

Essais de fatigue à amplitude variable

Sommaire du chapitre 4

Chapitre 4 : Essais de fatigue à amplitude variable	92
Sommaire du chapitre 4.....	93
Introduction	94
1 Essais de fatigue par palier en charge-décharge (PCD)	95
1.1 Protocoles	95
1.2 Effort maximal lors de l'essai PCD : 175N.....	96
1.3 Bilan	99
2 Essais de cumul de dommage (CDmg)	99
2.1 Protocole.....	99
2.2 Résultats et analyse	100
3 Essais d'augmentation de palier jusqu'à rupture (APR)	102
3.1 Evolution des paramètres de fatigue lors d'un essai APR.....	104
3.2 Evolution de l'hystérésis en fin de bloc lors d'un essai APR	106
3.3 Construction d'une courbe de Wöhler à partir des essais APR.....	107
4 Diagramme raideur/hystérésis (ou diagramme K/H)	109
4.1 Reprise des essais présentés depuis le début du manuscrit	110
4.1.1 Essais de fatigue à amplitude constante	110
4.1.2 Essais de rodage dynamique à effort maximal constant.....	111
4.1.3 Essais de fatigue à amplitude variable	111
4.1.4 Essais à température différente de l'ambiante.....	112
4.1.5 Bilan	112
4.2 Estimation du nombre de cycles associé à un point dans ce diagramme	113
4.2.1 Transition entre les phases 2 et 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis.....	113
4.2.2 Estimation de la durée de vie d'un essai en fatigue à amplitude constante.....	114
Conclusion.....	117

Introduction

Le chapitre précédent sur le rodage dynamique a montré qu'intercaler une étape de repos entre deux étapes de fatigue pouvait améliorer les caractéristiques du CR. L'explication proposée pour un tel résultat est que le refroidissement induit par l'étape de repos a permis de modifier l'équilibre entre l'endommagement et la cristallisation sous tension au profit de cette dernière.

Ce chapitre a pour but de vérifier si cette modification du comportement en fatigue peut être observée après un simple changement de sollicitation et non une étape de repos complet.

La première partie est consacrée aux essais dits par palier en charge-décharge, c'est-à-dire des essais de fatigue divisés en palier de même durée. Lors de la phase de charge la sollicitation augmente d'un palier à l'autre, et diminue lors de la phase de décharge.

La deuxième partie consiste en l'étude d'essai de cumul d'endommagement, alternant les étapes de même durée entre une sollicitation fortement endommageante et une à durée de vie infinie. L'influence de la durée des étapes sur le comportement global lors de l'essai du CR est alors investiguée.

La troisième partie est consacrée aux essais par paliers jusqu'à rupture, consistant en une unique phase de charge d'un essai par paliers de charge-décharge se finissant avec la rupture de l'éprouvette. La durée des étapes est investiguée permettant le tracé d'une courbe de Wöhler.

Dans la quatrième et dernière partie de ce chapitre, les essais des différentes campagnes vues dans ce manuscrit sont repris dans un diagramme décrivant l'évolution de la raideur en fonction de l'aire de l'hystérésis. Celui-ci permet alors d'unifier tous les essais à une même sollicitation, indépendamment de l'historique de chargement.

1 Essais de fatigue par palier en charge-décharge (PCD)

1.1 Protocoles

Un essai par paliers consiste en une succession de blocs d'un nombre de cycles N_b . Chaque bloc est soumis à un niveau de sollicitation différent du bloc précédant et suivant. L'essai se termine quand les conditions de fin d'essai sont remplies (cela peut être la rupture de l'éprouvette ou parce que la sollicitation redevient nulle).

Ici, tous les essais sont des essais uniaxiaux, menés à rapport de charge 0,1 et soumis à un signal sinusoïdal de fréquence 5Hz. Par défaut, la durée de chaque bloc est constante lors d'un essai. Dans le cas contraire, la durée des blocs est explicitée. Enfin, chaque bloc est séparé par une rampe de 5 secondes assurant la liaison.

Trois types d'essais par paliers ont été menés : des essais de fatigue par palier en charge-décharge, des essais de cumul de dommage et des essais d'augmentation de palier jusqu'à rupture.

- Paliers en charge-décharge

Les essais par paliers en charge-décharge (ou essais PCD) correspondent à une configuration au cours de laquelle la sollicitation lors d'une étape de charge augmente à chaque changement de blocs jusqu'à atteindre une sollicitation maximum. Ensuite lors de l'étape de décharge, la sollicitation diminue à chaque bloc de manière symétrique par rapport à l'étape de charge (Figure 4. 1).

Les efforts ont été choisis dans la gamme d'effort investigués lors de la campagne de fatigue vue au chapitre 2 et rappelés dans le Tableau 4. 1.

L'essai s'arrête après que le dernier bloc de la phase de décharge se finisse. L'éprouvette ne rompt donc pas.

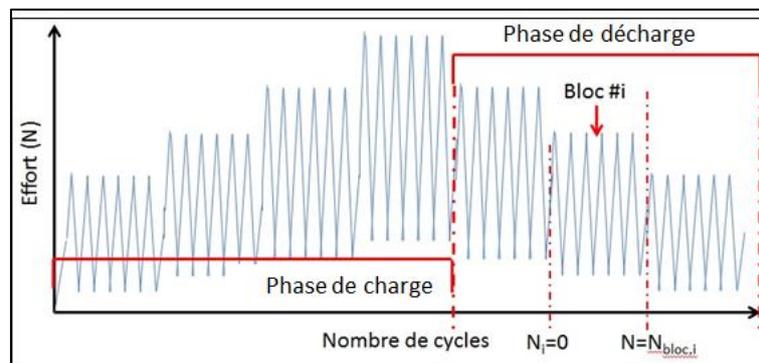


Figure 4. 1 – Evolution de l'effort lors d'un essai en palier aller-retour

Numéro de bloc	Effort maximal (N)	Contrainte alternée (Mpa)
1	85	0,33
2	100	0,38
3	115	0,44
4	125	0,48
5	140	0,54
6	150	0,58
7	160	0,61
8	175	0,67
9	160	0,61
10	150	0,58
11	140	0,54
12	125	0,48
13	115	0,44
14	100	0,38
15	85	0,33

Tableau 4. 1 – Exemple de plage de sollicitation utilisée dans la cadre d’un essai par palier aller-retour avec un effort maximal allant jusqu’à 175N.

1.2 Effort maximal lors de l’essai PCD : 175N

Cet essai PCD est constitué de blocs de durée fixée à 5'000 cycles et lors desquelles un effort maximal inférieure à 175N s’applique sur l’éprouvette. Le Tableau 4. 1 détaille l’effort appliqué lors de chaque bloc. Ces efforts sont les mêmes que ceux investigués lors de l’étude de l’évolution de l’aire de l’hystérésis effectuée pour le rapport de charge 0,1 au chapitre 2.

***NB :** Nous appellerons dans la suite de ce chapitre « essais à amplitude constante » des essais dont la sollicitation reste la même jusqu’à la fin. Typiquement, cela correspond aux essais effectués au chapitre 2.*

Les Figure 4. 2 et Figure 4. 3 montrent les évolutions de l’hystérésis et de la raideur pendant l’essai. Il est notable que lors de la phase aller, ces deux paramètres se comportent comme attendu : lors de chaque bloc, la raideur décroît selon une loi logarithmique et l’aire de l’hystérésis suit la même évolution telle que décrite au chapitre 2 (§3). Néanmoins une différence commence à apparaître au bloc à 115N. Pour les blocs où l’effort maximal est plus faible ou égal à 115N, l’aire de l’hystérésis est constante et du même ordre que celle observée lors d’essais de fatigue à amplitude constante et à amplitude constante (pour les blocs à 100N Figure 4. 4.c/ et Figure 4. 4.d/). Par contre, lorsque l’effort appliqué lors du bloc est supérieur à 115N, la valeur au cours de la phase stabilisée de l’aire de l’hystérésis est plus importante que celle mesurée lors de la phase 2 d’un essai de fatigue à amplitude constante et à une même sollicitation (Pour les blocs à 140N Figure 4. 4.a/ et Figure 4. 4.b/). La même observation peut être faite en comparant les raideurs en début de blocs et les raideurs en début d’essai de fatigue à amplitude constante et au même effort maximal. Etant donné que ces différences se manifestent pour des efforts supérieurs à 115N, il est probable que celles-ci soit dues à la propagation de fissures, la durée d’un bloc étant supérieur au nombre de cycles ou apparait la phase 3 d’évolution de l’aire de l’hystérésis pour ces sollicitations (cf chapitre 2 Figure 2. 6).

Lors de la phase de décharge, l’aire de l’hystérésis et la raideur montrent des comportements que nous qualifierons d’inverses, à savoir une stabilisation voire une diminution de l’aire de l’hystérésis et une stabilisation voire une croissance de la raideur. De plus, la variation de ces deux paramètres est plus faible que lors de la phase de chargement. On peut d’ailleurs noter une augmentation de l’aire de l’hystérésis et une diminution de la raideur lors d’un bloc par rapport à celle observée lors d’un essai de fatigue à amplitude constante.

Chapitre 4 : Essais de fatigue à amplitude variable

L'augmentation de l'aire de l'hystérésis observée lors des phases de charge (pour un effort supérieur à 115N) et de décharge est très certainement due à l'endommagement induit par les blocs précédents.

De plus, si on compare la variation entre les valeurs initiales et finales des deux blocs en charge et décharge au même effort maximal (par exemple $F_{\max} = 150\text{N}$ Figure 4. 5), celle-ci est plus marquée que ce soit pour l'aire de l'hystérésis ou la raideur lors de la phase de charge que lors de la phase de décharge.

La différence entre les valeurs en fin de blocs à la même sollicitation mais un lors de la phase de charge et l'autre lors de la phase de décharge n'est pas autant marqué pour toutes les sollicitations. En effet, les graphes montrant l'évolution de l'aire de l'hystérésis (Figure 4. 6) et de la raideur (Figure 4. 7) mesurées à la fin d'un bloc en fonction de l'effort maximal appliqué lors de ce même bloc montre que cette différence tend à disparaître avec l'augmentation de l'effort maximal. La courbe verte traduit la différence entre les valeurs du paramètre en fin de bloc à une même sollicitation. Nous pouvons alors penser que ce changement de comportement est lié à l'équilibre entre endommagement et renforcement induits par la fissuration et la cristallisation sous tension en fond de fissures.

