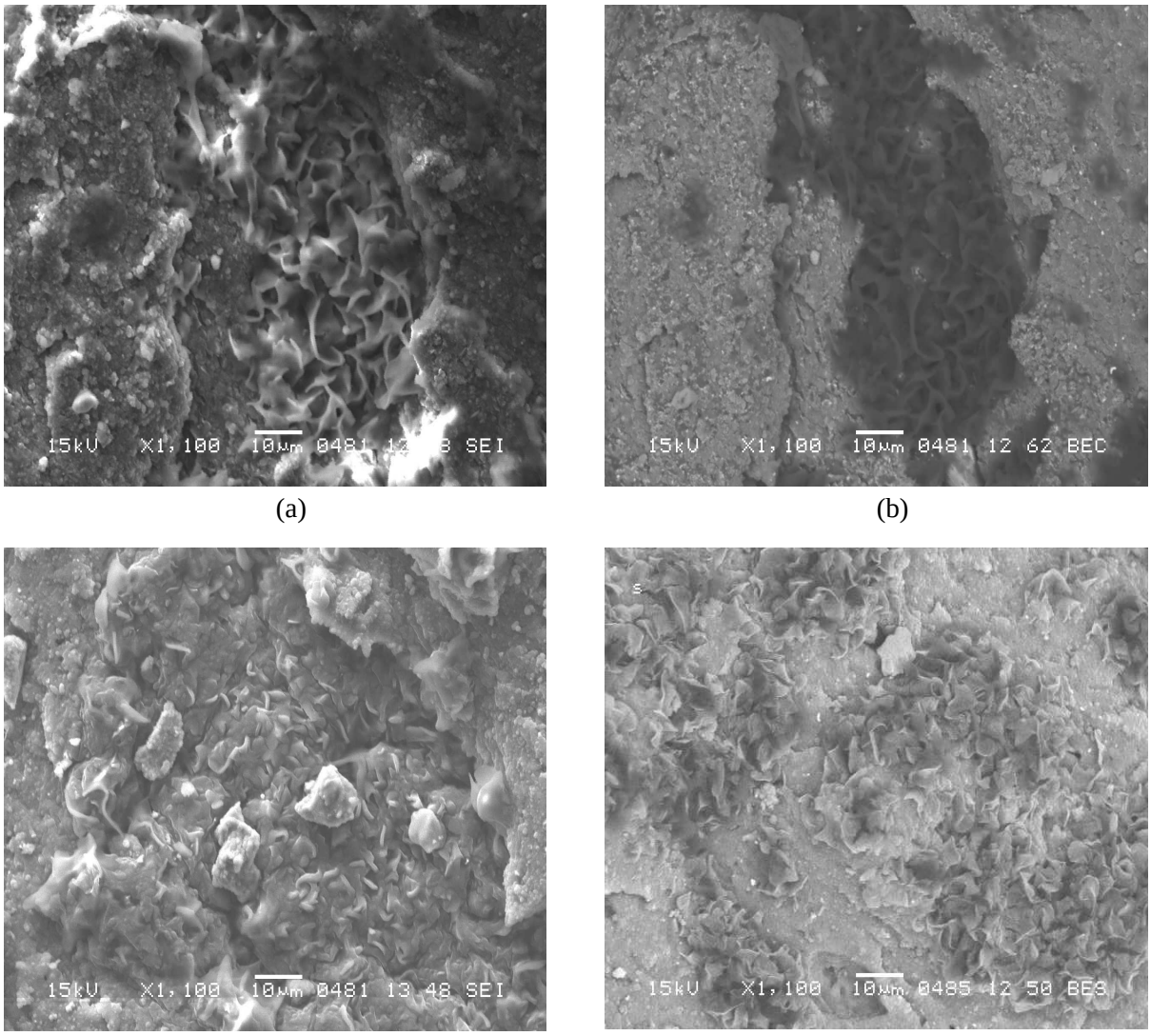
La fig. 4.21 apporte un grossissement plus important de la zone d'amorçage de fissure (x55), afin de pouvoir comparer la densité de languettes relative aux chargements multiaxiaux. Il s'avère que cette dernière est plus importante pour un déphasage de 180°, chargement donnant la plus faible durée de vie en fatigue. Ce résultat est cohérent avec les observations faites en traction, à savoir que les languettes semblent représenter l'endommagement du matériau en zone d'amorçage de fissure. Leur morphologie, en zone d'amorçage de fissure, est révélée dans la figure 4.22.



