

Essais de rodage dynamique

Sommaire du chapitre 3

| | |
|---|----|
| Chapitre 3 : Essais de rodage dynamique..... | 71 |
| Sommaire du chapitre 3..... | 72 |
| Introduction | 73 |
| 1 Essais de rodage dynamique : objectifs et protocole..... | 74 |
| 1.1 Objectif et présentation de la campagne | 74 |
| 1.2 Protocole..... | 74 |
| 2 Influence de la durée de la première étape | 75 |
| 2.1 Comportement au cours de l'étape 1 | 76 |
| 2.2 Comportement au cours de l'étape 3 | 77 |
| 2.2.1 Groupe 1 : $N_{b1} = 100$ ou 200 cycles | 78 |
| 2.2.2 Groupe 2 : $N_{b1} = 500, 700, 800$ ou 1000 cycles | 79 |
| 2.2.3 Groupe 3 : $N_{b1} = 2000$ cycles | 81 |
| 2.2.4 Groupe 4 : $N_{b1} = 5000, 7000$ ou 9000 cycles | 82 |
| 2.3 Bilan des essais de rodage dynamique avec $F_{b1}=F_{b3}$ | 84 |
| 2.4 Courbe maîtresse | 85 |
| 3 Influence de la sollicitation lors de la troisième étape | 85 |
| 3.1 Protocole..... | 86 |
| 3.2 Comportement lors de l'étape 3 | 86 |
| 3.3 Courbes maîtresses | 88 |
| 3.4 Bilan | 90 |
| Conclusion..... | 91 |

Introduction

Ce chapitre va être centré sur l'étude de l'historique de chargement et de son impact sur le comportement en fatigue du polychloroprène à travers une campagne d'essais dits de « rodage dynamique ».

Ces essais sont composés de trois étapes successives : une première étape de précyclage, une deuxième étape de repos et une troisième étape de fatigue.

L'objectif de ces essais est de créer un historique de chargement lors de la première étape et d'observer son influence lors de l'étape trois de fatigue, l'étape de repos étant ajoutée pour que la température de l'éprouvette revienne à l'ambiante.

La première partie de ce chapitre portera sur l'étude de l'influence de la durée de la première étape sur le comportement en fatigue du CR lors de la troisième étape, les sollicitations étant par ailleurs égales.

La deuxième partie de ce chapitre investiguera le comportement du CR lors de la troisième étape si la sollicitation est plus faible que lors de la première étape.

1 Essais de rodage dynamique : objectifs et protocole

1.1 Objectif et présentation de la campagne

L'objectif de cette partie est dans un premier temps de confirmer le modèle d'évolution de l'endommagement lors d'un essai de fatigue. Pour cela, nous avons mis en place des essais dits de rodage dynamique dont le principe est de réaliser des essais de précyclage suivi d'un temps de repos puis un autre cyclage jusqu'à la fin de vie et de le comparer à un essai vierge de précyclage.

Ces essais de rodage dynamiques consistent donc en la succession de trois étapes (ou blocs) : une première pendant laquelle une sollicitation endommageante est appliquée pendant un nombre de cycles pouvant aller de 1 à 90% de la durée de vie. Suit une étape de repos puis une dernière étape à une sollicitation donnée jusqu'à rupture de l'éprouvette ou arrêt de l'essai par l'opérateur. L'étape de repos doit permettre à l'éprouvette de voir sa température revenir au niveau de celle ambiante au début de l'étape 3.

Nous allons ici investiguer l'impact de deux paramètres : la durée de la première étape et la sollicitation appliquée lors de la dernière étape.

NB :

- *Dans ce chapitre, il faut bien garder à l'esprit la distinction entre « étape » qui correspond aux cyclages à une même sollicitation et « phase » qui fait référence aux phases d'évolution de l'aire de l'hystérésis vues dans le chapitre 2.*
- *Nous parlerons également souvent d'essais de fatigue à amplitude constante. Ces derniers sont des essais de fatigue classique, par opposition aux autres essais présentés qui eux sont à amplitude variable.*

1.2 Protocole

Les essais ont été menés sur une machine Instron 8802 en utilisant les éprouvettes en polychloroprene et de forme diabolos tels que décrits dans le chapitre 2 (§1.2).

Les sollicitations appliquées lors de ces essais sont à effort contrôlé, uniaxiaux et suivant un signal sinusoïdal à une fréquence de 5Hz. Nous travaillons également à un rapport de charge R de 0,1.

Comme le montre la Figure 3. 1, l'essai se décompose en trois étapes.

- L'étape 1 consiste en un bloc où l'éprouvette est soumise à un effort maximal $F_{b1} = 175N$ (correspondant à une contrainte alternée de 0,67MPa) pendant un nombre de cycle noté N_{b1} . Cette sollicitation est endommageante dans le sens où la durée de vie dans ces conditions est de 10^4 cycles.
- La deuxième étape est une étape de repos au cours de laquelle l'éprouvette est détachée du vérin et ne travaille pas pendant $t_{b2} = 25$ minutes. Cette étape de repos a donc pour but de laisser l'éprouvette refroidir jusqu'à la température ambiante. Le temps nécessaire pour que l'éprouvette revienne à la température ambiante a été déterminé lors de mesures thermiques que nous détaillons plus loin de ce manuscrit (Figure 3. 2).
- La troisième étape consiste en un bloc pendant lequel l'éprouvette est soumise à un effort maximal F_{b3} jusqu'à rupture de l'éprouvette ou arrêt de l'essai correspondant dans les deux cas à un nombre de cycles N_{b3} (le type de fin d'essai est précisé pour chaque campagne).

Ce protocole est valable pour les deux campagnes d'essais que nous allons présenter.

Dans le premier cas, nous avons investigué l'influence de la durée de la première étape sur le comportement en fatigue lors de la troisième étape. Pour cela, nous avons fixé l'effort appliqué au cours de l'étape 3 F_{b3} égal à celui appliqué lors de la première étape F_{b1} , et fait varier la durée de la première étape entre 1% et 90% de la durée de vie en fatigue.

Dans le deuxième cas, nous avons observé le comportement d'une éprouvette, qui a été endommagée lors de la première étape, soumise à un effort lors de l'étape 3 F_{b3} plus faible que F_{b1} . Pour cela, la durée de la première étape a alors été fixée à 5000 cycles, soit 50% de la durée de vie en fatigue à F_{b1} et $R=0,1$.

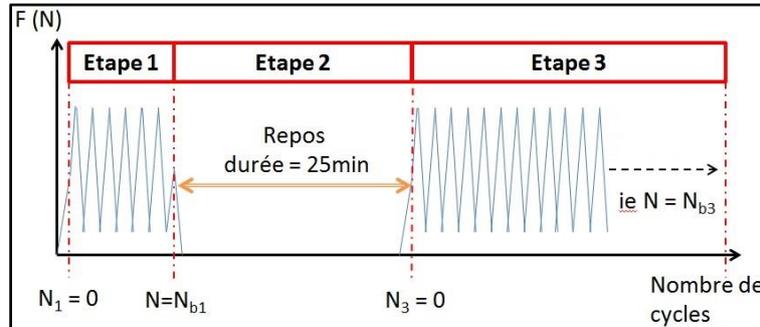


Figure 3. 1 – Evolution de la sollicitation qui s'exerce sur l'éprouvette pendant un essai de rodage dynamique.

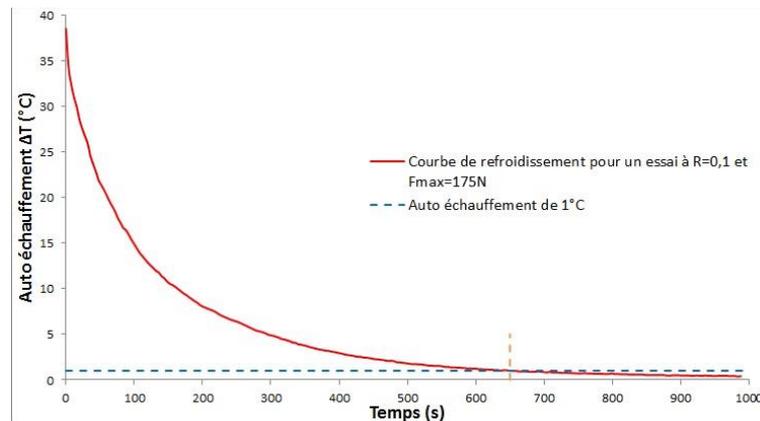


Figure 3. 2 – Courbe de refroidissement après un essai à $R=0,1$ et $F_{max}=175N$

2 Influence de la durée de la première étape

Ce paragraphe est consacré à l'observation de l'influence de la durée de la première étape (étape de rodage dynamique) sur le comportement en fatigue de l'éprouvette lors de la troisième étape de l'essai.

