

Analyse sur éprouvettes simples à micro-structures maîtrisées

Sommaire

4.1	Mise en place des protocoles d'analyse	98
4.1.1	Philosophie	98
4.1.2	Données mécaniques	98
4.1.3	Obtention de la courbe d'auto-échauffement	98
4.1.4	Obtention des cartographies d'énergie dissipée	103
4.1.5	Protocole d'identification de la courbe d'endurance déterministe	105
4.2	Schéma de présentation des résultats	110
4.2.1	Données associées au comportement	111
4.2.2	Données associées à la ruine	111
4.3	Influence de l'orientation	112
4.3.1	Éprouvettes Dogbone	112
4.3.2	Éprouvettes amincies	121
4.3.3	Bilan	125
4.4	Influence du chargement mécanique	127
4.4.1	Variation du rapport de charge	128
4.4.2	Essais de fatigue interrompus	135
4.4.3	Enchaînement de blocs	138
4.4.4	Essais de fatigue après fluage	141
4.4.5	Bilan	144
4.5	Chargements mécaniques simples pour différentes conditions thermo-hygrométriques (température et teneur en humidité)	146
4.5.1	Dispositif expérimental	146
4.5.2	Résultats	147
4.5.3	Bilan	149
4.6	Bilan pour les éprouvettes simples	150

4.1 Mise en place des protocoles d'analyse

4.1.1 Philosophie

Comme nous l'avons déjà évoqué, ces éprouvettes sont conçues dans le but de travailler sur des cas d'orientation moyenne des fibres maîtrisée et pour diverses conditions thermo-hygro-métriques et de chargement mécanique. Les angles de prélèvement considérés ont été choisis de façon à ce que l'effet de l'orientation puisse être étudié pour le cas d'un alignement moyen longitudinal (éprouvettes prélevées à 0°), le cas d'un alignement moyen transversal (éprouvettes prélevées à 90°) et un cas entre les deux (éprouvettes prélevées à 45°). Ces éprouvettes permettront de caractériser l'influence des différents facteurs (orientation, environnement et chargement) sur les propriétés en fatigue.

4.1.2 Données mécaniques

Les données mécaniques mesurées lors des essais sur les éprouvettes Dogbone sont l'effort axial et le déplacement des couteaux de l'extensomètre. A partir de celles-ci, nous pouvons obtenir la contrainte nominale (définie comme l'effort axial divisé par la section traverse minimale initiale de l'éprouvette) et la déformation nominale (définie comme le déplacement relatif des couteaux de l'extensomètre divisé par la distance entre les couteaux au début de l'essai). La figure 4.1 montre des exemples de courbes contrainte nominale-déformation nominale pour chaque angle de prélèvement considéré pour des paliers de chargement de 20 cycles sinusoïdaux pendant un essai d'auto-échauffement. Ces graphiques illustrent la qualité de l'asservissement de la machine d'essais, la boucle d'hystérèse et le déplacement de la boucle (appelé déformation résiduelle). Notons que la valeur initiale de déformation nominale est différente de zéro, cela est dû au fait que l'éprouvette présente une histoire de chargement. En effet, pendant les essais d'auto-échauffement, celle-ci est soumise à plusieurs paliers de chargement (cf. §3.5.1). La façon d'exploiter ces données mécaniques sera montrée par la suite.

4.1.3 Obtention de la courbe d'auto-échauffement

Dans cette partie le protocole expérimental pour obtenir les courbes d'auto-échauffement sera détaillé. Celles-ci sont obtenues par une analyse sur l'état transitoire avec une approche 0D (cf. §2.1.4). L'analyse sur l'état stationnaire avec une approche 0D (cf. §2.1.3) est aussi utilisée pour faire des comparaisons entre les deux analyses. L'objectif ici est d'obtenir l'énergie dissipée par cycle pour des éprouvettes soumises à des chargements cycliques à partir des mesures thermiques, tel que présenté dans le chapitre 2.

Protocole expérimental

Dans cette partie, le protocole expérimental pour réaliser une analyse sur un état transitoire (cf. §2.1.4) est détaillé. Les éprouvettes sont soumises à des chargements cycliques avec un rapport de charge et une fréquence inchangés. La température est mesurée sur la zone utile de l'éprouvette avec une fréquence de 20 images par seconde. Un certain nombre de paliers de