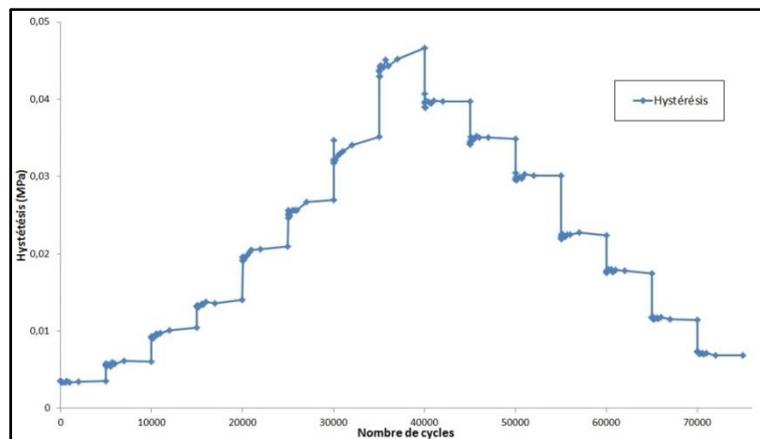


Figure 4. 2 – Evolution de l'hystérésis lors d'un essai en palier aller-retour jusqu'à 175N

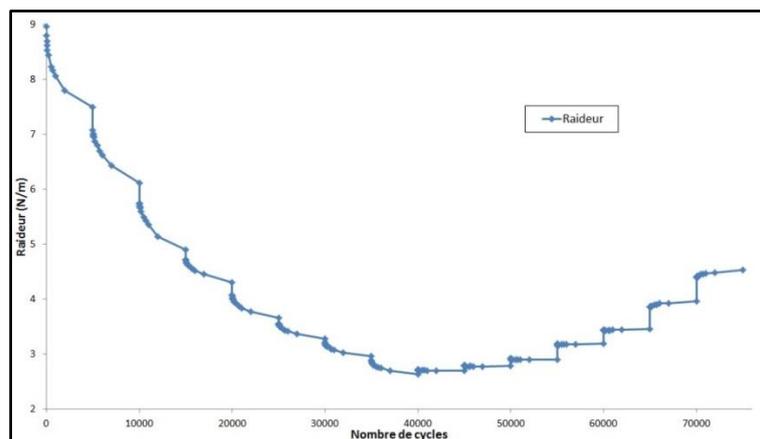


Figure 4. 3 – Evolution de la raideur lors d'un essai en palier aller-retour jusqu'à 175N

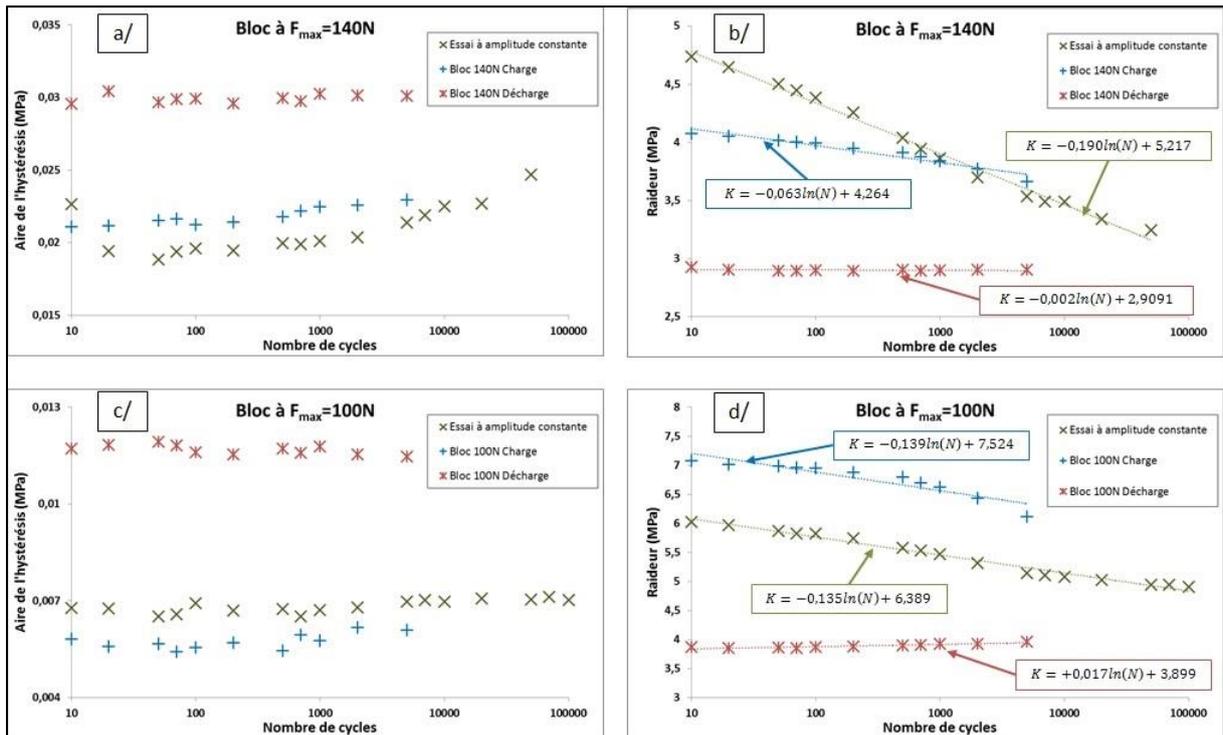


Figure 4. 4 – Evolution comparée de l'aire de l'hystérésis et de la raideur lors d'un essai à amplitude constante et lors des blocs intervenant lors de la charge et de la décharge. Les figures a/ et b/ sont à 140N et les figures c/ et d/ sont à 100N.

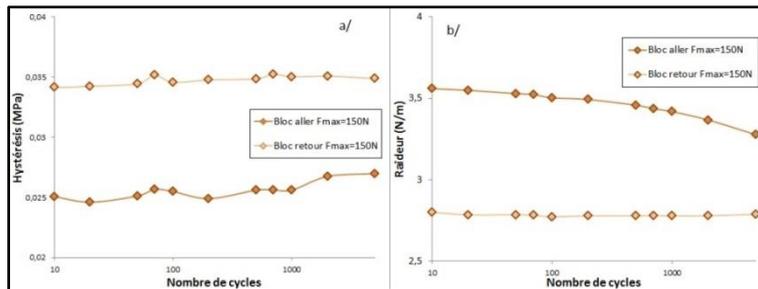


Figure 4. 5 – Evolution de l'hystérésis (a) et de la raideur (b) pour les blocs à 150N

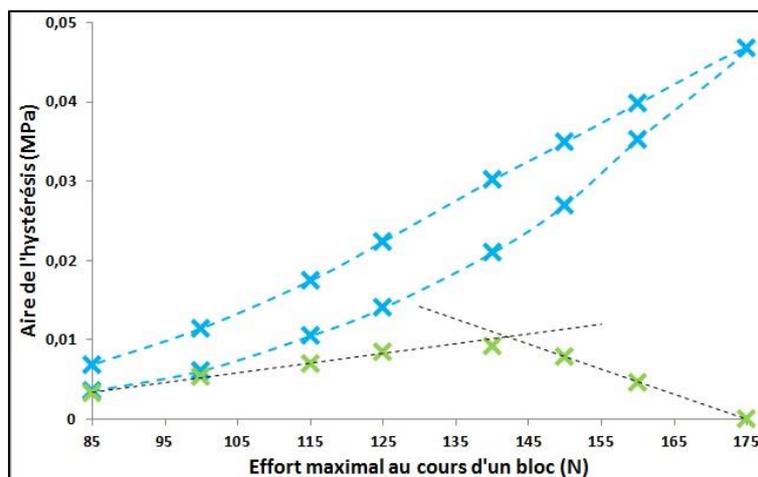


Figure 4. 6 – Evolution de l'aire de l'hystérésis mesurée en fin de bloc (trait et croix bleus) en fonction de l'effort maximal du bloc associé. Les croix vertes représentent la différence entre l'aire d'hystérésis mesurée en fin de bloc lors de la phase de charge et de décharge à un même effort maximal.

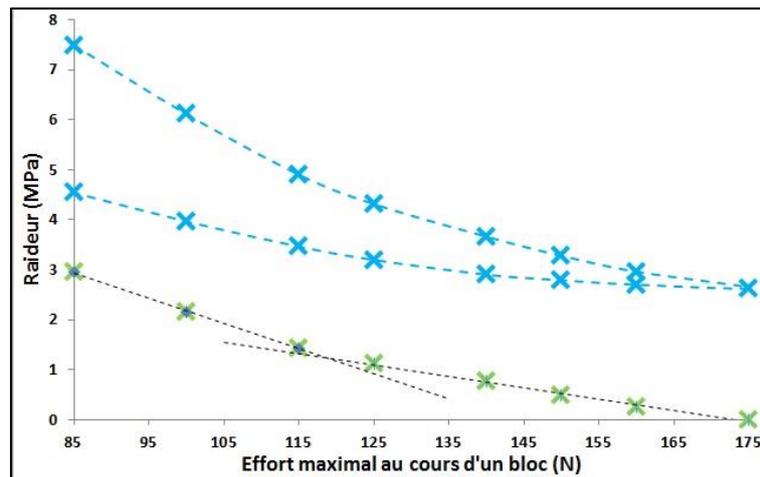


Figure 4. 7 – Evolution de la raideur mesurée en fin de bloc (trait et croix bleus) en fonction de l'effort maximal du bloc associé. Les croix vertes représentent la différence entre la raideur mesurée en fin de bloc lors de la phase de charge et de décharge à un même effort maximal.

1.3 Bilan

Nous pouvons tirer un certains nombres d'enseignement de ces essais PCD :

- Si deux blocs de sollicitations se succèdent et que la première est plus endommageante que la seconde, l'évolution de l'hystérésis et de la raideur montre un comportement en fatigue inverse.
- Lors de la phase de charge, un changement de bloc implique que la sollicitation augmente. Les fissures déjà existantes (s'il y en a) vont donc pouvoir se propager. Rapidement, une nouvelle zone cristallisée en fond de fissure va s'opposer à cette propagation jusqu'à ce que la température de l'éprouvette favorise de nouveau la propagation des fissures.
- Lors de la phase de décharge, l'énergie mécanique injectée dans le système diminue d'un bloc à l'autre. Si on combine cela à la taille des fissures impliquant une zone cristallisée en fond de fissure d'une taille conséquente, nous nous retrouvons dans un cas où la fissure n'a pas assez d'énergie pour propager. Si un raidissement de l'éprouvette est observé, il se pourrait que cela soit dû à une augmentation des zones cristallisées. Néanmoins, celle-ci n'est pas uniquement due à la présence de la fissure. En effet, les phases cristallines et amorphes sont suffisamment distinctes [Bernstein 98] pour que les zones cristallisées se comportent comme une phase étrangère et donc source de déformation locale dans la zone amorphe. Donc pour résumer, les zones cristallisées croissent an raison de leur taille importante.