Lors de cette campagne, la sollicitation maximale lors des étapes 1 et 3 est fixée à 175N et chaque essai s'est achevé, pendant l'étape 3, par la rupture de l'éprouvette.

La durée de l'étape 1 N_{b1} est alors le paramètre que nous avons fait varier suivant des valeurs définies à partir du diagramme d'évolution de l'aire d'hystérésis vue au chapitre 2 (§3). La Figure 3. 3 rappelle cette évolution ainsi que les trois phases précédemment définies. Les différentes durées de l'étape 1 sont indiquées par des pointillés bleus (Tableau 3. 1). Ces dernières ont été choisies de manière à représenter les trois phases d'évolution de l'aire d'hystérésis au cours d'un essai de fatigue.

La durée de la première étape est choisie de 100 à 9000 cycles, soit 1% à 90% de la durée de vie en fatigue de l'essai de référence. Afin de prendre en compte la dispersion, de trois à cinq essais ont

Chapitre 3 : Essais de rodage dynamique

été effectués pour chaque configuration. Celle-ci ayant été la plupart du temps limitée, nous ne montrerons que les essais médians pour chacune de ces configurations pour que les graphiques restent lisibles. Les cas où la dispersion entre les essais n'est pas négligeable seront évidemment signalés.

Nous allons à présent observer le comportement des éprouvettes lors des étapes de ces essais de rodage dynamique.

NB :

- *L'essai de référence de cette partie est l'essai de fatigue à amplitude constante, rapport de charge 0,1, fréquence 5Hz et effort maximal 175N sur une éprouvette diabolo et présenté dans le chapitre 2.*

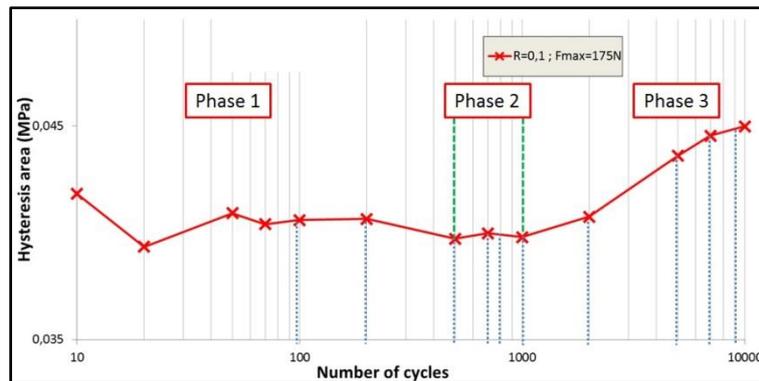


Figure 3. 3 – Evolution de l'aire de l'hystérésis au cours de l'essai de référence en fatigue à amplitude constante pour $R = 0,1$ et $F_{\max} = 175N$.

| Durée de l'étape 1 (cycles) | % de la durée de vie en fatigue | Nombre d'essais dans cette configuration |
|-----------------------------|---------------------------------|--|
| 100 | 1% | 3 |
| 200 | 2% | 3 |
| 500 | 5% | 5 |
| 700 | 6% | 4 |
| 800 | 7% | 1 |
| 1000 | 9% | 3 |
| 2000 | 18% | 4 |
| 5000 | 45% | 4 |
| 7000 | 64% | 3 |
| 9000 | 82% | 3 |

Tableau 3. 1 – Liste des durées de l'étape 1 lors de la campagne de rodage dynamique investiguant l'impact de la durée de l'étape 1 sur le comportement en fatigue lors de l'étape 3.

2.1 Comportement au cours de l'étape 1

Nous allons dans un premier temps observer le comportement des éprouvettes lors de l'étape 1 en suivant l'évolution de l'aire de l'hystérésis et de la raideur.

La Figure 3. 4 montre l'évolution de l'aire de l'hystérésis pour tous les essais lors de l'étape 1. Il apparaît très logiquement que celles-ci sont très proches de la référence. Nous retrouvons donc les

différentes phases de l'évolution de l'aire de l'hystérésis. La dispersion entre les essais dans les 500 premiers cycles est également présente.

En ce qui concerne l'évolution de la raideur (Figure 3. 5), nous retrouvons une évolution logarithmique. Il apparaît néanmoins que la raideur initiale est plus importante que pour l'essai de référence avant que les courbes se rejoignent aux alentours de 500 cycles. Cela peut s'expliquer par l'écart de temps entre l'essai de référence et la campagne de rodage dynamique d'environ 10 mois. Nous avons vu dans le chapitre 2 que le CR réticulait de façon continue avec le temps. Les conditions de stockage nous ont permis de ralentir ce processus. Néanmoins, il semblerait qu'ici les éprouvettes soient un peu plus réticulées, d'où l'écart de raideur initiale.

La faible différence de comportement avec les courbes de référence de la raideur et de l'aire de l'hystérésis nous laisse penser que l'impact de cette survulcanisation reste mineur.

Une fois cette étape finie, l'éprouvette est mise au repos pour l'étape 2.

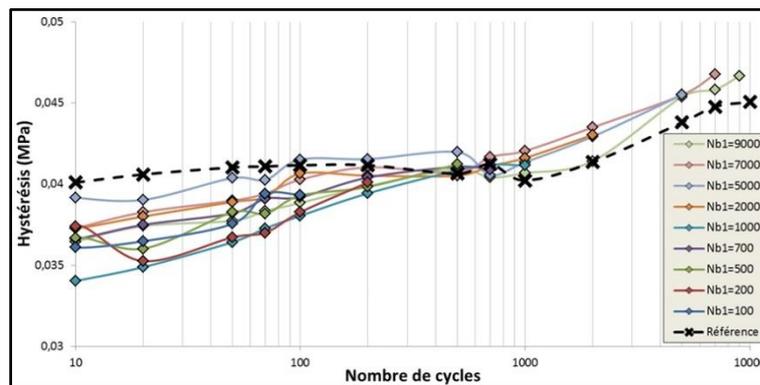


Figure 3. 4 – Evolution de l'aire de l'hystérésis lors de la première étape des essais de rodage dynamique pour différentes durées de l'étape 1.

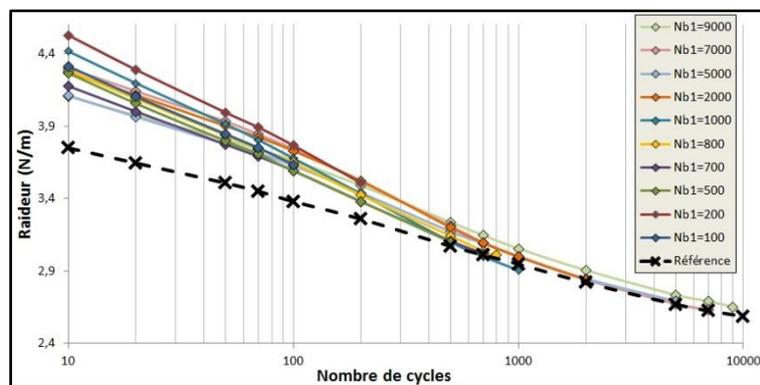


Figure 3. 5 – Evolution de la raideur lors de la première étape des essais de rodage dynamique pour différentes durée de l'étape 1.

2.2 Comportement au cours de l'étape 3

Une fois l'étape de repos terminée, les éprouvettes subissent une troisième étape dans exactement les mêmes conditions : un essai de fatigue à rapport de charge 0,1, effort maximal de 175N et fréquence de 5Hz.