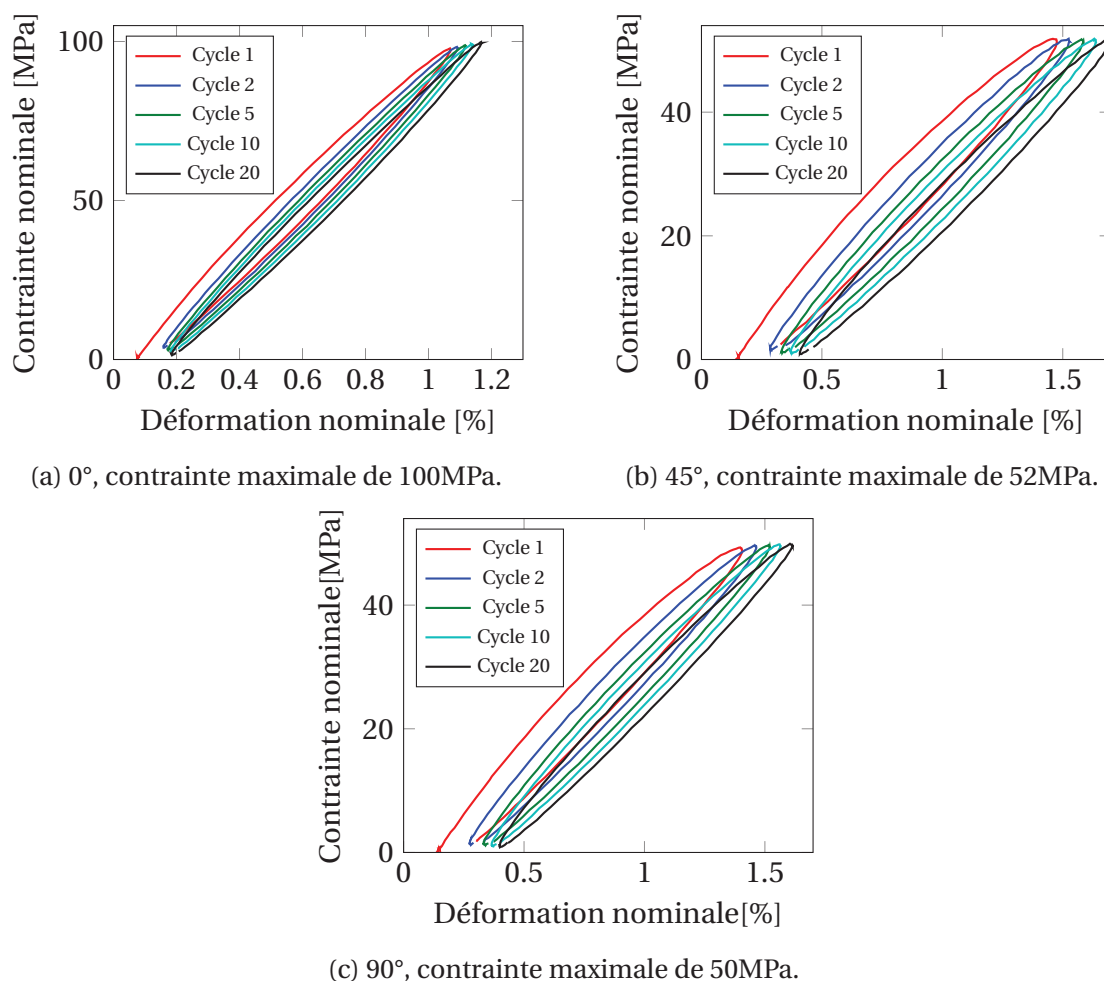


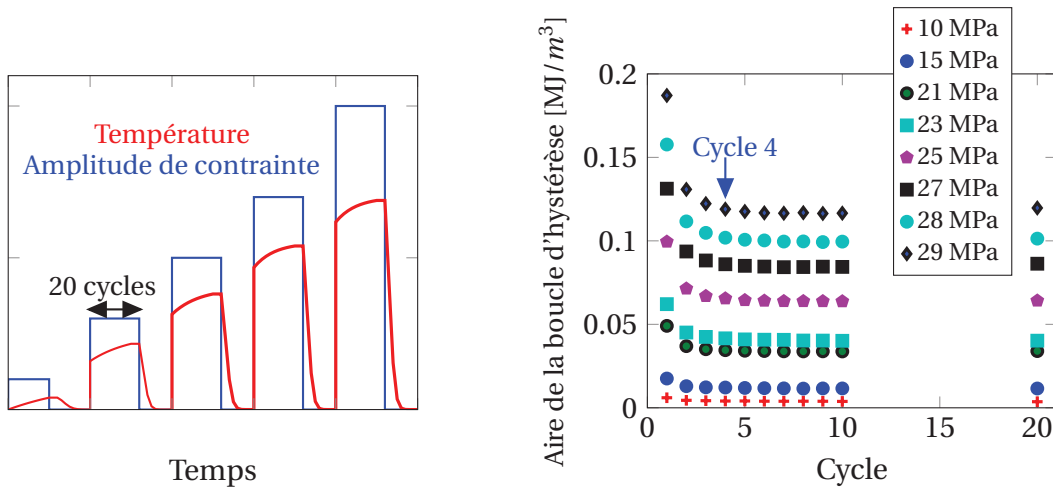
FIGURE 4.1 – Exemples de l'évolution de la courbe contrainte nominale-déformation nominale pour un palier de 20 cycles de chargement sinusoïdal pour chaque angle de prélèvement considéré, fréquence de chargement=1Hz, R=0 et RH50.

chargement (composés de 20 cycles suivis de 5 minutes de refroidissement pour retourner à l'équilibre thermique) sont réalisés pour plusieurs niveaux d'amplitude de contrainte nominale¹, comme l'illustre la figure 4.2a. Le dernier palier de chargement est mené jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse pour chaque palier de chargement et évaluation de la vitesse initiale de variation de température

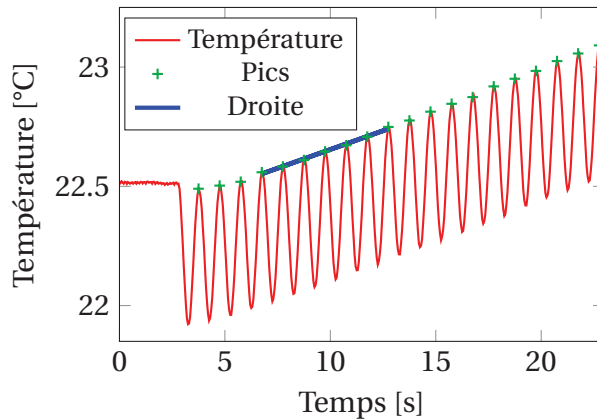
Sur la figure 4.2b l'évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse pour plusieurs paliers de chargement en fonction de l'amplitude de contrainte nominale est montrée. L'exemple présenté a été obtenu avec des éprouvettes Dogbone prélevées à 90° (appelées Dogbone 90°), conditionnées à RH50, testées avec une fréquence de chargement de 1Hz et un rapport de charge R=0 à température ambiante. Nous pouvons proposer deux régimes de comportement pour analyser ces courbes : le premier régime (état transitoire, jusqu'au quatrième cycle) montre une aire de la boucle d'hystérèse qui évolue et le deuxième régime (état stabilisé, dès le qua-

¹Définie comme la contrainte nominale maximale moins la contrainte nominale minimale divisée par 2.