2 Essais de cumul de dommage (CDmg)

2.1 Protocole

Dans le cadre d'essais de cumul de dommage (essais CDmg), une éprouvette est soumise alternativement à deux sollicitations, l'une endommageante et l'autre non endommageante. Les deux sollicitations choisies sont un effort maximal à 175N et un effort maximal à 85N (Figure 4. 8).

L'étude menée au chapitre 2 sur le comportement en fatigue du polychloroprène à un rapport de charge $R=0,1$ nous a montré que dans le cas de l'essai à l'effort maximal de 175N, la durée de vie est

d'environ 10^4 cycles. Pour l'essai à l'effort maximal de 85N, la courbe de Whöler tracée par [Poisson 2012] donne une durée de vie de l'ordre de 10^9 cycles: on considèrera cet essai comme étant à durée de vie infinie.

Nous avons effectué les essais CDmg en fixant la durée des blocs N_b à 2000, 5000 ou 7000 cycles.

Nous présenterons les résultats pour $N_b=5000$ cycles, ceux-ci étant très proches d'un essai à l'autre.

L'essai s'arrête en principe à la rupture de l'éprouvette. Il est néanmoins possible qu'une sous-estimation de la durée de l'essai induise un arrêt prématuré lié à la méthode utilisée dans le logiciel pilotant la machine de fatigue.

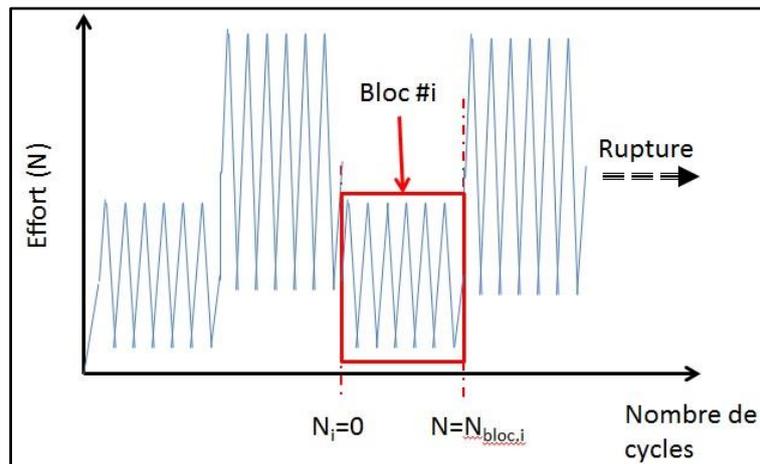


Figure 4. 8 – Evolution de l'effort lors d'un essai de cumul de dommage

2.2 Résultats et analyse

L'évolution de l'aire de l'hystérésis et de la raideur au cours d'un essai CDmg nous montre deux comportements distincts Figure 4. 9 et Figure 4. 10. Lors des premiers blocs à 85N et à 175N, les évolutions de la raideur et de l'hystérésis sont similaires à celles observées dans le chapitre 2 pour un essai de fatigue à la même sollicitation. En effet, la raideur décroît en suivant une loi logarithmique et l'aire de l'hystérésis montre trois phases d'évolution pour le bloc à 175N et une évolution constante pour celui à 85N (Figure 4. 11 et Figure 4. 12).

En revanche, la Figure 4. 11 montre que dès le deuxième bloc à 85N (donc le troisième bloc de l'essai), la raideur est constante avec une forte diminution de la valeur initiale comparativement à celle du premier bloc à 85N. L'aire d'hystérésis reste constante mais voit sa valeur initiale augmenter par rapport à celle du premier bloc à 85N (Figure 4. 12). Cela correspond au comportement inverse tel que rencontré pour les essais PCD au paragraphe précédent.

La Figure 4. 11 montre que le phénomène est amplifié pour le deuxième bloc à 175N (donc le quatrième bloc de l'essai). La raideur, en plus de voir sa valeur en début de bloc fortement chuter par rapport à celle du premier bloc à 175N, se met à croître. Dans le même temps, l'aire de l'hystérésis présente une valeur en début de bloc en forte augmentation par rapport à celle du premier bloc à 175N et présente une évolution globalement décroissante. Ces évolutions ne sont pas sans rappeler celles observées au paragraphe 2 du chapitre 3 lors des essais de rodage dynamique pour une durée de première étape $N_{b1} > 2000$ cycles (Figure 3.14 et Figure 3.15).

Les Figure 4. 11 et Figure 4. 12 montrent qu'à partir des 7^{ème} blocs à 85N et 175N (soit les blocs numéro 13 et 14) les courbes d'évolutions de l'aire de l'hystérésis et de la raideur se superposent parfaitement pour deux blocs successifs à 85N et sont très proches pour deux blocs successifs à

Chapitre 4 : Essais de fatigue à amplitude variable

175N. Les évolutions de ces deux paramètres sont par contre les mêmes d'un bloc à l'autre à une même sollicitation à partir du deuxième bloc à cette sollicitation (soit les 3^{ème} et 4^{ème} de l'essai).

Nous avons déjà fait rapidement un rapprochement entre le comportement observé lors du deuxième bloc à 175N de cet essai CDmg et celui observé lors d'un essai de rodage dynamique à effort maximal pris égal pour les deux étapes de fatigue et dont la première est d'une durée supérieure à 2000 cycles. Si dans le cas de ces essais de rodage dynamique le changement de comportement entre l'étape 1 et l'étape 3 est mis sur le compte de l'endommagement subit lors de l'étape 1 et du retour de la température de l'éprouvette à celle ambiante lors de l'étape 2, cette deuxième condition est a priori absente lors d'essais CDmg. La première condition est par contre bien présente puisque dans ce cas l'endommagement apparaît lors du premier bloc à 175N (2^{ème} bloc de l'essai). Néanmoins, l'auto échauffement (définie au chapitre 5) lors d'un essai de fatigue à amplitude constante et effort maximale de 85N se trouve être relativement faible (de l'ordre de 2°C cf tableau 5. 1, chapitre 5). De plus la figure 3. 2 (chapitre 3) montre la courbe de refroidissement de l'éprouvette après un essai de fatigue à amplitude constante, à rapport de charge 0,1 et à effort maximal 175N. Il apparaît alors que l'éprouvette est revenue à la température ambiante au bout de 1000 secondes. Ici, nous sommes donc en présence d'un bloc où l'auto-échauffement est très faible devant celui observé à 175N (2°C contre 37,5°C Tableau 5. 1) pendant 5000 cycles, soit 1000 secondes. Nous pouvons alors estimer, vu le comportement montré par l'éprouvette au cours de cet essai de CDmg, que les blocs à 85N sont des blocs équivalents à des blocs de repos que ce soit en terme d'endommagement mais également d'un point de vue thermique. L'éprouvette semble donc au cours du premier bloc à 175N s'endommager puis se renforcer lors des suivants, ou du moins voir les fissures propager beaucoup plus lentement.

Cela se voit très clairement lorsque l'on considère la durée d'un essai de CDmg et qu'on le compare à la durée d'un essai en fatigue à amplitude constante, $R=0,1$ et $F_{\max} = 175N$ ($N_f = 10^4$ cycles). L'essai de CDmg a duré $1,47.10^5$ cycles, dont $7,2.10^4$ cycles à 175N et $R=0,1$. On rappelle que la durée de vie en fatigue pour cette sollicitation est de l'ordre de 10^4 cycles Il y a donc une augmentation de près de 600% de la durée de vie de l'éprouvette pour cette sollicitation. Nous sommes alors en présence d'un essai non pas de cumul de dommage, mais de cumul de renforcement.

Le même de type d'observations, que ce soit sur le comportement de l'éprouvette au cours de l'essai de CDmg ou sur la durée de ce dernier, ont été faites dans le cas de durée de blocs à 2000 et 7000 cycles (Annexe C). En effet, pour $N_b=7000$ cycles, le nombre de cycles à 175N a été de $8,4.10^4$ et pour $N_b=2000$ cycles de 5.10^4 cycles (il est à noter que cet essai a été arrêté avant la rupture de l'éprouvette en raison d'une sous-estimation de la durée de l'essai)

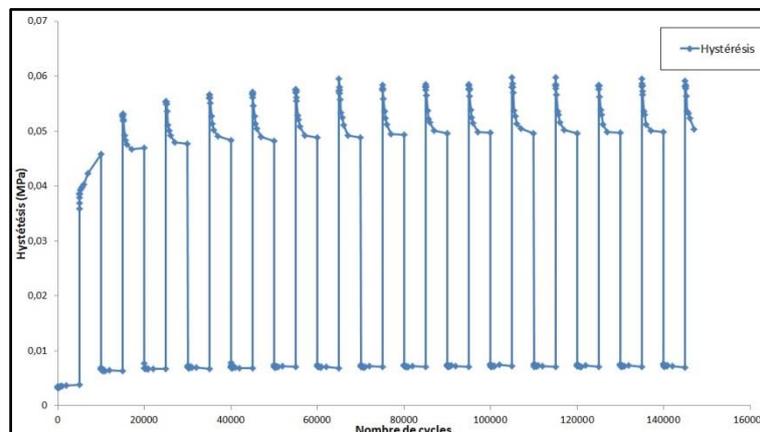


Figure 4. 9 – Evolution de l'hystérésis pendant un essai de cumul de dommage

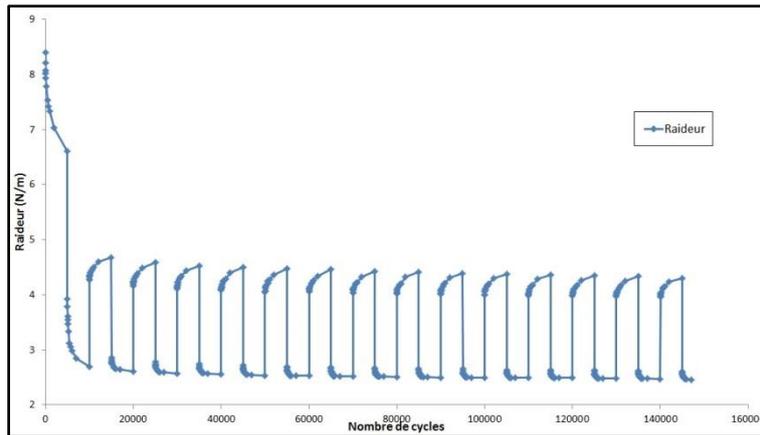


Figure 4. 10 – Evolution de la raideur pendant un essai de cumul de dommage

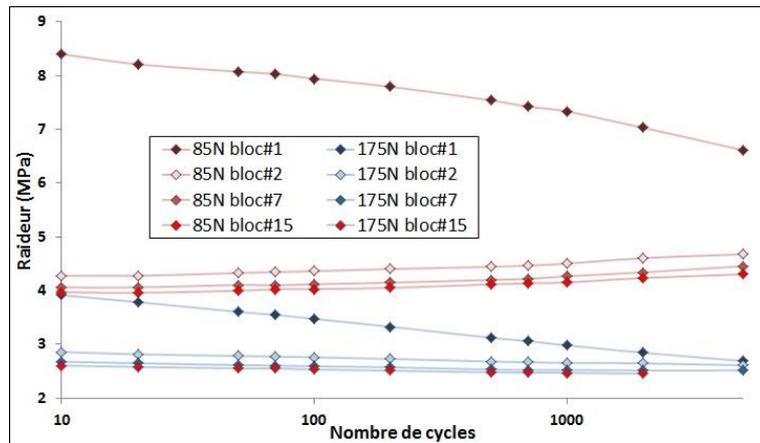


Figure 4. 11 – Evolution de la raideur au cours d'un essai CDmg vue bloc par bloc