(a) (b)

FIGURE 4.21 – Images de la zone d'amorçage de fissure de faciès de rupture, prises au MEB (x55), d'éprouvettes ayant subi des sollicitations en fatigue multiaxiales avec $d_{max} = 17mm$, $R_d = 0.1$ et (a) $\delta = 0^o$ (électrons rétrodiffusés) (74700 cycles) et (b) $\delta = 180^o$ (électrons rétrodiffusés) (41875 cycles)

Globalement, la morphologie des languettes de fatigue multiaxiale est différente de celles de fatigue en traction. Cela peut être provoqué par la sollicitation de torsion. D'autre part, la rupture par fatigue multiaxiale proportionnelle semble provoquer des languettes plus regroupées, avec des formes "saillantes". Celles issues d'une sollicitation à déphasage de 180° paraissent plus réparties, plus nombreuses, mais également plus petites.



(a) (b) (c) (d)

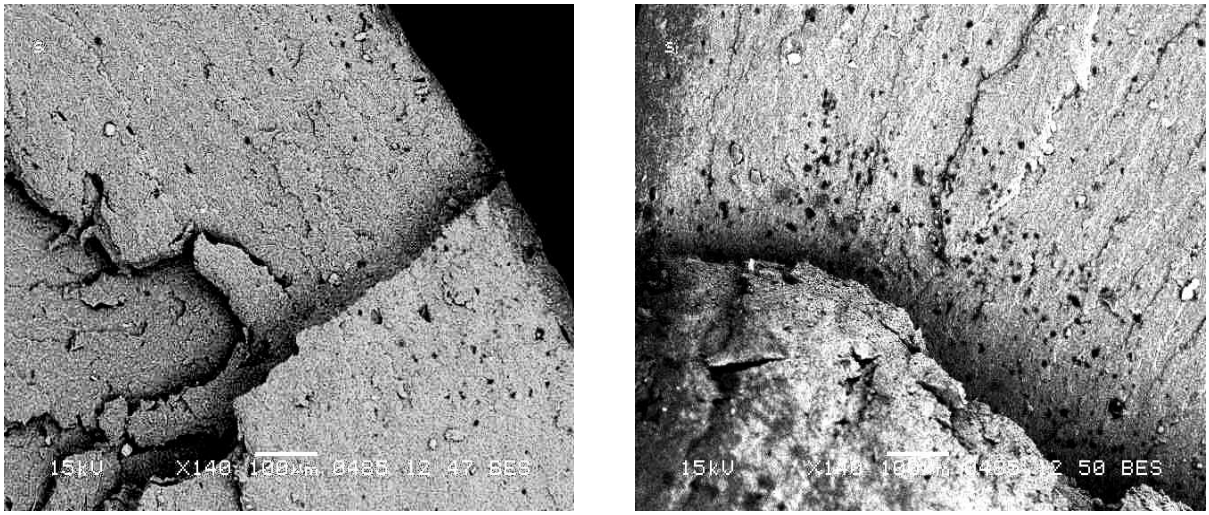
FIGURE 4.22 – Morphologie des languettes en zone d'amorçage de fissure d'éprouvettes ayant subi des sollicitations en fatigue multiaxiale avec $d_{max} = 17mm$, $R_d = 0.1$ et (a) $\delta = 0^o$ (électrons secondaires) (74700 cycles), (b) $\delta = 0^o$ (électrons rétrodiffusés) (74700 cycles), (c) $\delta = 180^o$ (électrons secondaires) (41875 cycles) et (d) $\delta = 180^o$ (électrons rétrodiffusés) (41875 cycles)

De la même façon que pour les observations réalisées avec les faciès de rupture en traction, nous allons maintenant étudier la densité et la morphologie des languettes en zone catastrophique.