(a) Protocole expérimental pour l’obtention de la courbe d’auto-échauffement sur un état transitoire.

(b) Évolution de l’aire de la boucle d’hystérèse en fonction de l’amplitude de contrainte. Eprouvettes Dogbone 90°, $f=1\text{Hz}$, RH50 et $R=0$.



(c) Exemple du calcul de $\dot{\theta}_0$ à partir de l’évolution de la température moyennée sur la zone utile d’une éprouvette pendant un palier de chargement.

FIGURE 4.2 – Protocole expérimental des essais d’auto-échauffement, évolution de l’aire de la boucle d’hystérèse pendant les essais et exemple du calcul de θ_0 .

trième et jusqu’au vingtième cycle) montre une aire de boucle d’hystérèse quasi-constante. Ces comportements sont observés pour les trois cas d’éprouvettes considérés (0°, 45° et 90°). L’approche présentée dans cette étude pour calculer l’énergie dissipée par cycle n’est valable que si celle-ci est constante par cycle. Donc l’évaluation de l’énergie dissipée par cycle est réalisée uniquement à partir du quatrième cycle, sur le comportement stabilisé². La valeur de la vitesse initiale de variation de température ($\dot{\theta}_0$), peut alors être calculée grâce à la pente de la variation de température (droite dans la figure 4.2c) entre les cycles 4 et 10. Finalement, l’énergie dissipée par cycle peut être calculée en réécrivant l’équation 2.38 comme suit :

$$\Delta^* = \frac{\rho C \dot{\theta}_0}{f}. \tag{4.1}$$

²Nous supposons que la stabilisation de l’aire de la boucle d’hystérèse est un indicateur de la stabilisation de l’énergie dissipée par cycle.

Définition de la zone d'analyse et comparaisons entre les zones

Le passage entre les mesures thermiques et l'énergie dissipée par cycle peut être réalisé de plusieurs façons. La première, présentée précédemment dans l'exemple de la figure 4.2c, est une analyse globale. Elle consiste à faire les calculs à l'aide de l'évolution de la température moyennée sur une zone donnée : l'énergie dissipée par cycle est calculée grâce à l'évolution de la température moyennée dans la zone utile de l'éprouvette. Cette analyse est particulièrement importante pour faire des comparaisons avec les données mécaniques, lesquelles sont évaluées de façon moyenne grâce à l'extensomètre.

La seconde possibilité consiste en une analyse locale. Elle promeut l'idée de travailler, toujours avec la température moyennée, mais sur une zone beaucoup plus petite qui correspond à la zone d'initiation observée à posteriori. Durant le dernier palier de chargement (mené jusqu'à la rupture), un point chaud (zone de taille très réduite et ayant une température plus importante que son voisinage) est observé, comme l'illustre la figure 4.3. Cette zone est identifiée comme étant la zone d'initiation qui précède la propagation brutale de la fissure conduisant à la rupture de l'éprouvette (c'est-à-dire la zone de « nucléation » de la fissure). Le calcul de l'énergie dissipée par cycle à partir de l'évolution de la température moyennée sur le point chaud est ainsi également réalisé. Cette analyse est particulièrement importante pour associer l'énergie dissipée par cycle menant à rupture avec la localisation précise de l'initiation.

La figure 4.4 montre la comparaison entre l'analyse locale et l'analyse globale pour une éprouvette Dogbone 0° RH50, testée avec une fréquence de 1Hz et un rapport de charge R=0. Nous pouvons voir que l'énergie dissipée par cycle est plus importante dans le cas de l'analyse locale.

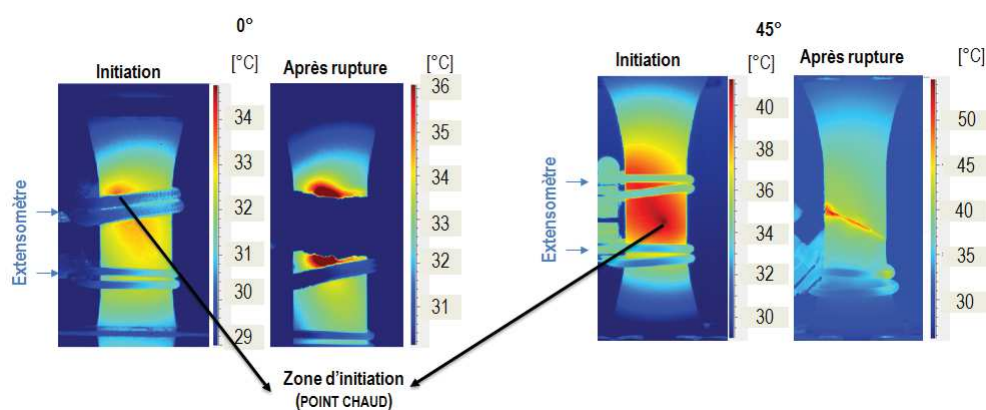
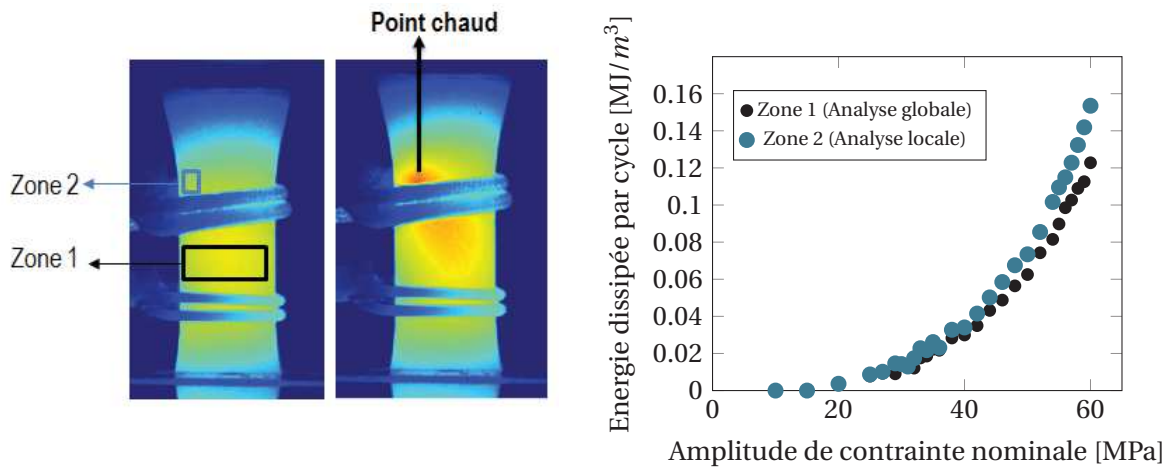