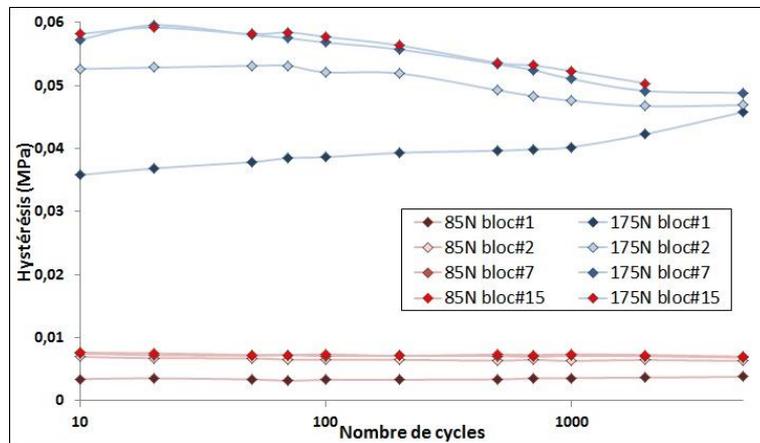


Figure 4. 12 – Evolution de l'aire de l'hystérésis au cours d'un essai CDmg vue bloc par bloc

3 Essais d'augmentation de palier jusqu'à rupture (APR)

Les essais par paliers à rupture (ou essais APR) correspondent à une configuration au cours de laquelle la sollicitation augmente à chaque bloc, jusqu'à rupture (Figure 4. 13), et la durée des blocs est prise constante pour chaque essai.

Chapitre 4 : Essais de fatigue à amplitude variable

Lors de cet essai, la durée des blocs a été le paramètre investigué. Les différentes valeurs peuvent être trouvées dans le Tableau 4. 2. De même, la liste des efforts appliqués lors des blocs est donnée dans le Tableau 4. 3.

Pour les configurations avec une durée de blocs plus courte que 5000 cycles, deux essais ont été effectués afin d’observer une éventuelle dispersion.

Un essai s’arrête une fois que l’éprouvette a rompu.

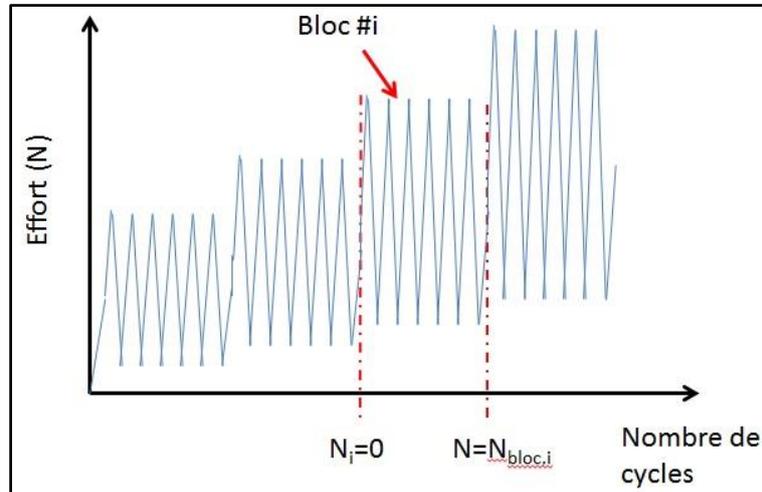


Figure 4. 13 – Evolution de l’effort lors d’un essai par palier à rupture

Nombre de cycles par bloc	Nombre d'essais
200	2
500	2
1000	2
5000	2
10000	1
20000	1
50000	1
100000	1
200000	1
500000	1

Tableau 4. 2 – Durées de blocs investiguées lors de la campagne.

Numéro de bloc	Effort maximal (N)	Contrainte alternée (Mpa)
1	85	0,33
2	100	0,38
3	115	0,44
4	125	0,48
5	140	0,54
6	150	0,58
7	160	0,61
8	175	0,67
9	190	0,73
10	210	0,81
11	225	0,86
12	250	0,96
13	275	1,06
14	300	1,15
15	325	1,25

Tableau 4. 3 – Listes des blocs et des sollicitations associées lors des essais en palier jusqu’à rupture

3.1 Evolution des paramètres de fatigue lors d'un essai APR

Nous allons donc détailler l'évolution de l'aire de l'hystérésis et de la raideur pendant le premier essai pour lequel la durée des blocs a été prise égale à 200 cycles.

Les Figure 4. 14 et Figure 4. 15 montrent ainsi l'évolution de ces deux paramètres lors de l'essai. Leur comportement est conforme à ce que l'on a vu dans les paragraphes précédents et lors du chapitre 2: l'aire de l'hystérésis et la raideur se comportent comme lors de la phase de chargement d'un essai PCD.

Nous allons définir un paramètre d'endommagement D à la fin du bloc i tel que :

$$D = \frac{H(N_{bloc,i})}{H(N_f)} \quad (1)$$

Où $N_{bloc,i}$ est définie par :

$$\forall i \leq f, N_{bloc,i} = \sum_{j \leq i} N_{bloc,j} \quad (2)$$

Avec f le numéro du dernier bloc. N_f est alors la durée de vie de l'éprouvette. $H(N_{bloc,i})$ est donc l'hystérésis à la fin du $i^{\text{ème}}$ bloc et $H(N_f)$ l'hystérésis à la fin de l'essai.

Regardons dès lors, l'évolution de ce paramètre D en fonction d'un nombre de cycles normé par rapport à la durée de l'essai N_f (Figure 4. 16) où D_i est la valeur de D à la fin du $i^{\text{ème}}$ bloc (Tableau 4. 3). Nous obtenons alors une courbe croissante et non linéaire. Il est néanmoins possible de noter que cette courbe peut être décomposée en cinq segments, comme une courbe linéaire par morceaux.

La composition de ces segments est donnée dans le Tableau 4. 4. On remarque alors que le premier segment est composé des blocs à un effort maximal inférieur à 125N, soit les sollicitations pour lesquelles la durée de vie d'un essai de fatigue à amplitude constante est supérieure à 10^6 cycles.

Lorsque l'on regarde les pentes des différents segments, une relation entre celles-ci apparait. En effet, la pente double entre le premier et le deuxième segment, ainsi qu'entre le deuxième et troisième segment. Par la suite, la pente n'est multipliée que par 1,5. Connaissant la pente du premier segment, il serait donc possible de reconstruire la courbe assez aisément.

Il semblerait alors qu'au cours du premier segment l'éprouvette ne subisse aucun endommagement. Par la suite, l'endommagement subi par l'éprouvette semble augmenter en suivant la partition de la courbe en segments. C'est-à-dire qu'au sein d'un même segment, l'endommagement augmente avec la même intensité, plus qu'au cours du segment précédent et moins qu'au cours du suivant.

Le Tableau 4. 4 montre que ces segments se retrouvent quel que soit la durée de blocs, si, bien sûr, l'éprouvette ne casse pas avant. La dernière colonne montre également qu'il y a entre les pentes des segments successifs un même coefficient multiplicateur, indépendamment de la durée du bloc.

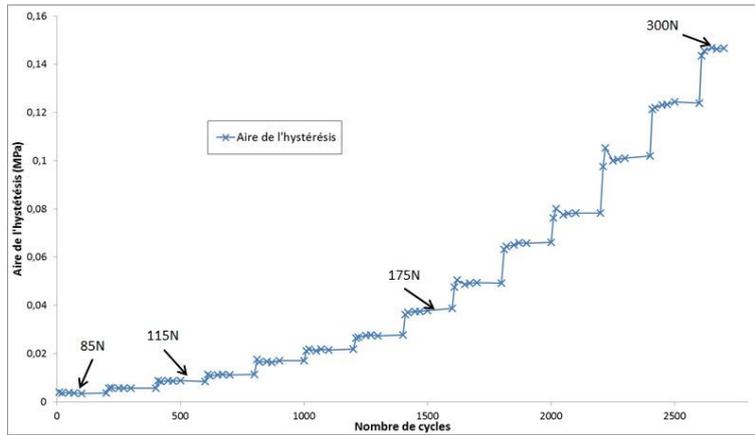


Figure 4. 14 – Evolution de l’hystérésis lors de l’essai en palier à rupture pour des blocs de 200 cycles

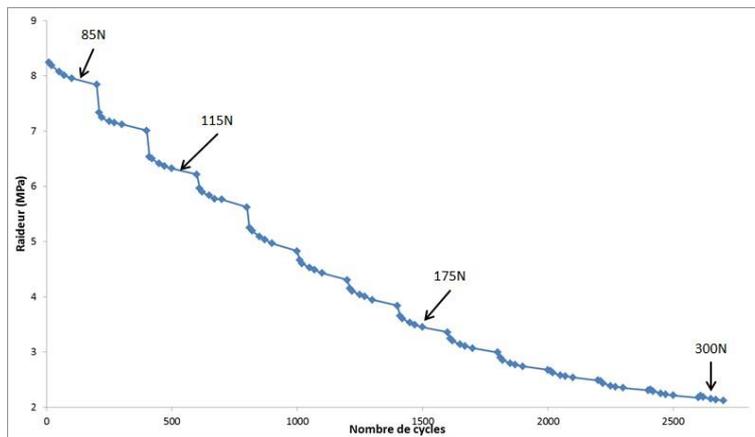


Figure 4. 15 – Evolution de la raideur lors de l’essai en palier à rupture pour des blocs de 200 cycles