Il faut rappeler qu'au début de cette étape, l'éprouvette est dans un état structural que nous qualifierons d'identique à son état en fin de première étape (donc en présence de fissures si l'étape 1 a été assez longue) avec une température de l'ordre de l'ambiante.

L'aire de l'hystérésis (Figure 3. 6) et la raideur (Figure 3. 7) exhibent des comportements très différents lors de l'étape 3 par rapport à l'étape 1. Il apparaît que ces comportements dépendent de la durée de l'étape 1 subie par l'éprouvette.

L'observation de ces évolutions nous permet de diviser en quatre groupes les essais montrant des caractéristiques très proches.

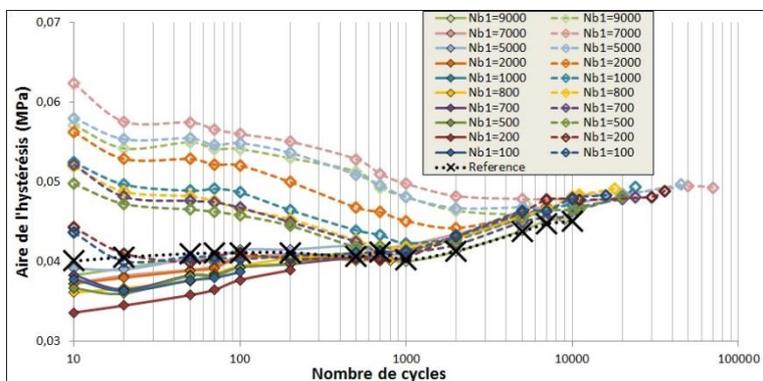


Figure 3. 6 – Evolution de l'aire de l'hystérésis pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides). Les noms des courbes « N_{b1} » correspondent à la durée de l'étape 1.

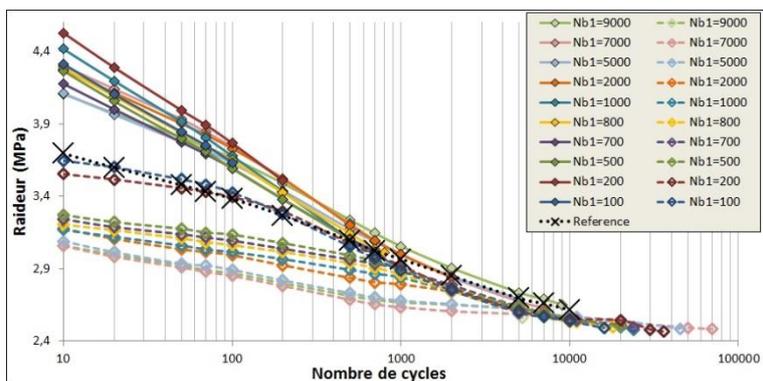


Figure 3. 7 – Evolution de la raideur pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides). Les noms des courbes « N_{b1} » correspondent à la durée de l'étape 1.

2.2.1 Groupe 1 : $N_{b1} = 100$ ou 200 cycles

Ces essais ont vu leur première étape arrêtée au bout de 100 ou 200 cycles (soit 1 ou 2% de la durée de vie en fatigue). Cela signifie un arrêt en cours de phase 1 d'évolution de l'aire de l'hystérésis. Les évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur pour ces courbes sont mises en avant sur la Figure 3. 8 et Figure 3. 9.

L'évolution de l'aire de l'hystérésis au cours de l'étape 3 pour ces deux essais est très proche de la référence à partir d'un certain nombre de cycles. En effet, la jonction avec la courbe de référence se fait à partir d'un nombre de cycle égal à la durée de la première étape N_{b1} . (faire ressortir sur graphe)

En revanche, la raideur en début de troisième étape chute par rapport à celle en début de y étape et est même plus faible que la raideur initiale de la courbe de référence. On observe de plus que cette raideur initiale est plus faible pour une première étape ayant durée 200 cycles que pour 100 cycles. Néanmoins, une jonction avec la courbe de référence s'effectue à un nombre de cycle égal à N_{b1} (comme pour l'évolution de l'aire de l'hystérésis).

Ce regroupement d'essais a comme point commun d'avoir été arrêté lors de la première étape au cours de la phase 1 d'évolution de l'aire de l'hystérésis (ie $N_{b1} < 500$ cycles). Or au cours de cette

phase, nous avons vu dans le chapitre 2 que l'éprouvette n'est que très peu fissurée et subit surtout de la déréticulation. Cela est cohérent avec les observations sur le comportement du CR lors de la troisième étape du rodage dynamique :

- La très faible taille des fissures créées lors de la première étape (<100µm cf paragraphe X du chapitre 2) influe très peu sur l'évolution de l'aire de l'hystérésis au cours de la troisième étape.
- La déréticulation créée lors de la première étape se ressent dans les premiers cycles de l'étape 3 avec une diminution de la raideur.

On notera également que la durée de la troisième étape est de l'ordre de deux fois la durée de vie en fatigue (Figure 3. 16). Ce résultat n'est pas inattendu puisqu' [Harbour et al. 2008] ont montré qu'un court précyclage pouvait effectivement augmenter la durée de vie en fatigue.

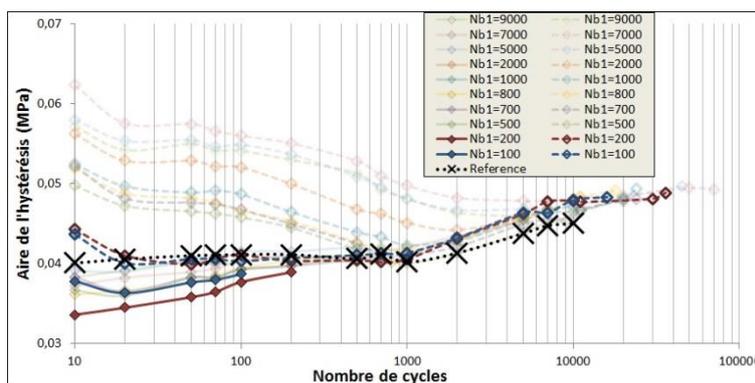


Figure 3. 8 – Evolution de l'aire de l'hystérésis pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides) pour les essais du groupe 1.

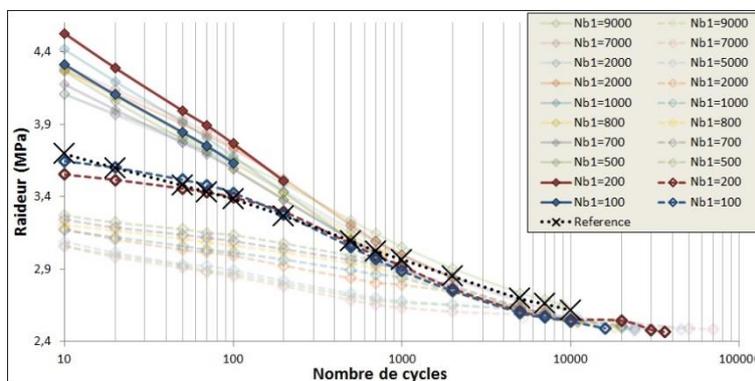


Figure 3. 9 – Evolution de la raideur pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides) pour les essais du groupe 1.

2.2.2 Groupe 2 : $N_{b1} = 500, 700, 800$ ou 1000 cycles

Ces essais ont vu leur première étape arrêtée entre 500 et 1000 cycles (soit 5 à 10% de la durée de vie en fatigue). Cela signifie un arrêt en cours de phase 2 d'évolution de l'aire de l'hystérésis.

Les essais composants ce deuxième groupe ont un comportement très proche au cours de cette troisième étape. Les évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur pour ces courbes sont mises en avant sur la Figure 3. 10 et Figure 3. 11.

L'aire de l'hystérésis montre une augmentation de la valeur initiale par rapport à celle de la référence. Il s'en suit une décroissance jusqu'à ce que la courbe ait rejoint celle de référence. A partir de ce moment, les deux évolutions sont confondues. On observe que cette jonction se fait à un nombre de cycle égal à la durée de la première étape N_{b1} .