FIGURE 4.3 – Localisation du point chaud (cas des éprouvettes Dogbone 0° et 45°).

Détection du point chaud

La figure 4.5 illustre la détection du point chaud à l'aide d'un profil de température suivant la largeur de la zone utile d'une éprouvette Dogbone 45° (image prise quelques cycles avant la propagation brutale de la fissure). Nous pouvons observer que le profil de température évolue localement au niveau du point chaud. Pour déterminer sa taille, il faut détecter les pixels où la température évolue par rapport à la tendance du profil de température. Dans l'exemple présenté,



(a) Zones.

(b) Analyse globale et analyse locale.

FIGURE 4.4 – Comparaison entre les analyses globale et locale pour une éprouvette Dogbone 0°, RH50, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$.

le point chaud est détecté sur environ 20 pixels, ce qui correspond à une taille caractéristique de 2mm.

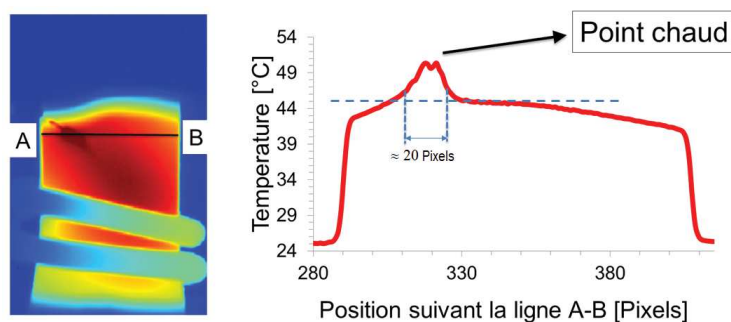


FIGURE 4.5 – Illustration de la détection du point chaud.

Comparaison des analyses transitoire et stabilisée

Dans le but de vérifier si les analyses réalisées sur un état transitoire sont équivalentes à celles réalisées sur un état stationnaire, quelques paliers de chargement ont été utilisés pour comparer les deux analyses. Pour réaliser une analyse sur un état stationnaire il faut considérer suffisamment de cycles de chargement pour atteindre la stabilisation thermique. Puis, il faut évaluer le temps caractéristique thermique sur la courbe de température jusqu'au retour à l'équilibre thermique (refroidissement). La fréquence d'acquisition de la caméra est de 0.7 images par seconde (soit 1 image toutes les 1.43 secondes environ). La fréquence d'acquisition considérée est choisie de façon à ce que la quantité de données ne soit pas excessivement élevée et que par ailleurs les informations relatives au couplage thermo-élastique (cf. §2.1.3) ne soient pas perdues. Celui-ci est obtenu par effet stroboscopique étant donné que la fréquence de chargement est toujours un nombre entier.

La figure 4.6 montre un exemple de la variation de la température³ dans la zone utile d'une éprouvette Dogbone 45° pendant le chargement et le refroidissement. Nous pouvons observer que l'état stationnaire est atteint après environ 1000 cycles. Comme la variation de température arrive à une valeur constante, cela signifie que l'énergie dissipée par cycle est elle aussi constante. Le temps caractéristique thermique est identifié en utilisant la cinétique de refroidissement et le temps caractéristique trouvé est d'environ 200 s. L'énergie dissipée par cycle peut alors être calculée à partir du temps caractéristique et de la variation de température à l'état stationnaire selon l'équation 2.30. La figure 4.7 montre la comparaison entre l'énergie dissipée par cycle obtenue par une analyse transitoire (analyse globale) et celle obtenue par une analyse stationnaire. Il faut remarquer que pour l'analyse transitoire chaque point est obtenu pour la même éprouvette. Par contre, pour l'analyse stationnaire, chaque point correspond à une éprouvette différente (éprouvettes utilisées pour la fatigue). Nous pouvons observer une bonne correspondance entre les deux analyses, ce qui permet de conclure que l'énergie dissipée par cycle moyennée sur la surface, obtenue sur un état transitoire, est représentative de celle moyennée dans le volume, obtenue sur un état stationnaire.