4.3.2 Zone catastrophique

La fig. 4.23 montre la densité de languettes dans la zone catastrophique pour les deux sollicitations. La rupture de l'éprouvette par le chargement multiaxial proportionnel ne semble pas provoquer la création de languettes en zone catastrophique, contrairement à celle relative à une sollicitation possédant un déphasage de 180° entre la traction et la torsion. La fig. 4.24 confirme le constat effectué précédemment, à savoir l'absence de languettes dans les images a et b, et une faible densité de celles-ci pour les images

c et d. Ce résultat est contradictoire avec les observations réalisées en traction. En effet, la densité de languettes semble représentative de l'endommagement du matériau, et non de sa tenue en fatigue. Il se peut, toutefois, que la création de languettes, dans les faciès de rupture multiaxiale, soit anihilée par la sollicitation de torsion (Poisson et al., 2011).



(a) (b)

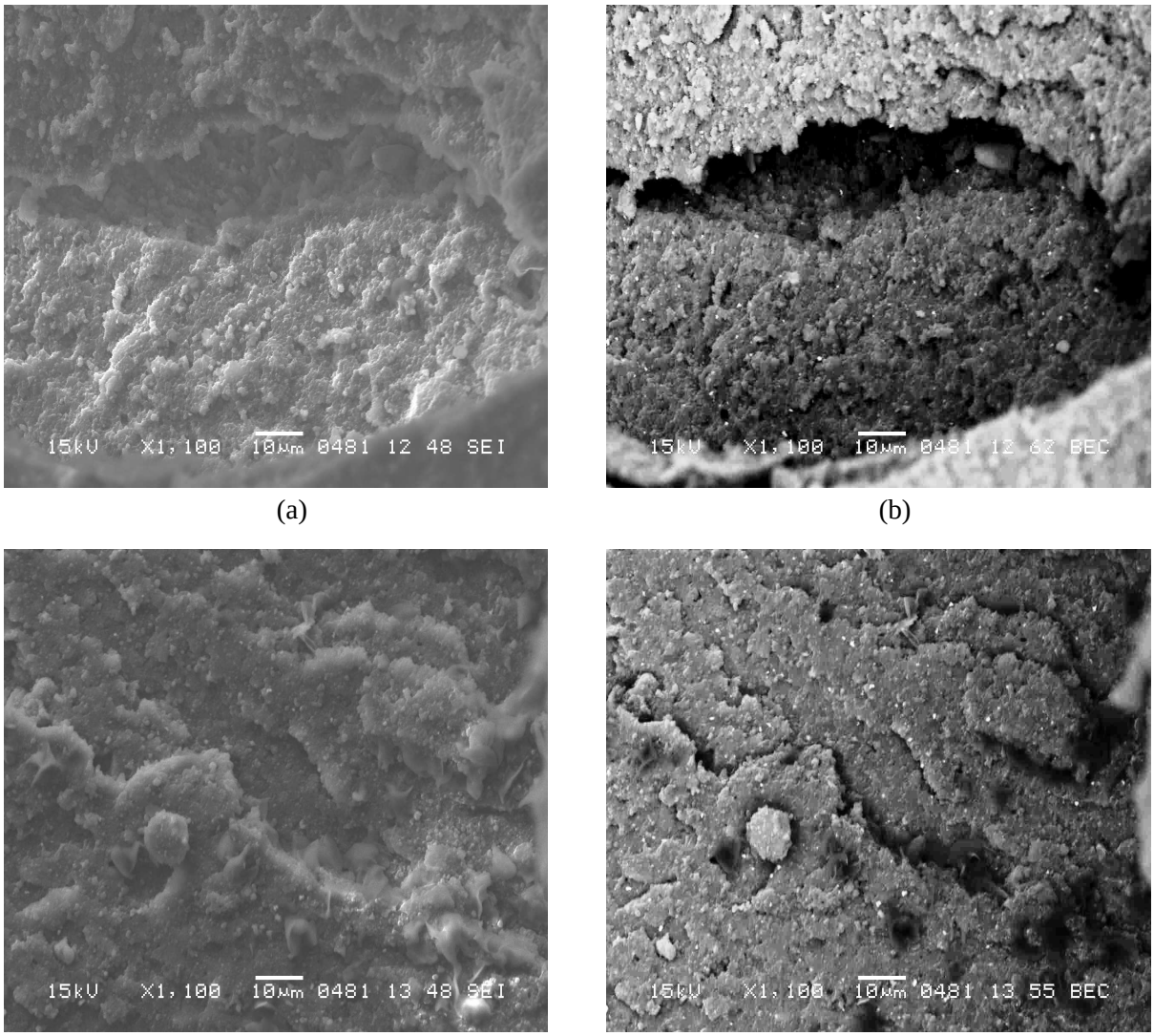
FIGURE 4.23 – Images de la zone catastrophique de faciès de rupture, prises au MEB (x140), d'éprouvettes ayant subi des sollicitations en fatigue multiaxiale avec $d_{max} = 17mm$, $R_d = 0.1$ et (a)$\delta = 0^o$ (74700 cycles), (b) $\delta = 180^o$ (41875 cycles)