Chapitre 3 : Essais de rodage dynamique

En ce qui concerne l'évolution de la raideur, la valeur en début de troisième étape est plus faible que celle initiale de la référence. La courbe évolue avec une pente plus faible que celle de la référence pour que ces dernières se rejoignent à un nombre de cycle égal à Nb_1 . On peut noter qu'une courbe d'un essai du groupe 2 est située en dessous de celles du groupe 1.

On note également que, pour les évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur, plus tard l'étape 1 s'arrête, plus la différence entre la valeur en début d'étape 3 avec celle de la référence sera importante.

On a observé dans le chapitre 2 que la phase 2 d'évolution de l'aire de l'hystérésis était une phase où la propagation des fissures est équilibrée par la cristallisation sous tension en fond de ces fissures. Il n'empêche que :

- La zone cristallisée n'est pas présente pendant tout le cycle, ce qui signifie que la fissure peut se propager pendant cette phase mais cela reste très lent.
- Les mesures de tomographie par rayon X (§4.2 du chapitre 2) ont montré que le nombre total de fissures augmentait pendant tout un essai de fatigue, et donc en particulier entre 500 et 1000 cycles.

Donc, la différence en terme de valeur de début de troisième étape entre les courbes de ce groupe peuvent s'expliquer par une augmentation légère de l'endommagement entre l'éprouvette arrêtée lors de la première étape au 500^{ème} cycle et celle arrêtée au 1000^{ème} cycle.

L'étape 2 a alors un rôle fondamental dans l'explication du comportement du CR au cours de l'étape 3. Lors de cette étape, la température de l'éprouvette est ramenée par convection naturelle avec l'air à l'ambiante. Nous nous retrouvons donc en début de troisième étape avec une éprouvette contenant un certain nombre de fissures.

Les évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur en début de troisième étape (ie avant que les courbes ne rejoignent celles de référence) laisserait alors penser à un renforcement de l'éprouvette. Nous proposons que ce renforcement soit causé de manière indirecte par la présence de fissures dans l'éprouvette : la présence de fissure impliquerait une zone cristallisée en fond de ces fissures d'une taille telle qu'un renforcement global soit observable.

En effet, en début de troisième étape, les fonds de fissure sont des zones d'apparition privilégiées de zone cristallisées sous tension. Elles sont alors suffisamment nombreuses pour avoir une influence renforçante à l'échelle de l'éprouvette. Cela n'est possible que parce que la température de l'éprouvette a été diminuée pendant l'étape 2. Dans le cas contraire, la cristallisation sous tension aurait alors été limitée par des températures plus importantes.

Une fois atteint un nombre de cycle égal à Nb_1 , on se retrouve dans un état d'équilibre entre l'endommagement, la cristallisation sous tension et la température de l'éprouvette proche de celui au même cycle dans l'essai de référence. En conséquence, pour la suite de l'essai, les courbes des deux essais se superposent.

On remarque de plus que comme pour les essais du groupe 1, la durée de la troisième étape pour les essais du groupe 2 est de l'ordre de deux fois la durée de vie en fatigue (Figure 3. 16).

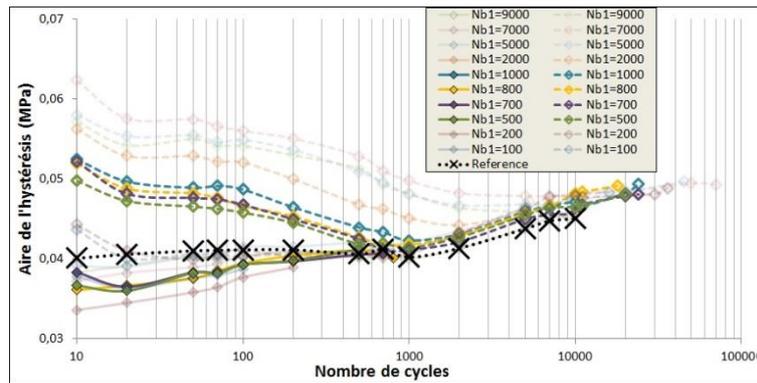


Figure 3. 10 – Evolution de l’aire de l’hystérésis pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides) pour les essais du groupe 2.

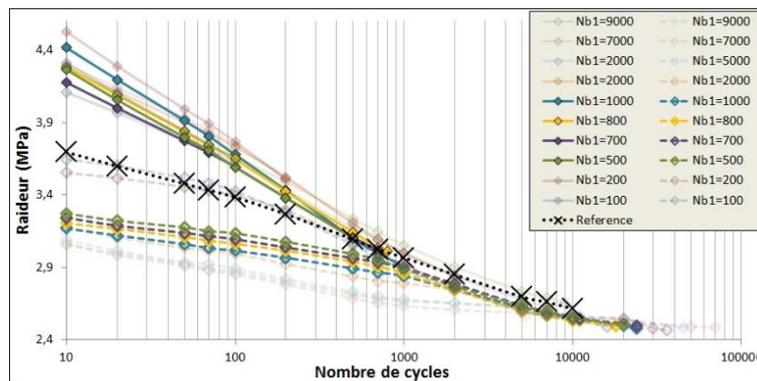


Figure 3. 11 – Evolution de la raideur pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides) pour les essais du groupe 2.

2.2.3 Groupe 3 : $N_{b1} = 2000$ cycles

Ces essais ont vu leur première étape arrêtée au 2000^{ème} cycle (soit 20% de la durée de vie en fatigue). Cela signifie un arrêt au début de la phase 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis. Les évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur pour ces courbes sont mises en avant sur la Figure 3. 12 et Figure 3. 13.

L'aire de l'hystérésis montre en début de troisième étape une augmentation par rapport à la valeur initiale de la courbe de référence. L'évolution est ensuite décroissante jusqu'au 2000^{ème} cycle (correspondant donc à N_{b1}) où la courbe rejoint la référence. Les deux évolutions sont ensuite confondues.

La raideur montre également une valeur en début de troisième étape plus faible que celle initiale de la référence. On observe de plus que l'évolution est monotone puisqu'aucun changement de pente n'est observé, même après la jonction avec la référence au 2000^{ème} cycle.

L'explication que nous apportons à un tel comportement est proche de celle donnée pour les essais du groupe 2 : l'éprouvette est endommagée en fin de première étape, la température revient à l'ambiante en fin d'étape 2 et il existe des fissures suffisamment grande dans l'éprouvette en début d'étape 3 pour que les zone cristallisées sous tension en fond de ces fissures aient un impact global sur le comportement du CR. La différence pour cet essai est que la première étape ayant été arrêtée lors de la phase 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis, les fissures ont pu se propager dans une proportion plus importante. Cela expliquerait qu'il y ait une plus grande différence entre les valeurs de l'aire de l'hystérésis et de la raideur en début de troisième étape avec celles initiales de la référence, que pour les groupes 1 et 2.

Il apparaît que les évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur lors de la troisième étape singularisent cet essai par rapport aux autres : pour le premier paramètre, la courbe est isolée entre les deux groupes et, pour le second paramètre, la pente est constante. Si on fait le parallèle avec les mesures de tomographie par rayons X (Chapitre 2, §4.1) où la taille de fissures augmente fortement après 2000 cycles, il semble que ce moment de l'essai de fatigue à $R = 0,1$ et $F_{max} = 175N$ soit charnière.

On précise enfin que la durée de la troisième étape est de l'ordre de 2,5 fois la durée de vie en fatigue (Figure 3. 16).

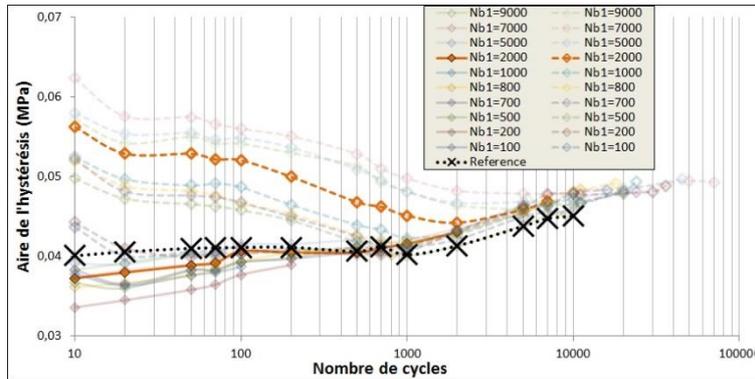


Figure 3. 12 – Evolution de l'aire de l'hystérésis pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides) pour les essais du groupe 3.