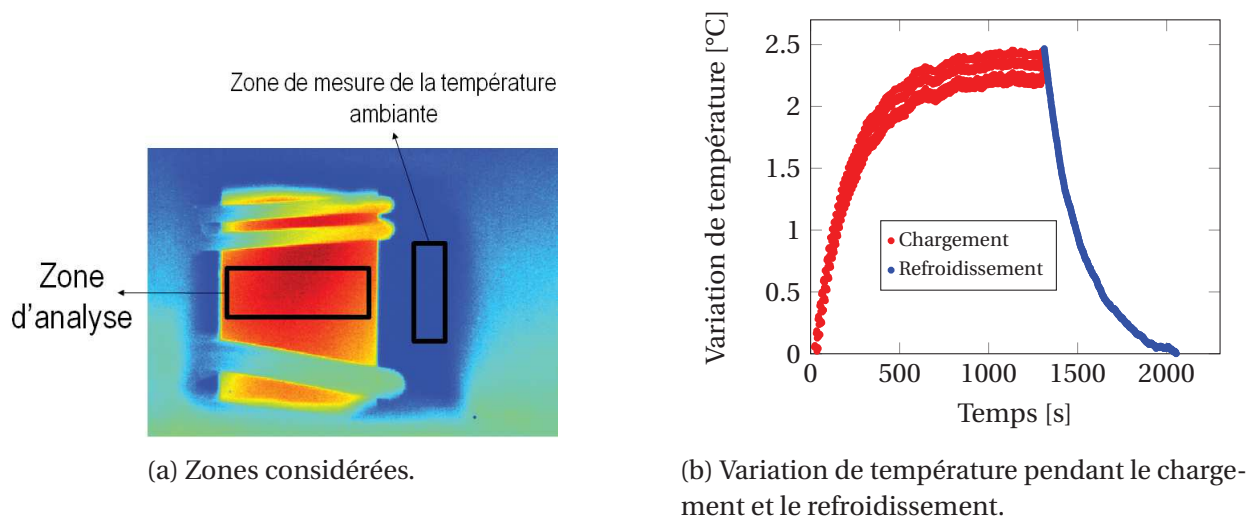


FIGURE 4.6 – Exemple de la variation de température dans la zone utile d'une éprouvette Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$. Environ 1300 cycles pendant le chargement.

4.1.4 Obtention des cartographies d'énergie dissipée

Définition du protocole

La méthode décrite dans le §4.1.3, permet d'obtenir l'énergie dissipée par cycle de manière moyenne sur une zone définie. Pour aller plus loin et avoir accès au champ d'énergie dissipée par cycle, une méthode est illustrée sur la figure 4.8. Cette méthode est basée sur l'analyse sur un état transitoire avec une approche 2D (cf. §2.1.4). Dans cet exemple la température est d'abord moyennée sur une portion de l'éprouvette (rectangle noir sur la figure 4.8), ce qui permet de déterminer les images correspondant aux quatrième et dixième cycles de chargement (images 1

³Définie comme la différence entre la température moyennée de la zone d'analyse et celle de la zone utilisée pour la mesure de la température ambiante.

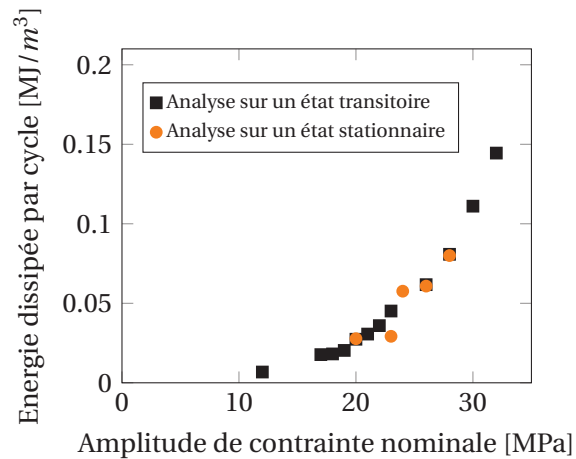


FIGURE 4.7 – Comparaison entre une analyse transitoire et une analyse stationnaire, éprouvettes Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$.

et 2 de la figure 4.8) à partir des pics observés (même configuration mécanique). La soustraction des champs de température de ces deux images donne alors accès au champ de variation de température (image 3 de la figure 4.8). Enfin, cette dernière image est utilisée pour estimer le champ d'énergie dissipée par cycle (image 4 de la figure 4.8) grâce à l'équation 4.1, c'est-à-dire, en divisant par le temps écoulé entre les images 1 et 2 et la fréquence de chargement et en multipliant par la masse volumique et la chaleur spécifique.

Discussion sur le choix des images (stabilisation mécanique et analyse des transferts thermiques)

Le choix des pics (images 1 et 2 sur la figure 4.8) affecte bien évidemment l'estimation de l'énergie dissipée par cycle. Le principe est ici d'effectuer l'estimation dans un état quasi adiabatique, c'est-à-dire sur une courte durée (initiale) tout en se plaçant dans le régime du comportement stabilisé de l'aire de la boucle d'hystérèse (à partir du quatrième cycle). Il est donc très important de comparer les temps caractéristiques thermiques avec le temps mécanique (par exemple, au minimum 1s entre deux configurations mécaniques comparables, pour une fréquence de chargement de 1Hz). Comme nous l'avons déjà montré, le temps caractéristique de retour à l'équilibre thermique est d'environ 200 secondes. L'hypothèse adiabatique semble donc être respectée (ratio de 30 entre les temps caractéristiques mécanique et thermique pour une fréquence de 1Hz) pour un temps de 6 secondes entre les cycles 4 et 10. La dimension caractéristique liée à la conduction thermique peut ensuite être évaluée en utilisant les paramètres physiques du matériau (masse volumique, chaleur spécifique et conductivité thermique). Pour une durée de 6 secondes, une valeur d'environ 0.85mm est trouvée. Celle-ci peut ainsi être considérée comme la résolution spatiale maximale des champs évalués et aussi comme la profondeur du volume dont la réponse thermomécanique est captée par une mesure de surface.