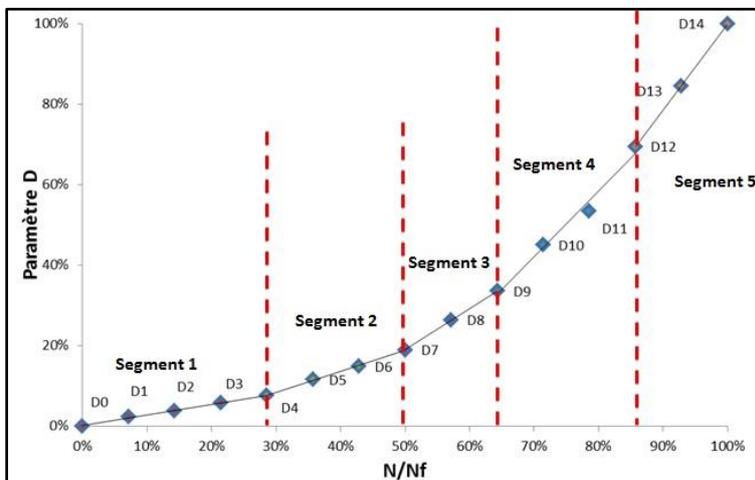


Figure 4. 16 – Evolution du paramètre D en fonction du nombre de cycles normé avec N_f

Segment #	Pente														
	N _b =200	N _b =200	N _b =500	N _b =500	N _b =1000	N _b =1000	N _b =5000	N _b =5000	N _b =10000	N _b =10000	N _b =20000	N _b =50000	N _b =100000	N _b =200000	
1 (E0 → E4)	0,2614	0,2599	0,3168	0,3655	0,416	0,3302	0,4468	0,4268	0,4372	0,5353	0,611	0,704	0,7243	0,7334	X 2
2 (E4 → E7)	0,5194	0,4956	0,5766	0,6554	0,7585	0,5921	0,8945	0,8156	0,8739	1,1016	1,2465	1,3799	1,5063	1,4996	
3 (E7 → E9)	1,025	0,9424	1,1031	1,2157	1,4849	1,1909	1,5305	1,5383	1,5634	1,7391					X 1,5
4 (E9 → E12)	1,6238	1,5189	1,7179	1,9737	2,2698	1,5403									X1,5
5 (E12 → E15)	2,1355	1,9709													

Tableau 4. 4 – Pentés des différents segments composant chaque courbe d'évolution du paramètre D en fonction du nombre de cycles normé par la durée de l'essai. Les nombres dans la colonne de droite représentent le coefficient multiplicateur entre les pentés de deux segments successifs.

3.2 Evolution de l'hystérésis en fin de bloc lors d'un essai APR

Nous allons alors regarder l'évolution de l'hystérésis en fin de bloc (non normée dans ce cas) pendant un essai APR.

La Figure 4. 17 montre l'évolution de l'hystérésis en fin de bloc en fonction de la contrainte alternée appliquée lors de ce bloc. Il est observé que l'évolution de la valeur de l'aire de l'hystérésis à la fin d'un bloc augmente avec la durée de ce bloc : par exemple, au palier à 175N, l'aire de l'hystérésis en fin de bloc va de 0,038MPa pour N_{bloc}=200 cycles à 0,049MPa pour N_{bloc}=5.10⁴ cycles. On peut également noter que, plus la durée des blocs est courte, plus la sollicitation à laquelle l'éprouvette va casser est élevée (Tableau 4. 5).

La Figure 4. 18 montre l'évolution de l'aire de l'hystérésis pour les différents blocs de sollicitations et ce pour différentes durées de blocs. Il apparait qu'il y a peu de différence pour les blocs correspondant aux sollicitations les plus faibles (85N, 100N et 115N). Par contre, au-delà, une croissance significative est observée avec la durée du bloc. En effet, plus celui-ci dure, plus la sollicitation va avoir un impact sur la structure de l'éprouvette. L'hystérésis va donc atteindre des valeurs plus importantes, ce qui est représentatif d'un endommagement, également augmentant.

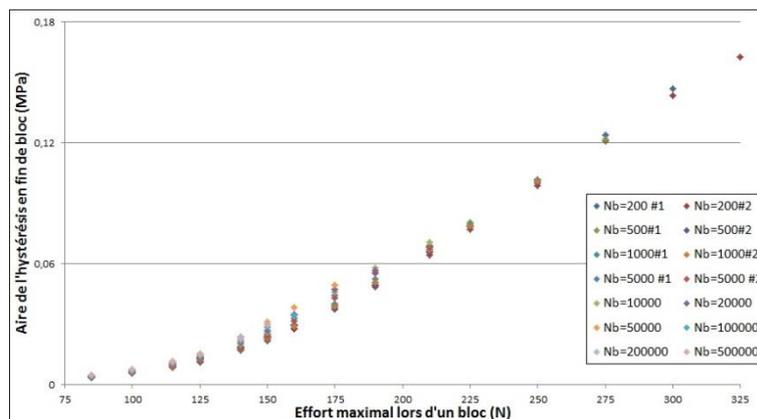


Figure 4. 17 – Evolution de l'hystérésis en fin de bloc en fonction de la contrainte alternée appliquée sur l'éprouvette pendant ce bloc au cours d'essais en palier à rupture

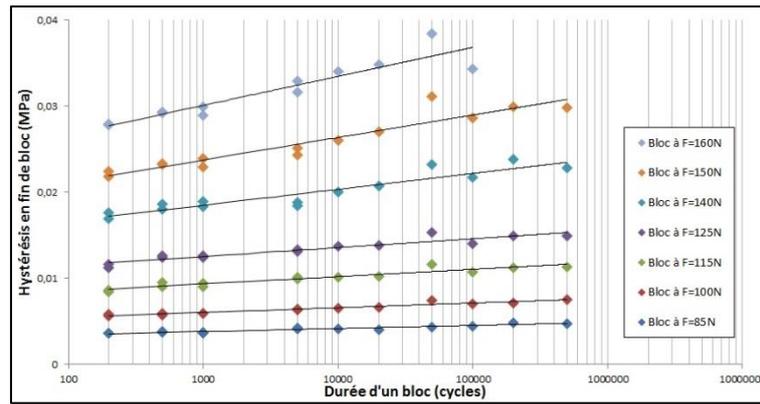


Figure 4. 18 – Evolution de l’hystérésis en fin de bloc en fonction la durée de bloc. Les mesures correspondant aux mêmes blocs, ie à la même sollicitation d’un essai à l’autre, ont été représentées de la même couleur.

N_b (cycles)	F_{rupt} (N)
200 #1	300
200 #2	325
500 #1	275
500 #2	250
1000 #1	225
1000 #2	250
5000 #1	210
5000 #2	210
10000	210
20000	190
50000	175
100000	160
200000	150
500000	150

Tableau 4. 5 – Effort appliqué lors du bloc où la rupture a eu lieu pour chaque essai APR.

3.3 Construction d’une courbe de Wöhler à partir des essais APR.

Ce qui a donc été mis en lumière dans les paragraphes précédents est que, lors d’un essai APR, plus la durée des blocs est courte plus la sollicitation pour laquelle l’éprouvette va rompre est élevée. En conséquence, l’aire de l’hystérésis à la rupture (ie à la fin du dernier bloc) est également plus importante.

Lorsque l’on trace l’évolution de l’aire l’hystérésis à la rupture en fonction de la durée de blocs pour chaque essai, on obtient une évolution puissance. Il se trouve que celle-ci se superpose quasiment avec la courbe de Wöhler de [Poisson 2012] (Figure 4. 19).

On peut donc conclure qu’il est possible, à travers ces essais en palier jusqu’à rupture, d’obtenir une courbe de Wöhler. Ici la loi puissance que l’on en retire est la suivante :

$$H_{rupt} = 0,4211 \times N_f^{-0,208} \quad (3)$$

Il faut néanmoins noter que la précision de cette loi n’est pas la même, selon que l’on regarde des essais à faible ou longue durée de vie. Cela est mis en lumière en reprenant tous les essais de fatigue à rapport de charge 0,1 effectués sur cette thèse et celle de [Poisson 2012] en en traçant un graphe montrant la durée de vie expérimentale en fonction de la durée de vie théorique calculée avec l’équation (3) (Figure 4. 20). On peut voir que, pour des essais plus courts que 10^6 cycles, il y a une bonne corrélation mais, au-delà, cette équation est plus difficilement applicable. Il faut néanmoins

Chapitre 4 : Essais de fatigue à amplitude variable

pondérer ce dernier point, puisque les deux groupes de points qui ne vérifient pas la loi puissance selon un facteur supérieur à dix sont des essais effectués par [Poisson 2012] (Figure 4. 21) et qui ont les caractéristiques suivantes :

- le groupe entouré de rouge correspond à des essais à amplitude constante et mené à un rapport de charge de 0,5. Comme le montrent les Figure 4. 20 et Figure 4. 21, ces points ne suivent aucune des deux lois de comportement. Cela est dû au fort renforcement induit par la cristallisation sous tension à ce rapport de charge.
- Le groupe entouré de jaune correspond à des essais qui ont été arrêtés avant la rupture de l'éprouvette. La durée de vie expérimentale a alors été prise égale au nombre de cycles pour lequel l'essai a été arrêté.

Mis à part ces deux groupes d'essais, la loi tirée des essais APR montre une bonne corrélation et ce, pour les données de trois campagnes d'essais différentes.

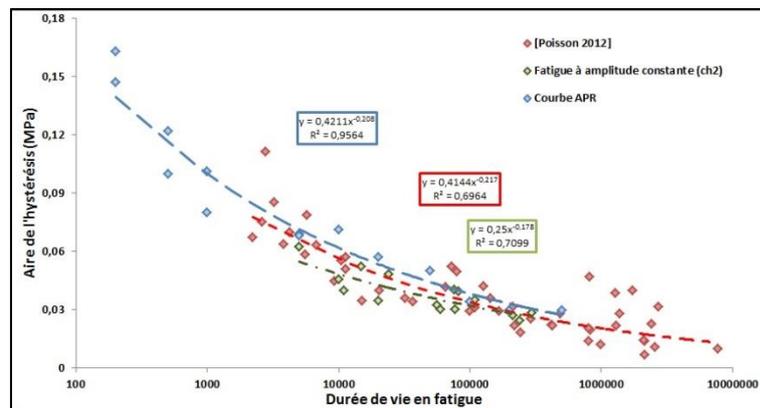


Figure 4. 19 – Courbes de Wöhler tirées de [Poisson 2012], de la campagne de fatigue à amplitude constante du chapitre 2 et des essais APR.

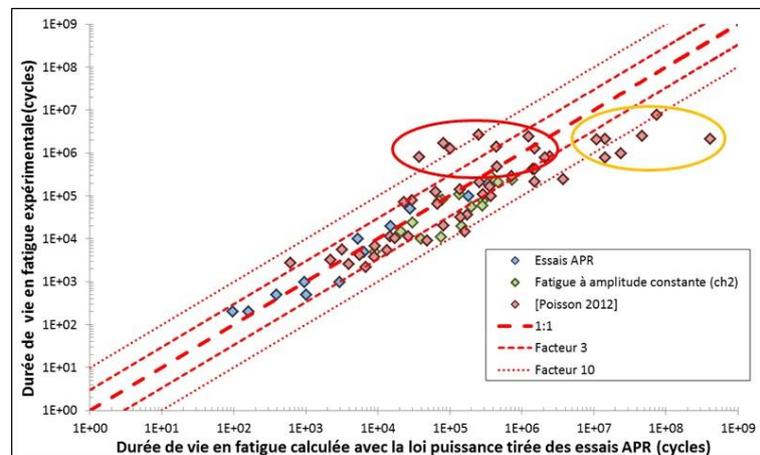


Figure 4. 20 – Comparaison entre les durées de vie expérimentale et celle calculée avec la loi d'évolution obtenue grâce aux essais par palier à rupture. Les essais entourés de rouge et de jaunes sont les essais de [Poisson 2012] à R=0,5 et arrêtés avant rupture.