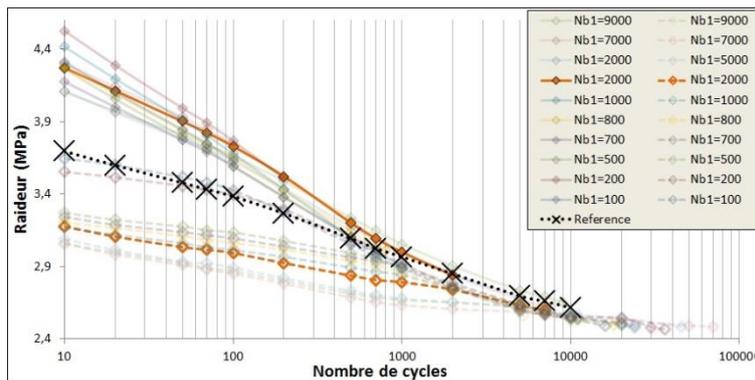


Figure 3. 13 – Evolution de la raideur pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides) pour les essais du groupe 3.

2.2.4 Groupe 4 : $N_{b1} = 5000, 7000$ ou 9000 cycles

Ces essais ont vu leur première étape arrêtée entre 5000 et 9000 cycles (soit 50 à 90% de la durée de vie en fatigue). Cela signifie un arrêt en cours de phase 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis. Les Figure 3. 14 et Figure 3. 15 font ressortir les évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur pour ces courbes.

Comme pour les groupes précédents, une augmentation de la valeur de début d'étape 3 de l'aire de l'hystérésis par rapport à la valeur initiale de la référence est observée. De même, l'évolution est, dans un premier temps, décroissante jusqu'à rejoindre la courbe de référence. Il apparaît néanmoins que les valeurs d'aire d'hystérésis sont les plus importantes pour l'essai à $N_{b1}=7000$ cycles dans la phase précédent la jonction. Pour $N_{b1}=9000$ cycles, celles-ci sont du même ordre que pour l'essai à $N_{b1}=5000$ cycles. Le même genre de remarque s'applique sur le nombre de cycles où la jonction s'effectue avec la courbe de référence qui est égal à N_{b1} pour les essais à $N_{b1}=5000$ et 7000 cycles, cela n'est pas le cas pour l'essai à $N_{b1}=9000$ cycles. Pour ce dernier, la jonction se fait entre les 5000^{ème} et 7000^{ème} cycles de la troisième étape.

Comme pour l'aire de l'hystérésis, la raideur montre une différence entre la valeur en début d'étape 3 et celle initiale de la référence, plus importante pour ce groupe d'essais que pour les autres investigués. L'évolution diffère également puisque, si une décroissance est observée pendant les 1000 premiers cycles, la pente de celle-ci est plus importante que pour les autres groupes. Une fois atteint le 1000^{ème} cycle, l'évolution devient presque constante et rejoint finalement la courbe de référence. La même considération pour le nombre de cycles auquel intervient cette jonction peut être faite que pour l'aire de l'hystérésis.

L'explication que nous proposons pour ce comportement est très proche de celle proposée pour le groupe 3 : les étapes 1 sont interrompues pendant la phase 3 d'évolution à partir de 5000 cycles. Or les mesures de tomographie par rayons X ont montré que la taille maximale de fissure et le nombre de fissure augmentent sensiblement à partir de 2000 cycles. L'impact de l'étape 2, où la température de l'éprouvette revient à l'ambiante, est encore plus important pour ce groupe de courbes.

On remarque que jusqu'à Nb1=7000 cycles, la durée de l'étape 3 augmente pour atteindre 7 fois la durée de vie en fatigue (Figure 3. 16). Nous sommes alors en présence d'une nette amélioration des caractéristiques en fatigue du CR. Cela serait donc dû à la taille des fissures induisant des zones cristallisées sous tension telles qu'elles influent sur le comportement global de l'éprouvette.

En revanche, pour Nb1=9000 cycles, la durée de l'étape 3 chute pour être de l'ordre de la durée de vie en fatigue. Il semblerait ici que l'endommagement subi lors de la première étape soit tout simplement trop important. Il est probable que cela soit plus dû au grand nombre de fissures présentes dans l'éprouvette qu'à une taille de fissure critique, à partir de laquelle la zone cristallisée en fond de fissure n'est pas suffisamment grande pour contrer la propagation de celle-ci.

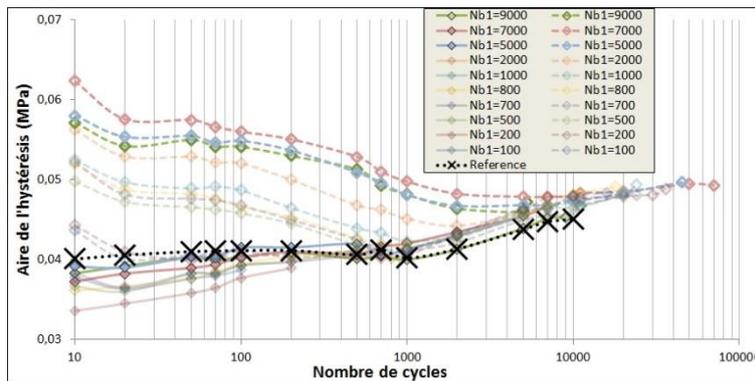


Figure 3. 14 – Evolution de l'aire de l'hystérésis pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides) pour les essais du groupe 4.

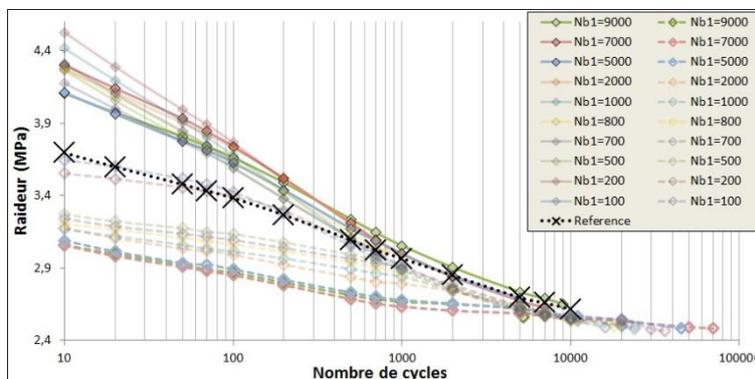


Figure 3. 15 – Evolution de la raideur pendant la première étape (traits et marqueurs pleins) et pendant la troisième étape (traits pointillés et marqueurs vides) pour les essais du groupe 4.

2.3 Bilan des essais de rodage dynamique avec $F_{b1}=F_{b3}$

Les essais de rodage dynamique au cours desquels la sollicitation appliquée lors de la première et la troisième étape sont égaux ont montré un comportement très dépendant de la durée de cette première étape.

Ce comportement, lors de l'étape 3, est lié à la phase d'évolution de l'aire de l'hystérésis, au cours de laquelle, l'étape 1 a été arrêtée :

- Comportement 1 = groupe d'essai 1 = phase d'évolution de l'aire de l'hystérésis 1

Comportement indiquant que seule la déréticulation subie lors de l'étape 1 aurait un impact. L'endommagement est indétectable.

- Comportement 2 = groupe d'essai 2 = phase d'évolution de l'aire de l'hystérésis 2

Comportement indiquant un endommagement lors de l'étape 1. Néanmoins, la durée des étapes 1 des essais de ce groupe décrit la phase 2 d'évolution de l'aire de l'hystérésis et montrerait alors une très faible augmentation de cet endommagement.

- Comportement 3 = groupe d'essai 3 = phase d'évolution de l'aire de l'hystérésis 3

Comportement indiquant un endommagement lors de l'étape 1. D'après cet essai, le 2000^{ème} cycle semble être un moment particulier de la phase 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis.