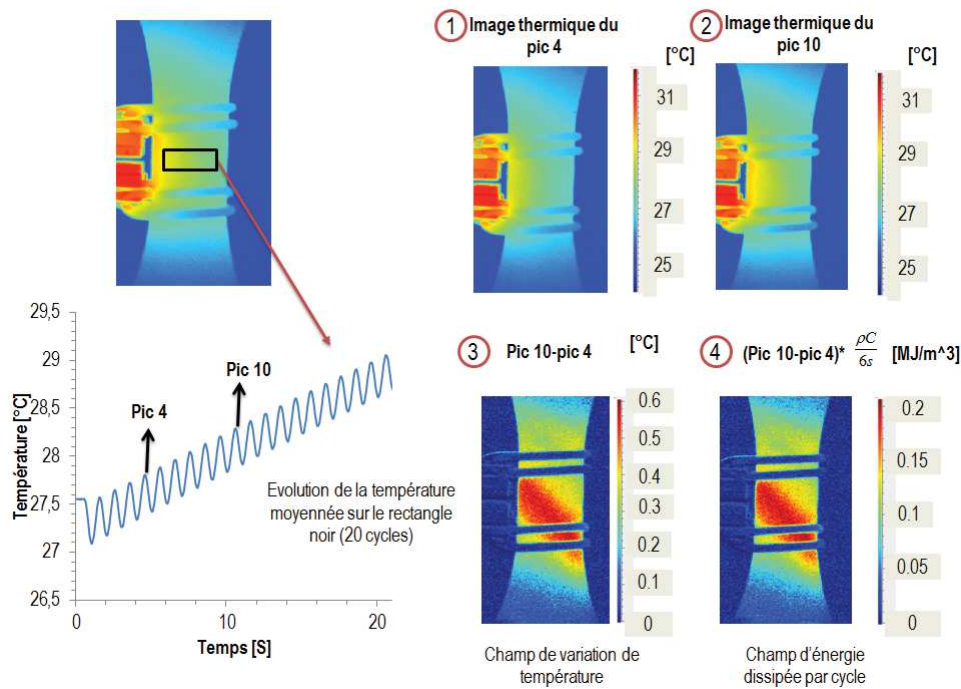


FIGURE 4.8 – Champ d'énergie dissipée par cycle, exemple sur une éprouvette Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et pour une amplitude de contrainte de 31.5MPa.

4.1.5 Protocole d'identification de la courbe d'endurance déterministe

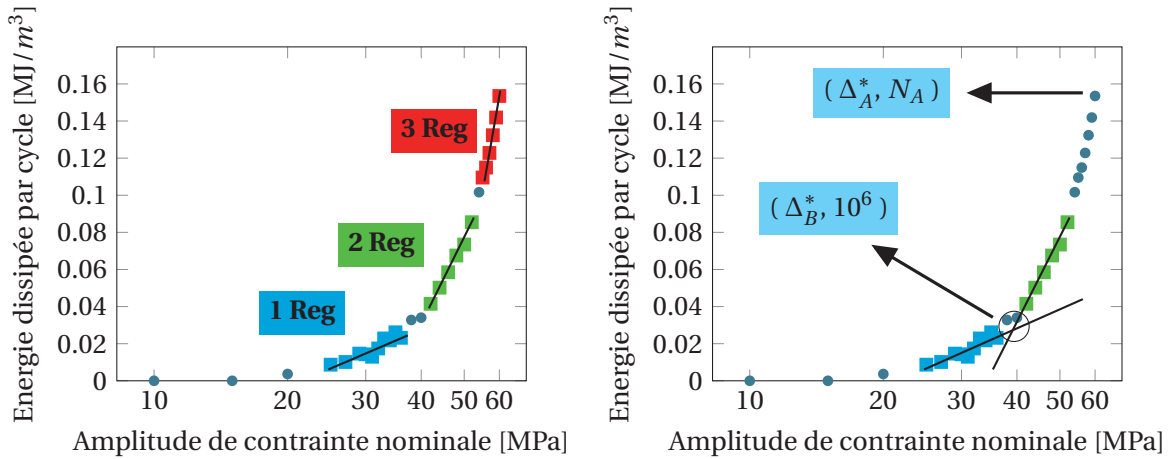
Définition et premières validations sur les résultats de fatigue

Sur le graphique présentant l'énergie dissipée par cycle (analyse locale) en fonction de l'amplitude de contrainte nominale, 3 régimes semblent apparaître, tel que montré sur la figure 4.9a (graphique en échelle semi-logarithmique pour mieux apprécier les régimes). Un critère de fatigue énergétique est proposé qui relie par une loi puissance le nombre de cycles menant à la ruine (initiation) de l'éprouvette, noté N , à l'énergie dissipée par cycle (analyse locale) :

$$\Delta^* = CN^{-b} \quad (4.2)$$

où C et b sont les paramètres à identifier. Il nous faut donc connaître deux couples (Δ^*, N) pour identifier les paramètres du critère. Le premier couple (Δ_A^*, N_A) est obtenu à partir du dernier palier de chargement, lequel est mené jusqu'à la rupture de l'éprouvette (cf. Fig. 4.9b). Le deuxième couple est obtenu à partir du graphique traçant l'énergie dissipée par cycle en fonction de l'amplitude de la contrainte nominale, à l'aide du protocole suivant :

- les régimes sont identifiés, en commençant par le régime 3 ;
- chaque régime est décrit à l'aide d'une droite, tel que montré dans la figure 4.9a ;
- nous supposons que le point de transition entre les régimes 1 et 2, déterminé par l'intersection des droites montrées sur la figure 4.9b, correspond à l'énergie dissipée par cycle qui mène à la ruine de l'éprouvette après 10^6 cycles (cette hypothèse forte est arbitraire).



(a) Régimes observés dans la graphique présentant l'énergie dissipée par cycle en fonction de l'amplitude de la contrainte nominale.

(b) Identification du critère de fatigue.

FIGURE 4.9 – Exemple de l'identification du critère de fatigue pour une éprouvette Dogbone 0°, RH50, f=1Hz, R=0 et à température ambiante.