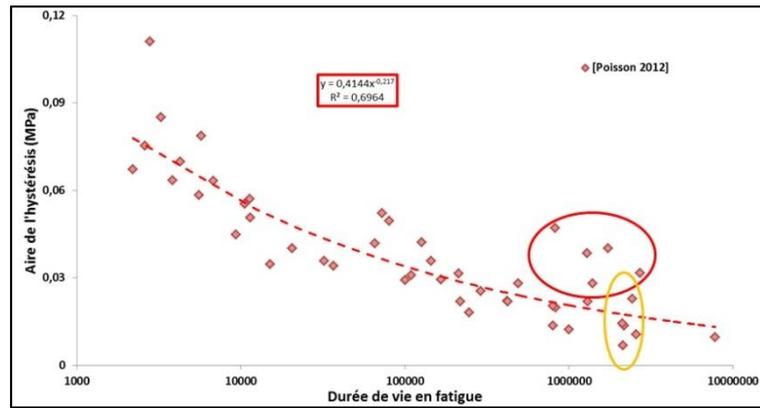


Figure 4. 21 – Courbe de Wöhler de [Poisson 2012] où apparaissent les essais à rapport de charge 0,5, entourés de rouge, et les essais qui ont été arrêtés avant rupture, entourés de jaune.

4 Diagramme raideur/hystérésis (ou diagramme K/H)

Lors des essais PCD, nous avons remarqué que l'aire de l'hystérésis et la raideur présentent des évolutions différentes selon que l'on se situe dans la phase de charge ou de décharge. Cela n'est pas sans rappeler l'évolution de la contrainte au cours d'essais de relaxation par paliers.

En effet, l'évolution de ce paramètre change, selon que l'on soit en cours de charge ou de décharge (Figure 4. 22 [Lion 1996 ; Höfer et Lion 2009]). Ce changement de comportement est observé sur plusieurs élastomères différents (NR [Amin et al. 2002], BR [Delattre 2014] ou CR [Bergström et Boyce 1998]).

Autant le comportement lors de la phase de chargement est expliqué par la relaxation des chaînes, autant la littérature n'apporte pas d'explication à la croissance de la contrainte lors de la phase de décharge.

Néanmoins, ce type d'essai apporte une approche intéressante qui est de représenter la contrainte en fonction de la déformation. Celle-ci permet par exemple de déterminer, par l'observation de l'hystérésis d'équilibre, si le comportement du matériau est viscoélastique ou si d'autres phénomènes interviennent (plasticité, endommagement, etc...).

Nous avons alors essayé d'adapter cette représentation à nos essais dynamiques, en traçant l'évolution de l'aire de l'hystérésis en fonction de la raideur, dans un diagramme que nous appellerons par la suite diagramme raideur/hystérésis.

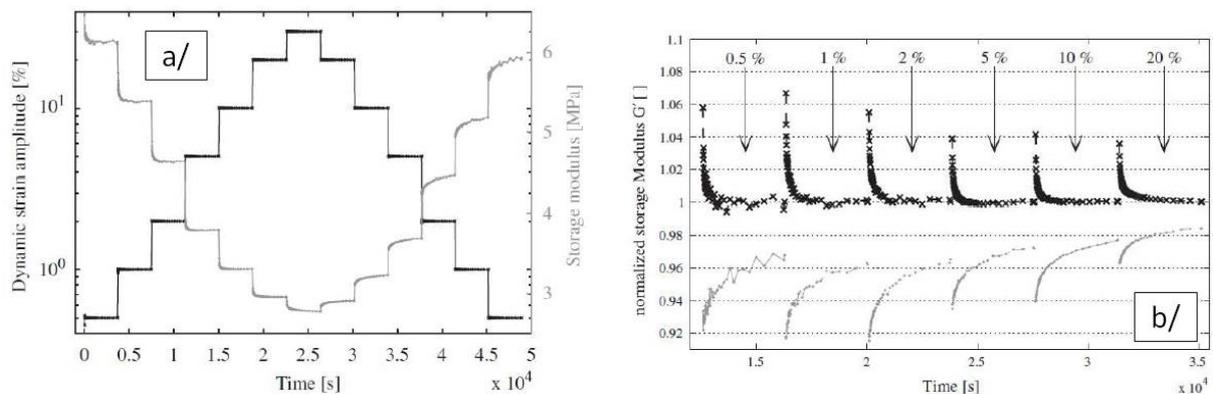


Figure 4. 22 – Essais de relaxation par paliers [Höfer et Lion 2009] : a/ amplitude et module de stockage, b/ Modules de stockage normalisés aux amplitudes correspondantes

4.1 Reprise des essais présentés depuis le début du manuscrit

Nous allons, dans un premier temps, reprendre les différents types d'essais présentés dans les chapitres 2, 3 et 4 et observer ce qu'apporte ce diagramme dans la compréhension du comportement du polychloroprène en fatigue.

4.1.1 Essais de fatigue à amplitude constante

La Figure 4. 23 montre l'évolution dans le diagramme raideur/hystérésis des essais à rapport de charge 0,1 présentés dans le chapitre 2.

Il apparait un ordonnancement des courbes en fonction de l'intensité de la sollicitation : la croissance de la sollicitation se fait de gauche à droite, suivant l'organisation des courbes observées lors de l'étude de l'évolution de l'aire de l'hystérésis dans le chapitre 2.

On retrouve dans cette représentation les différentes phases d'évolution de l'aire de l'hystérésis. Il est à noter que les phases 2 et 3 suivent une loi logarithmique comme montré sur la Figure 4. 24.

Nous avons pu observer que la raideur est un paramètre dispersif, car rendant compte de l'anisotropie, de la répartition des composants dans la matrice, ou encore de la répartition des ponts de réticulation consécutifs à la conception des éprouvettes. Or sur ce diagramme, les différents essais à une même sollicitation se retrouvent sur une même courbe iso-effort. La dispersion induite par la conception des éprouvettes est donc effacée sur ce type de diagramme.

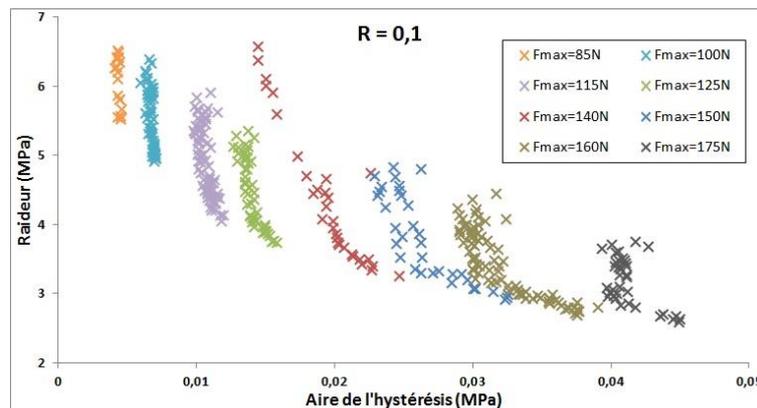


Figure 4. 23 – Diagramme raideur/hystérésis (K/H) pour les essais en fatigue à amplitude constante à R = 0,1

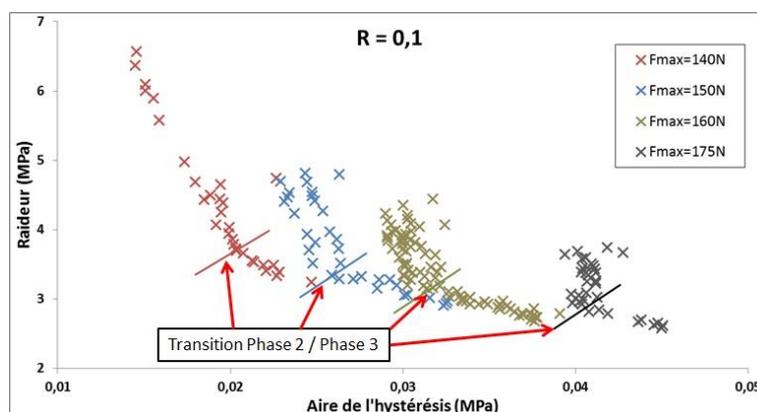


Figure 4. 24 – Transition entre les phases 2 et 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis sur un diagramme K/H

4.1.2 Essais de rodage dynamique à effort maximal constant

La Figure 4. 25 montre les courbes de rodage dynamique où les efforts maximaux appliqués lors des étapes 1 et 3 sont de 175N (chapitre 3, §2).

On peut noter que la courbe maîtresse semble confondue avec la courbe iso-effort, telle que décrite dans le paragraphe précédent. Toutes les considérations sur celle-ci s’appliquent donc sur la courbe d’iso-effort, en particulier l’aspect de minimum d’énergie. Nous considérons, par la suite, que les courbes d’iso-effort sont les courbes maîtresses pour une sollicitation donnée.

Les courbes de l’étape 3 apparaissent également clairement avec une évolution initiale inverse par rapport à la courbe maîtresse.

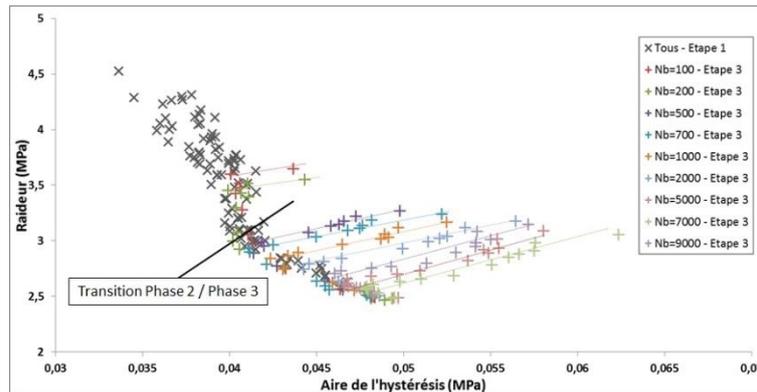


Figure 4. 25 – Diagramme K/H pour les essais de rodage dynamique

4.1.3 Essais de fatigue à amplitude variable

Les essais de cumul de dommage (CDmg), de palier en charge et décharge (PCD) et d’augmentation de palier jusqu’à rupture (APR) ont montré que l’éprouvette ne présentait pas le même comportement entre le premier et le ou les paliers suivants à une même sollicitation, du fait de l’historique de chargement.