- Comportement 4 = groupe d'essai 4 = phase d'évolution de l'aire de l'hystérésis 3

Comportement indiquant un fort endommagement lors de la première étape. Dans le cas de ce groupe, les fissures ont pu se propager jusqu'à atteindre des tailles de plusieurs centaines de micromètre (§4.2 chap 2), induisant des zones cristallisées en fond de fissure suffisamment importantes pour renforcer l'éprouvette. Néanmoins, passée une certaine durée d'étape 1, ce renforcement global lors de l'étape 3 disparaît.

Tous les comportements observés ont également montré que la durée de la troisième étape est plus importante que la durée de vie en fatigue (Figure 3. 16). Cette augmentation va de deux à sept fois N_f , d'où la dénomination de rodage dynamique.

Cet essai met bien en valeur la relation entre l'endommagement, la cristallisation sous tension et la température de l'éprouvette décrivant le comportement en fatigue du CR.

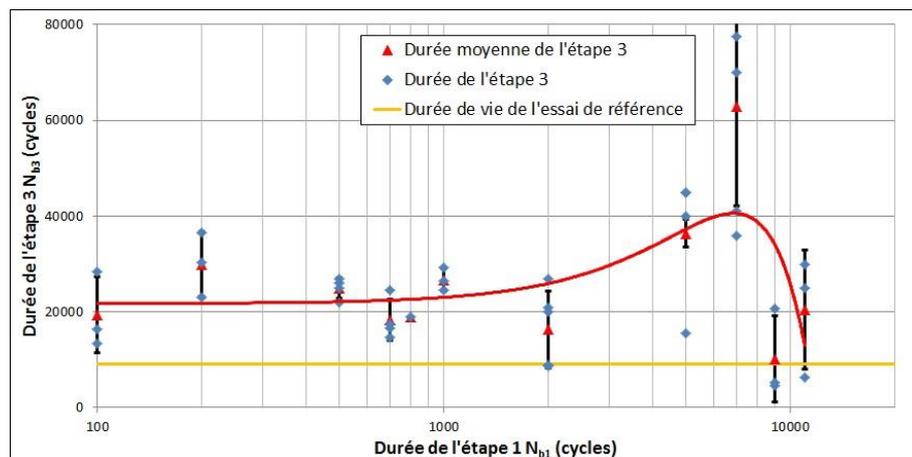


Figure 3. 16 – Evolution de la durée de l'étape 3 en fonction de la durée de l'étape 1. La durée de vie en fatigue pour l'essai de référence est représentée à titre de comparaison.

2.4 Courbe maîtresse

L'observation des évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur dans le paragraphe 2 de ce chapitre semble être analogue à un comportement de type minimum d'énergie (Figure 3. 6 et Figure 3. 7). En effet, l'endommagement subi lors de la première étape pourrait déséquilibrer le système constitué par l'éprouvette en s'écartant en début de troisième étape de la position d'équilibre symbolisée par la référence. On observe alors pour les deux paramètres un retour vers la position d'équilibre au bout d'un nombre de cycle lié à la durée de la première étape.

La courbe maîtresse est définie en deux parties (Figure 3. 17):

- $N < N_f$: elle est confondue avec la courbe de référence
- $N > N_f$: elle est constituée des points des différentes évolutions lors de l'étape 3 lorsque ceux-ci ont convergés vers une même évolution.

Il est intéressant de remarquer que tous les paramètres mécaniques investigués dans ce manuscrit ont montré un tel comportement, à savoir la raideur, l'aire de l'hystérésis ou encore la déformation (cf annexe B). Nous n'avons malheureusement pas pu vérifier cela pour la température.

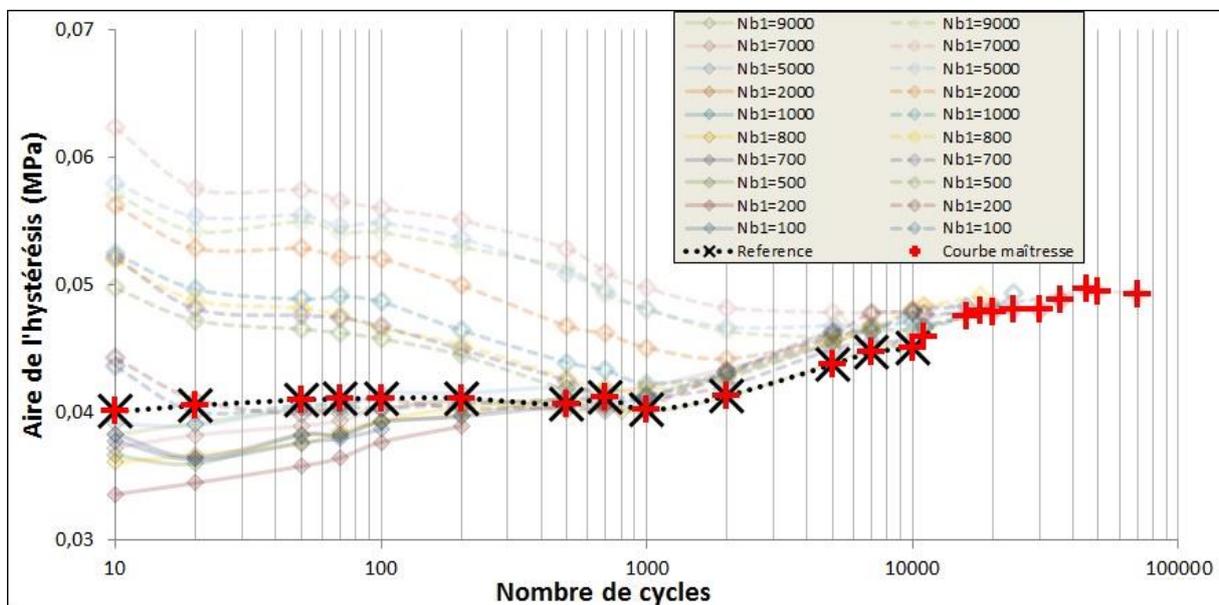


Figure 3. 17 – Construction de la courbe maîtresse de l'évolution de l'aire de l'hystérésis pour $R=0,1$, $F_{max}=175N$ et $f=5Hz$.

3 Influence de la sollicitation lors de la troisième étape

Nous avons donc observé, dans le paragraphe précédent, l'influence de la durée de la première étape sur le comportement du CR lors de la troisième étape d'un essai de rodage dynamique et celui-ci s'est révélé très dépendant d'un phénomène : la cristallisation sous tension. La sollicitation appliquée lors de l'étape 3 était suffisante pour que localement le CR puisse cristalliser sous tension. Nous allons dans ce paragraphe prendre une sollicitation plus faible lors de la troisième étape, afin de vérifier si ce changement de comportement peut être observé même pour des efforts plus faibles, et donc avec des gradients de déformation également plus faibles, limitant l'apparition de zones cristallisées sous tension.

3.1 Protocole

Nous allons reprendre en grande partie le protocole du paragraphe précédent (présenté au §2.1) avec les deux changements suivants :

- Nous avons fixé sur toute la campagne la durée de la première étape à $R=0,1$, $F_{max}=175$ et $f=5\text{Hz}$ à $N_{b1} = 5000$ cycles. Le paragraphe 2 a montré que cette durée est suffisante pour endommager l'éprouvette et induire une durée d'étape 3 de 4 à 5 fois supérieure à la durée de vie en fatigue.
- La sollicitation lors de l'étape 3 sera au rapport de charge 0,1, fréquence 5Hz et effort maximal choisi parmi les suivants :
 - 100N : sollicitation inférieure à la limite à 10^6 cycles (qui est à 115N) et donc non endommageante.
 - 125N : sollicitation juste supérieure à la limite à 10^6 cycles induisant un endommagement modéré ($N_f=8.10^5$ cycles).
 - 140N : sollicitation dont la durée de vie est de l'ordre de 4.10^5 cycles.
 - 160N : sollicitation proche de celle appliquée lors de la première étape ($N_f = 3.10^4$ cycles)

Dans tous les cas, deux essais ont été effectués.