La figure 4.10 montre le critère de fatigue identifié sur des éprouvettes Dogbone 0° RH50 et quelques essais de fatigue classiques pour tester la validité du critère. Les points utilisés pour l'identification du critère sont également montrés. Une bonne corrélation entre le critère de fatigue et les essais de fatigue classiques est observée pour ce premier exemple. Il faut remarquer que pour les essais de fatigue classiques l'énergie dissipée par cycle est systématiquement mesurée au début de l'essai (analyse sur un état transitoire).

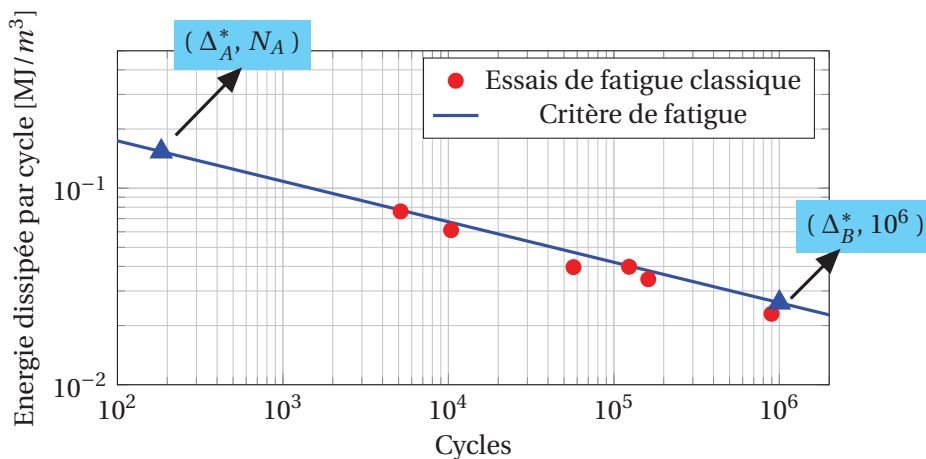


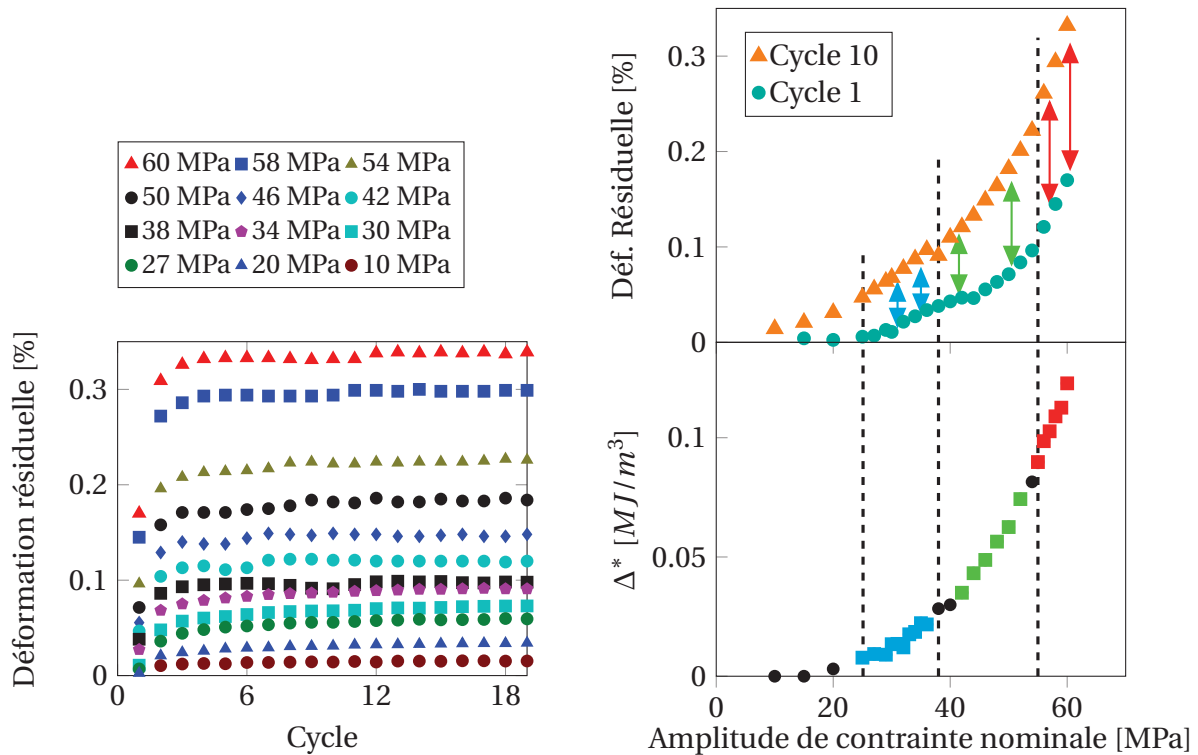
FIGURE 4.10 – Premier exemple de la corrélation entre le critère de fatigue identifié à partir des mesures énergétiques et les essais de fatigue classique avec mesure de l'énergie dissipée par cycle au début de l'essai. Éprouvettes Dogbone 0°, RH50, f=1Hz, R=0 et à température ambiante.