La Figure 4. 26 montre la représentation, pour le rapport de charge 0,1, de toutes les sollicitations intervenant au cours des essais PCD. Il en ressort que, quel que soit l’historique de chargement, les couples de points (aire de l’hystérésis ; raideur) sont sur la courbe maîtresse de la sollicitation considérée. C’est une généralisation de l’observation faite dans le paragraphe 1.1 sur la disparition de la dispersion liée à des paramètres variables d’une éprouvette à l’autre.

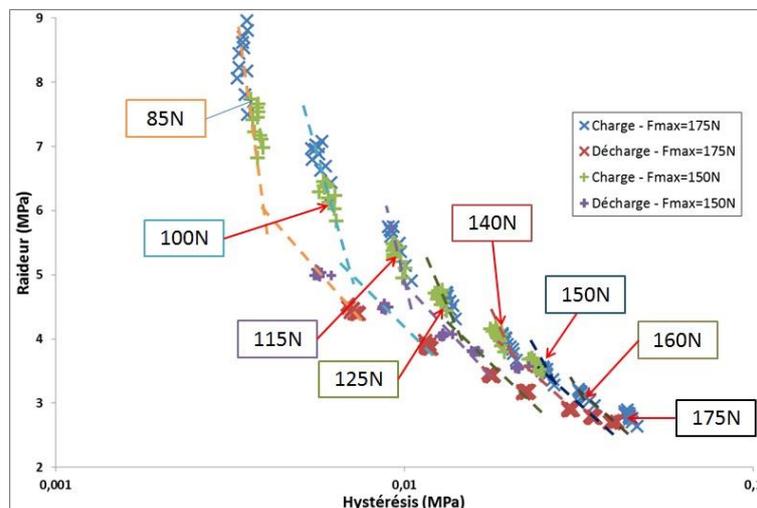


Figure 4. 26 – Diagramme K/H pour les essais PCD avec le palier maximal à 175N (pour le premier essai) et 150N (pour le second essai)

4.1.4 Essais à température différente de l'ambiante

La Figure 4. 27 montre l'évolution de la raideur en fonction de l'aire de l'hystérésis pour les essais à différentes température d'enceinte.

La référence correspond au même essai que dans le paragraphe 4.2 du chapitre 2.

On peut, dans un premier, temps noter que, mis à part les essais à -15°C, il y a très peu de dispersion entre les essais dans les mêmes conditions. De plus, il apparaît que pour les températures supérieures à l'ambiante (40°C et 50°C), les courbes restent proches de la courbe maîtresse. En revanche, les essais à température plus faible que l'ambiante montrent des différences.

A 10°C, la raideur, pour laquelle l'aire de l'hystérésis augmente, est plus élevée que pour la courbe maîtresse. La courbe garde néanmoins la même allure, montrant donc une translation selon l'axe de la raideur.

A -15°C, les deux essais montrent des courbes qui ne se superposent pas. Cela peut être dû au temps entre le moment où le four est à la température de consigne et le moment où l'essai se lance : 2 minutes pour l'essai numéro 1 et 5 minutes pour l'essai numéro 2. Le décalage sur la raideur observé entre les deux essais serait alors dû à une différence de température initiale. On observe de plus, que les courbes sont décalées par rapport à la courbe maîtresse selon l'axe de la raideur et de l'aire de l'hystérésis. Enfin, l'évolution des deux courbes, plus chaotique que celle de la courbe maîtresse, reflète les évolutions en plusieurs phases de la raideur et de l'aire de l'hystérésis.

Ces deux essais à 10°C et -15°C montrent une évolution translatée selon les axes de la raideur et de l'hystérésis par rapport aux autres essais. Il semble que cela soit dû à la proximité de la zone de transition vitreuse.

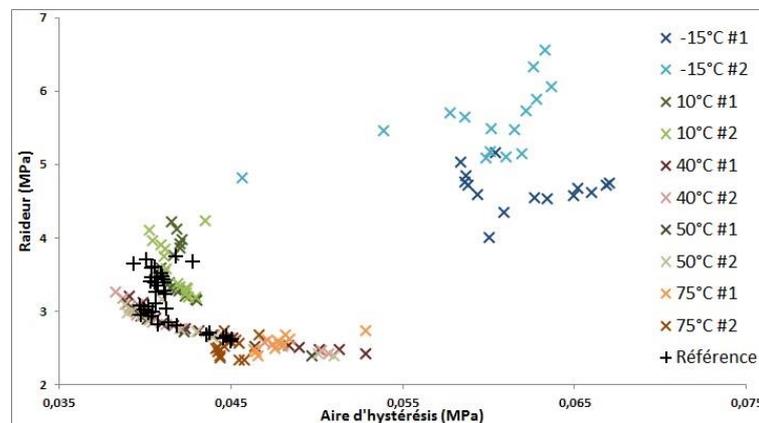


Figure 4. 27 – Diagramme K/H pour les essais à température d'enceinte différentes de l'ambiante

4.1.5 Bilan

Dans ce paragraphe, nous n'avons abordé que les essais à rapport de charge 0,1. Or, nous avons retrouvé les mêmes observations pour les autres rapports de charge investigués lors de cette thèse.

Ce diagramme permet d'avoir une représentation prenant en compte l'historique de chargement. L'apparition de courbes maîtresses, généralisant le concept vu au chapitre 3, confirme l'idée qu'au cours d'un essai de fatigue, une éprouvette est soumise à une compétition entre l'endommagement et le renforcement arbitré par l'auto-échauffement, et que c'est l'évolution de l'équilibre entre ces deux phénomènes qui régit le comportement du matériau.

Le fait que les courbes maîtresses extrapolent les courbes de fatigue à amplitude constante semble être lié à un caractère en fatigue intrinsèque du matériau. En effet, il semblerait que si l'équilibre entre l'endommagement et le renforcement n'était pas impacté par l'auto-échauffement

ou d'autres phénomènes parasites (UV, ozone, etc...), un essai à amplitude constante décrirait la courbe jusqu'à la rupture de l'éprouvette causée par le fluage dynamique. L'emplacement d'un essai sur ces courbes est donc fonction de l'endommagement et du renforcement de l'éprouvette à un cycle N , ces paramètres étant fortement affectés par la température ou les attaques chimiques.

Une implication de cette observation est que, sur ce diagramme, la dispersion liée à la fabrication des éprouvettes disparaissent. Elle est prise en compte comme étant de l'historique de chargement.

4.2 Estimation du nombre de cycles associé à un point dans ce diagramme

Ce diagramme permet donc d'avoir la courbe maîtresse liée à un essai en fatigue, mais le nombre de cycle y est implicite.

En nous aidant de la base de données à notre disposition, nous avons mis au point une démarche expérimentale pour déterminer le nombre de cycles avant la transition entre les phases 2 et 3. Nous avons alors pu estimer la durée de vie en fatigue pour les essais soumis aux sollicitations les plus faibles.

4.2.1 Transition entre les phases 2 et 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis

Sur la Figure 4. 28 a est tracé le diagramme raideur/hystérésis pour tous les essais à amplitude constante ayant été effectué à rapport de charge 0,1. Comme montré au paragraphe précédent, les phases d'évolution de l'aire de l'hystérésis lors des essais à amplitude constante sont observables en suivant les courbes maîtresses.

Néanmoins, pour les sollicitations les plus faibles, la transition entre la phase 2 et la phase 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis n'est pas observée. Celle-ci est importante dans l'étude du comportement en fatigue du matériau, car symptomatique de l'impact de l'auto-échauffement sur la propagation des fissures (cf chapitre 2)

Ce diagramme doit donc pouvoir permettre l'estimation, dans un premier temps, de l'aire de l'hystérésis et de la raideur pour lesquelles la transition se produit.

Les points où la transition a été observée lors d'essais à amplitude constante sont indiqués sur la Figure 4. 28 et correspondent aux essais à effort maximal supérieur à 125N. Pour les autres, l'essai n'a pas duré assez longtemps. Ces points semblent suivre alors une loi logarithmique. Il suffit alors de mesurer l'intersection entre cette courbe et celle suivant la loi logarithmique de la phase 2 de l'essai concerné pour obtenir le point de transition entre la phase 2 et la phase 3 si celle-ci n'est pas observée lors d'un essai à amplitude constante.

Une fois obtenues les coordonnées des transitions, il suffit de déterminer le nombre de cycles nécessaire pour les essais en question pour que la raideur atteigne une telle valeur. Nous avons vu dans le chapitre 2 que la raideur suivait une loi logarithmique, un simple calcul permet d'obtenir ce nombre de cycles N_{p2p3} (Tableau 4. 6).

Dans certains cas, surtout rencontrés pour le rapport de charge 0,5, l'évolution de la raideur se décompose en deux phases (chapitre 2, §3.2.2). Il faut alors utiliser l'équation de la courbe lors de la deuxième phase pour déterminer N_{p2p3} .

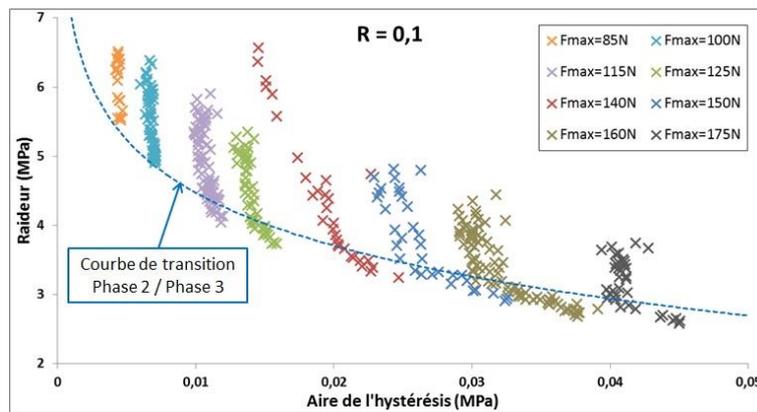


Figure 4. 28 – Calcul de la courbe de transition phase 2 / Phase 3

Fmax (N)	Expérimental		Estimation	
	Transition P2/P3 (cycles)	Nf (cycles)	Transition P2/P3 (cycles)	Nf (cycles)
85	NA	NA	6,41E+05	1,95E+09
100	NA	NA	2,28E+05	1,08E+08
115	2,00E+05	NA	1,64E+05	3,51E+06
125	2,00E+04	4,24E+05	7,86E+03	4,21E+05
140	5,00E+03	2,00E+05	5,77E+03	1,77E+05
150	4,00E+03	6,20E+04	4,70E+03	5,20E+04
160	2,00E+03	3,78E+04	3,25E+03	3,40E+04
175	1,00E+03	1,03E+04	9,98E+02	8,30E+03

Tableau 4. 6 – Récapitulatif des valeurs moyennes pour la transition Phase 2 à phase 3 et durées de vie expérimentale et estimées pour le rapport de charge 0,1

4.2.2 Estimation de la durée de vie d'un essai en fatigue à amplitude constante

4.2.2.1 Détermination de la courbe d'évolution lors de la phase 3

L'étape suivant le calcul de la transition phase 2 / phase 3 est la détermination de l'équation de la courbe représentant la phase 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis. Lorsque celle-ci est observée au cours de l'essai, il suffit de tracer la courbe de tendance. En revanche, si cette dernière n'a pas été observée, il faut en calculer les paramètres.