Les courbes de références qui seront montrées dans la suite de ce paragraphe représentent l'évolution du paramètre lors d'un essai de fatigue à amplitude constante pour une sollicitation donnée. Nous préciserons à chaque utilisation la sollicitation en question, de manière à ne pas faire de confusion.

NB :

- *Les essais de référence de cette partie sont les essais de fatigue à amplitude constante, rapport de charge 0,1, fréquence 5Hz et effort maximal égal à F_{b3} sur une éprouvette diabolo et présenté dans le chapitre 2 (donc 100N, 125N, 140N et 160N).*

3.2 Comportement lors de l'étape 3

Nous ne parlerons pas dans ce paragraphe de l'évolution de la raideur et de l'aire de l'hystérésis lors de la première étape, puisque celle-ci ne change pas de l'essai présenté au §2.

Les Figure 3. 18 et Figure 3. 19 montrent l'évolution de l'aire de l'hystérésis et de la raideur au cours de l'étape 3 pour les différentes sollicitations appliquées.

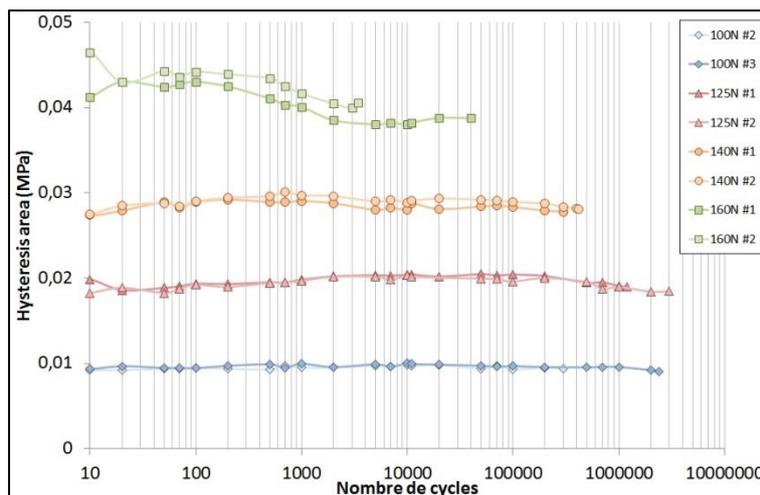


Figure 3. 18 – Evolution de l'aire de l'hystérésis lors de l'étape 3 pour différentes sollicitations.

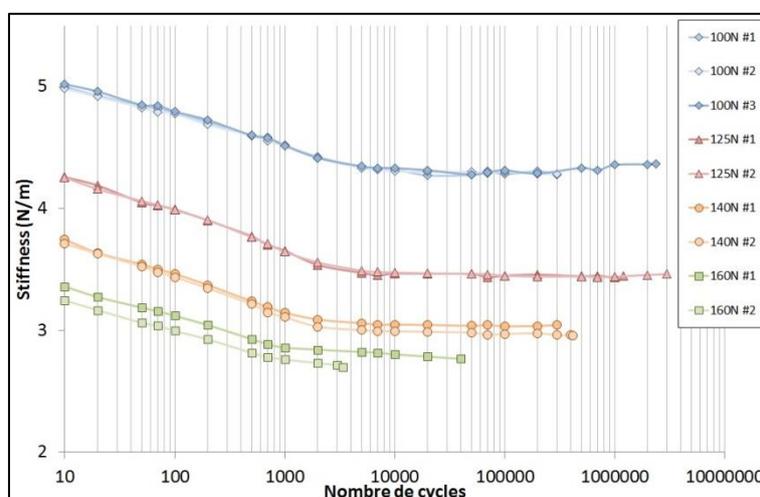


Figure 3. 19 – Evolution de la raideur lors de l'étape 3 pour différentes sollicitations.

Il apparaît que l'évolution de l'aire de l'hystérésis montre un comportement différent entre les essais à 160N et les autres.

Dans le premier cas, l'hystérésis présente une première phase stabilisée, avant de décroître à partir de 200 cycles. Elle se stabilise de nouveau à partir de 2000 cycles avant d'aller jusqu'à rupture. La comparaison avec la courbe de référence à 160N montre une évolution lors de l'étape 3 qui ressemble fortement à celle décrite pour les courbes du groupe 4 (§2.3). Les mêmes conclusions peuvent donc être utilisées : la sollicitation lors de cette étape 3 est suffisamment importante pour que la cristallisation sous tension se manifeste en fond de fissure et ait un impact sur le comportement du CR lors de cette étape. On retrouve alors la manifestation d'une courbe maîtresse, telle que définie dans le paragraphe §2.4 de ce chapitre.

Dans le cas des autres sollicitations (140N, 125N et 100N), une phase de croissance initiale est observée. L'évolution se stabilise ensuite (à 200 cycles pour 140N, 2000 cycles pour 125N et vers 5000 cycles pour 100N) avant de décroître (à partir de 10^5 cycles pour 140N, $2 \cdot 10^5$ cycles pour 125N et 10^6 cycles pour 100N). Il semblerait que l'on soit également en présence de la manifestation d'une courbe maîtresse.

La différence de pas de temps entre ces essais vient de la sollicitation. En effet, plus celle-ci est faible, plus le temps pour que les conditions de déformation locale pour l'apparition de zones cristallisées sous tension soient remplies est long. Il semblerait néanmoins que, même pour la sollicitation de 100N, des zones cristallisées sous tension apparaissent.

Nous retrouvons ce résultat dans l'observation de l'évolution de la raideur lors de la troisième étape. En effet, un même comportement est observé pour toutes les sollicitations : une décroissance jusqu'à ce que l'évolution se stabilise (à $N=1000$ cycles pour 160N, 2000 cycles pour 140N, 5000 cycles pour 125N et 10^4 cycles pour 100N). Il apparaît en plus que pour la sollicitation à 100N, la raideur se met à croître à partir de $3 \cdot 10^5$ cycles.

Dans ce dernier cas, l'augmentation de la raideur peut être expliquée de la façon suivante :

- Pour les sollicitations plus importantes (125N, 140N et 160N), les fissures ont suffisamment d'énergie mécanique pour continuer à se propager. L'auto-échauffement plus ou moins important limite également en partie la cristallisation sous tension.
- A $F_b=100N$, l'énergie mécanique et l'auto-échauffement sont tels que les fissures ne se propagent pas. Il semblerait alors que les zones cristallisées sous tension commencent à apparaître en fond de fissure. L'évolution des déformations maximale et minimale au cours de l'étape 3 (Figure 3. 20) montre alors une stabilisation aux alentours de 10^4 cycles. En faisant une analogie avec le fluage statique, il semblerait que l'éprouvette soit arrivée à son seuil de fluage dynamique (cette analogie est sûrement très grossière et doit être prise avec précaution, mais en l'absence de travaux sur ce sujet dans la littérature, c'est la seule façon d'expliquer ce phénomène que nous avons trouvée). A partir de $3 \cdot 10^5$ cycles, la raideur augmente, indiquant une rigidification continue de l'éprouvette. Il est possible alors que des zones cristallisées ne fondent pas complètement lors du cycle et on serait par conséquent en présence d'une accumulation de cristallites d'un cycle à l'autre.

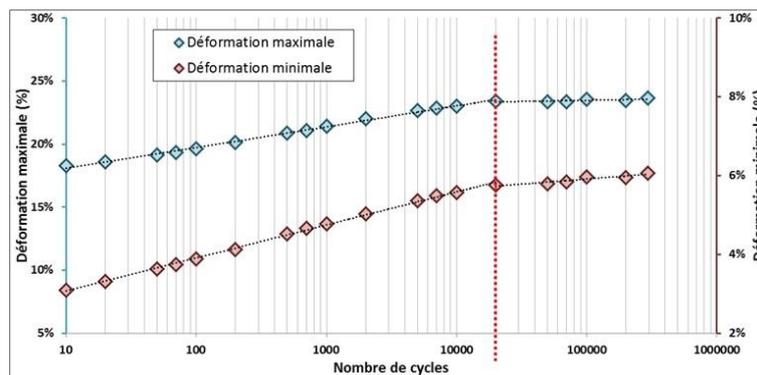


Figure 3. 20 – Evolution de la déformation maximale et minimale lors de l'étape 3 à $F_{\max}=100N$.