4.4 Bilan

A l'échelle macroscopique, les faciès de ruptures des diabolos en CR se divisent en quatre zones distinctes : l'amorçage, la fatigue, la fin de vie et la rupture, en adéquation avec la littérature (Lacroix, 2004). Nous avons choisi de nous focaliser sur deux d'entre elles.

Zone d'amorçage de fissure

Lorsque le rapport de charge en traction augmente, la rugosité, dans cette zone, diminue. Cet effet est semblable à celui constaté par Gauchet (2007) avec l'augmentation de la contrainte maximale. Cela met donc en évidence que plus le rapport de charge augmente, et moins la sollicitation est endommageante. D'autre part, concernant les chargements multiaxiaux, le déphasage entre la traction et la torsion ne semble influencer ni la rugosité, ni la surface de la zone d'amorçage.
Quand nous comparons les faciès de rupture en traction et en traction-torsion, il apparait de plus fortes densités de languettes dans les zones d'amorçage relatives aux ruptures en traction. Il est possible que la torsion ralentisse la création de languettes. Si nous observons maintenant les durées de vie, il est intéressant de constater que les plus importantes semblent correspondre aux plus faibles densités de languettes. Cela semble contradictoire avec l'hypothèse que les languettes correspondent à la manifestation de cristallisation sous tension. D'autre part, d'un point de vue morphologique, il s'avère que plus le rapport de



(a) (b)

(c) (d)

FIGURE 4.24 – Images de la zone catastrophique de faciès de rupture, prises au MEB (x1100), d'éprouvettes ayant subi des sollicitations en fatigue multiaxiale avec $d_{max} = 17mm$, $R_d = 0.1$ et (a) $\delta = 0^o$ (électrons secondaires) (74700 cycles), (b) $\delta = 0^o$ (électrons rétrodiffusés) (74700 cycles), (c) $\delta = 180^o$ (électrons secondaires) (41875 cycles) et (d) $\delta = 180^o$ (électrons rétrodiffusés) (41875 cycles)

charge augmente, et plus les languettes sont de formes arrondies.

Zone catastrophique

Dans la zone catastrophique, en analysant l'influence du rapport de charge sur la densité de languettes, cette dernière diminue jusqu'à un rapport de charge de 0.2, puis augmente pour $R = 0.4$. Ce comportement est semblable à ce qui a été observé sur le diagramme de Haigh en traction (fig. 3.38) et le phénomène de renforcement du matériau à partir de $R = 0.2$. L'analyse des ruptures en traction-torsion