Pour les essais les plus endommageants, on observe que, lors de la phase 3, la raideur suit une loi logarithmique en fonction de l'aire de l'hystérésis de pente plus faible que lors de la phase 2 :

$$K = A_{p3} \times \ln(H) + B_{p3}$$

En traçant l'évolution des paramètres A_{p3} et B_{p3} en fonction de l'effort maximal de l'essai, il est possible d'extrapoler les paramètres de la loi d'évolution logarithmique lors de la phase 3 à propos des essais pour lesquels ces données n'ont pas été mesurées (Figure 4. 29).

Cette étape est évidemment inutile si la phase 3 est observée au cours de l'essai.

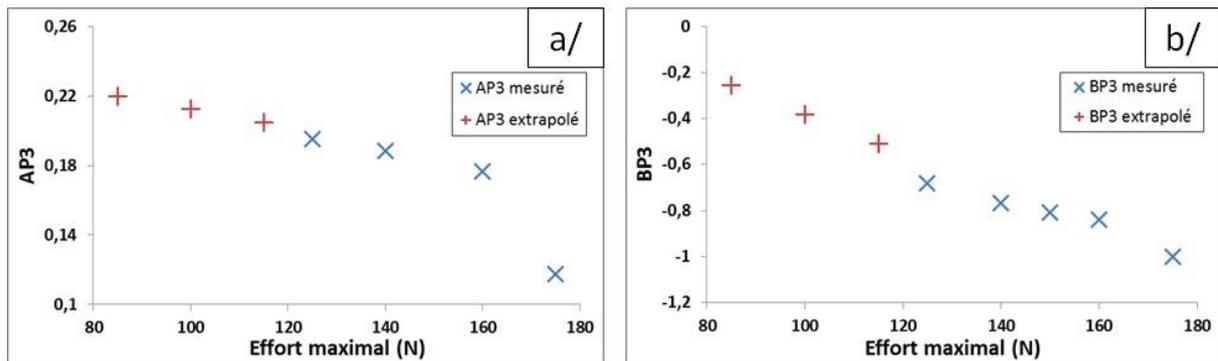


Figure 4.29 – Calcul des paramètres A_{P3} (a/) et B_{P3} (b/) de la courbe d'évolution de la raideur en fonction de l'aire de l'hystérésis lors de la phase 3 d'évolution de l'aire de l'hystérésis pour les essais où elle n'a pas été observée.

4.2.2.2 Courbe de rupture

Au même titre que pour la transition phase 2 à phase 3, il est possible d'estimer une courbe de rupture à partir des essais en fatigue à amplitude constante ayant cassé. Nous faisons ici une hypothèse forte : la courbe de rupture est de la même forme que celle de transition entre la phase 2 et la phase 3 (Figure 4.30).

La phase 3 étant celle au cours de laquelle la rupture de l'éprouvette a lieu, l'intersection de la courbe de rupture avec la courbe de phase 3, pour l'essai concerné, donne la raideur et l'hystérésis lorsque la rupture intervient.

Pour obtenir le point correspondant à la rupture, il suffit alors de calculer pour un essai donné l'intersection entre la courbe de rupture et la courbe d'évolution en cours de phase 3. On obtient l'aire de l'hystérésis et surtout la raideur pour lesquelles l'éprouvette est supposée casser. Similairement au calcul de la transition phase 2 à phase 3, on obtient une estimation de la durée de vie en fatigue à l'aide de la courbe d'évolution de la raideur au cours d'un essai à amplitude constante. Les estimations de durée de vie ainsi calculée sont présentées dans le Tableau 4.6.

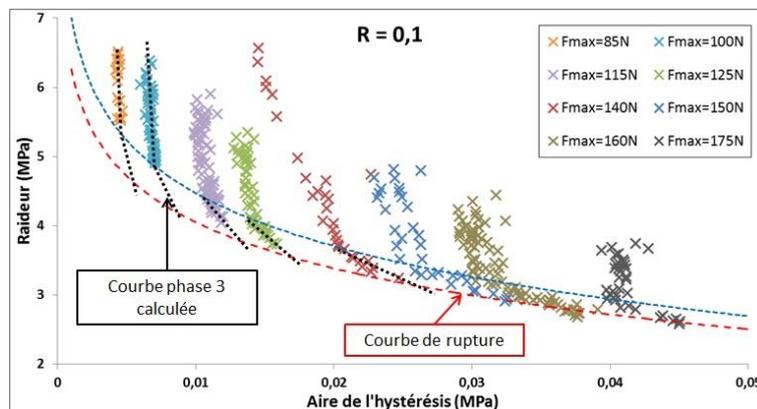


Figure 4.30 – Calcul de la courbe de rupture

4.2.2.3 Comparaison avec la base de données

La base de données en fatigue que nous avons à notre disposition nous permet d'opérer une comparaison avec les résultats de cette estimation pour un rapport de charge inférieur ou égal à 0,2. Au-delà, nous n'avons expérimentalement pas assez d'essais étant allé jusqu'à rupture. La courbe de rupture pour les rapports de charge 0,3 et 0,5 est donc à considérer avec prudence.

La Figure 4.31 montre donc, pour les essais considérés, les estimations de la durée de vie en fatigue. L'équation de la loi puissance pour cette estimation est la suivante :

$$H_{ed} = 0,36 \cdot N_f^{-0,23} \quad (5)$$

Chapitre 4 : Essais de fatigue à amplitude variable

Les autres lois puissances tracées sur cette figure sont :

- [Poisson 2012] : loi tirée des essais en fatigue de Poisson sur le CR

$$H_{rupt} = 0,41. N_f^{-0,22} \quad (6)$$

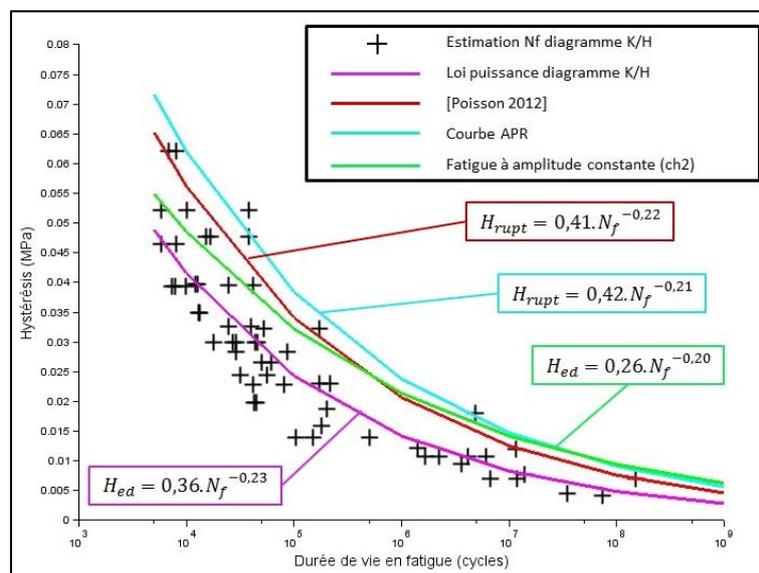
- Loi CDmg : loi tirée des essais de cumul de dommage (paragraphe 2 de ce chapitre)

$$H_{rupt} = 0,42. N_f^{-0,21} \quad (7)$$

- Loi amplitude constante : loi tirée de la campagne de fatigue du chapitre 2

$$H_{ed} = 0,26. N_f^{-0,2} \quad (8)$$

Il apparaît que, malgré la forte hypothèse faite sur la forme de la courbe de rupture dans le diagramme raideur/hystérésis, on obtient une loi puissance relativement proche des autres calculées pour le CR (même si on note une tendance à sous-estimer la durée de vie).



Conclusion

Dans ce chapitre il a été question d'essais de fatigue à amplitude variable.

Dans un premier temps, des essais par paliers en charge-décharge ont été menés et ont permis de mettre en lumière un changement de comportement du CR entre la phase de charge et celle de décharge. Un parallèle a alors été fait avec les essais de relaxation par paliers montrant un changement de comportement du même type. Ce phénomène a été expliqué par une modification de l'équilibre entre l'endommagement et la cristallisation sous-tension, au profit de cette dernière. Il apparaît que le comportement inverse en fatigue est de plus en plus marqué, à mesure que la sollicitation diminue, et cela est probablement dû à la diminution de l'auto-échauffement.

Nous avons ensuite abordé les essais de cumul d'endommagement où ont alterné des étapes à sollicitation endommageante ($R=0,1$, $F_{\max}=175\text{N}$ et $N_f = 10'000$ cycles) et non endommageante ($R=0,1$, $F_{\max}=85\text{N}$ et $N_f \gg 10^6$ cycles). Il apparaît alors que la somme des cycles à 175N évolue de 5 à 8,4 fois la durée de vie en fatigue pour cette même sollicitation. Il apparaît donc que le phénomène observé au chapitre 3 lors des essais de rodage dynamique s'observe également si on substitue à l'étape de repos une étape non endommageante.

La dernière série d'essai à amplitude variable a consisté en une augmentation de la sollicitation d'une étape à l'autre jusqu'à la rupture de l'éprouvette (augmentation de palier jusqu'à rupture). Il a été mis en évidence que, quel que soit le nombre d'étapes avant la rupture, la courbe d'évolution de du paramètre d'endommagement D est linéaire par morceaux, et chacun de ces segments concernent les mêmes sollicitations. Pour faire varier ce nombre d'étapes, nous avons joué sur la durée de ces dernières. Il ressort alors, qu'à partir de ces mesures, il est possible de tracer une courbe de Wöhler très proche de celle obtenue par [Poisson 2012]

Dans la quatrième et dernière partie, le diagramme raideur/hystérésis (ou K/H) a été introduit. Cette représentation permet d'unifier les essais indépendamment de leur historique de chargement. La courbe maîtresse, telle que définie au chapitre 3, a ainsi vu sa définition élargie à l'ensemble des essais de fatigue présentés dans ce manuscrit. Une méthode pour estimer la durée de vie d'un essai de fatigue à partir de ce diagramme a également été présentée.