3.3 Courbes maîtresses

Nous retrouvons sur ces essais un comportement différent du CR entre l'étape 3 et la courbe de référence à la même sollicitation (Figure 3. 21 et Figure 3. 22). Malgré le faible nombre de points par sollicitation investiguée lors de l'étape 3, il semble manifeste qu'un comportement semblable à celui décrit dans le paragraphe §2.4 de ce chapitre, soit observé. La courbe maîtresse peut alors également être définie pour chacune des sollicitations utilisées lors de l'étape 3.

Nous pouvons alors dire que l'endommagement subi lors de la première étape provoquerait un déséquilibre entre l'endommagement, le renforcement et l'auto-échauffement par rapport à un essai de fatigue sur une éprouvette non endommagée. Cet équilibre n'est pas figé puisqu'au bout d'un certain nombre de cycles (fonction de la sollicitation, ie d'autant plus rapide si la sollicitation de l'étape 3 est proche de celle de l'étape 1), la courbe rejoint celle de référence.

En tout début d'étape 3, l'endommagement est le phénomène prédominant. Cela explique la différence entre les valeurs de début d'étape 3 et celle initiale de la référence, ainsi que la légère croissance de l'hystérésis observée dans certains cas.

Très rapidement, le renforcement induit par la cristallisation sous tension devient du même ordre que l'endommagement. Nous observons alors une stabilisation de l'aire de l'hystérésis.

Comparativement aux essais de référence, l'endommagement de l'éprouvette est beaucoup plus important en début d'étape 3. Cela signifie que, lors des essais de référence, l'auto-échauffement atteint des températures limitant la cristallisation sous tension à peu près en même temps que les fissures commencent à se propager. Or, au début de l'étape 3, ces fissures se sont déjà propagées dans l'éprouvette. Les conditions d'apparition des zones cristallisées sous tension sont déjà remplies alors que l'auto-échauffement est encore faible. Les fissures sont alors des lieux privilégiés d'apparition de ces zones cristallisées et ces dernières atteignent des tailles telles que les caractéristiques en fatigue de l'éprouvette s'améliorent. Nous observons donc sur les courbes d'évolution de l'aire de l'hystérésis une décroissance. C'est également à ce moment de l'étape 3 que la raideur se stabilise. Dans les deux cas, nous retrouvons une évolution des courbes tendant à rejoindre la courbe maîtresse.

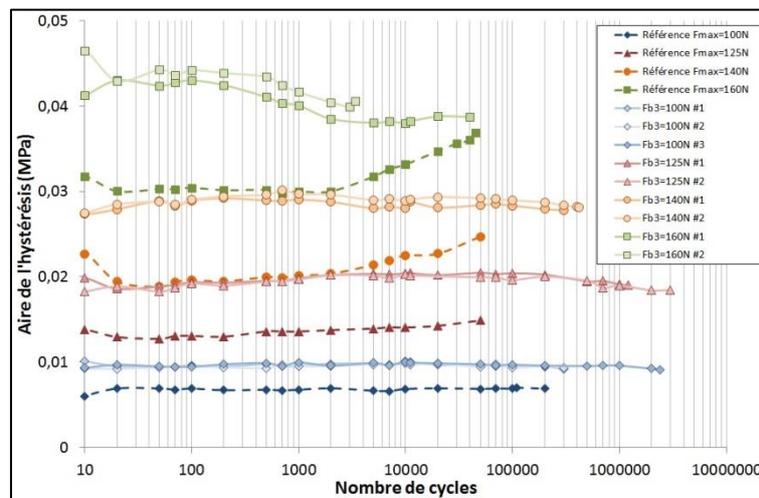


Figure 3.21 – Evolution de l'aire de l'hystérésis pendant l'étape 3. L'effort maximal a été pris plus faible au cours de l'étape 3 que lors de l'étape 1.

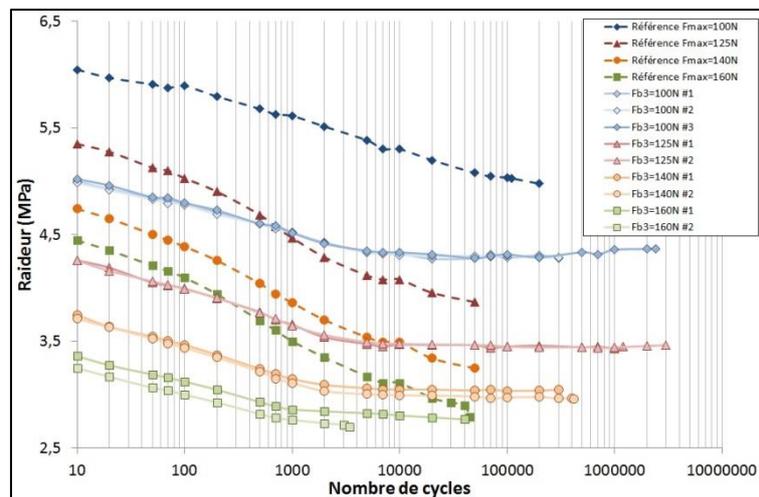


Figure 3.22 – Evolution de la raideur pendant l'étape 3. L'effort maximal a été pris plus faible au cours de l'étape 3 que lors de l'étape 1.

3.4 Bilan

Il apparaît sur ces essais de rodage dynamique, où la sollicitation lors de la troisième étape est prise plus faible que celle appliquée lors de la première étape, qu'un changement de comportement par rapport à celui de référence soit également observé.

La cristallisation sous tension semble favorisée par l'endommagement subi lors de l'étape 1 et semble apparaître même pour la sollicitation la plus faible. Une accumulation de cristallites pourrait également expliquer l'observation faite à 100N avec une raideur finissant par croître.

L'existence d'une courbe maîtresse semble également être avérée, lors de ces essais, pour les différentes sollicitations investiguées lors de l'étape 3.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les essais de rodage dynamique.

Ceux-ci nous ont permis, dans un premier temps, d'observer indirectement l'évolution de l'endommagement dans une éprouvette en CR au cours d'un essai de fatigue.

Pour cela, après une phase de précyclage (=étape 1) à $R=0,1$, $F_{\max}=175\text{N}$ et $f=5\text{Hz}$ et dont la durée a varié de 1% à 90% de la durée de vie en fatigue, une étape de repose a été imposée à l'éprouvette. Celle-ci permettant que sa température revienne à l'ambiante. Une nouvelle étape de fatigue à la même sollicitation (=étape 3) est ensuite lancée jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Le comportement de l'éprouvette change alors entre l'étape 1 et l'étape 3. Cette différence est d'autant plus marquée, que l'étape 1 a duré longtemps.

Lors de l'étape 3, les évolutions de la raideur et de l'aire de l'hystérésis ont montré un comportement analogue à un système, initialement hors d'équilibre, revenant à un état d'équilibre. Nous l'avons expliqué par une prédominance du renforcement induit par la cristallisation sous tension : l'éprouvette étant endommagée en début d'étape 3, un grand nombre de lieux d'apparition de zones cristallisées sous tension couplé à un auto-échauffement encore faible, font que les zones cristallisées sont d'une taille telle que les caractéristiques en fatigue de l'éprouvette sont fortement améliorées. La durée des étapes 3, allant de 2 à 7,5 fois la durée de vie en fatigue, semble confirmer ce point.

Nous avons alors mis en évidence une courbe maîtresse pour chaque paramètre observé correspondant à l'état d'équilibre de l'analogie. Celle-ci est définie par la courbe de référence jusqu'à $N=N_f$. Au-delà, elle est définie par les points des courbes ayant convergé.

Nous avons retrouvé ces observations en prenant une sollicitation lors de la troisième étape, plus faible que celle appliquée lors de l'étape 1 : un comportement analogue à celui d'un retour à l'équilibre d'un système a été observé. Cela a montré que l'éprouvette a été suffisamment endommagée lors de la première étape pour que le phénomène de cristallisation sous tension puisse intervenir, même pour des efforts très faibles.