Discussion sur l'identification des régimes

L'identification des régimes sur le graphique traçant l'énergie dissipée par cycle en fonction de l'amplitude de la contrainte nominale est purement empirique. Idéalement il faudrait mettre en place un modèle de comportement puissant capable de décrire avec précision le comportement cyclique du matériau (lequel est en cours de développement chez d'autres partenaires du projet DURAFIP) de façon à pouvoir associer les régimes de comportement aux phénomènes mécaniques (visco-élasticité, visco-plasticité, endommagement, etc.). La transition entre les régimes serait alors comparée à l'apparition des phénomènes physiques. Les données mécaniques peuvent donner quelques pistes sur cette correspondance. Par exemple, la figure 4.11a montre l'évolution de la déformation résiduelle (déplacement de la boucle d'hystérèse) au cours de plusieurs paliers de chargement. Nous pouvons remarquer que celle-ci est quasi constante après le quatrième cycle pour n'importe quel niveau d'amplitude de contrainte nominale et également qu'elle n'est pas complètement recouverte entre deux paliers de chargement (valeur au cycle 1 différente de zéro). Si nous mettons en parallèle l'évolution de la déformation résiduelle (par exemple au cycle 10 et au cycle 1 pour chaque niveau d'amplitude de contrainte nominale) et l'énergie dissipée par cycle (analyse globale) nous pouvons voir que l'apparition des régimes de comportement semble être corrélée à l'évolution de la cinétique de recouvrement (différence entre la déformation résiduelle au cycle 10 et au cycle 1), tel qu'illustré sur la figure 4.11b. Cette analyse est une première justification du choix des régimes. La figure 4.12 montre que l'apparition des régimes est également visible sur la courbe traçant le module sécant (mesuré sur le cycle 10) en fonction de l'amplitude de contrainte nominale pendant un essai d'auto-échauffement (la façon de calculer le module sécant est illustré sur la figure 4.16a). Ceci peut être considéré comme une deuxième justification du choix des régimes.

Analyse de la sensibilité du dépouillement graphique

L'influence de l'évaluation graphique est un point discutable du protocole proposé pour l'obtention de la limite d'endurance à 10^6 cycles. Cette évaluation dépend de l'appréciation de l'expérimentateur quant à l'existence des régimes. En outre, le sens physique des régimes n'est pas prouvé et le choix d'une endurance limitée à 10^6 cycles est arbitraire. Pour illustrer cette sensibilité, nous proposons des cas où les régimes sont surestimés ou sous-estimés par rapport au dépouillement proposé. Il est important de noter que le régime trois est le premier régime identifié. Les régimes les plus difficiles à identifier sont donc le premier et le deuxième. Si nous reprenons l'exemple de la figure 4.9 nous pouvons imaginer que le premier ou le deuxième régime sont surestimés tel que montré sur les figures 4.13a et 4.13b. Les cas présentés sont considérés extrêmes dans la mesure où les droites utilisées pour décrire les régimes considèrent les points extrêmes des deux régimes. La figure 4.13c montre l'évolution du critère de fatigue pour chaque modification des régimes. Nous constatons qu'il peut y avoir une influence non négligeable sur les prédictions du critère. L'écart maximum constaté par rapport aux essais de fatigue classique reste inférieur à une demi-décade.



(a) Évolution de la déformation résiduelle au cours de plusieurs paliers de chargement.

(b) Déformation résiduelle au cycle 10 et au cycle 1 en parallèle de l'énergie dissipée par cycle (Δ^*).

FIGURE 4.11 – Évolution de la déformation résiduelle pendant un essai d'auto-échauffement. Éprouvette Dogbone 0°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et à température ambiante.

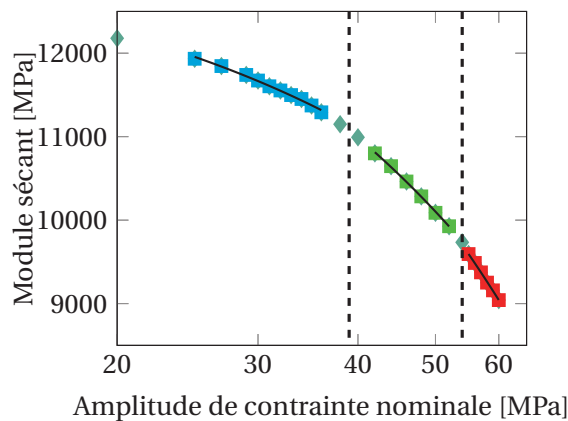
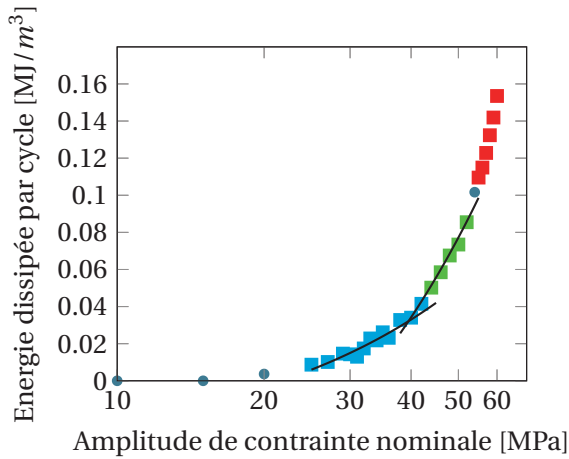


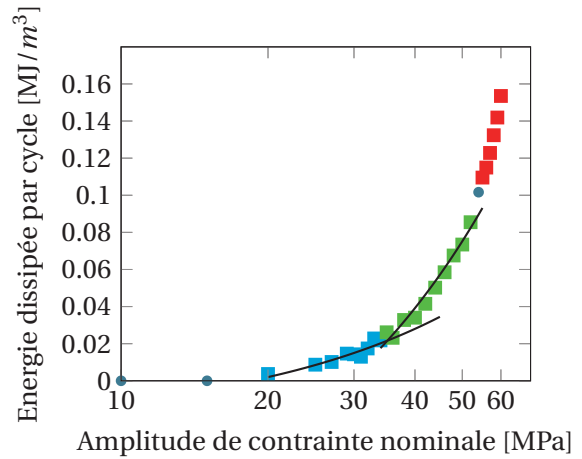
FIGURE 4.12 – Régimes observés dans le graphique traçant le module sécant en fonction de l'amplitude de contrainte nominale pendant un essai d'auto-échauffement. Éprouvette Dogbone 0°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et à température ambiante.

Discussion sur l'évolution du terme source au cours du chargement de fatigue

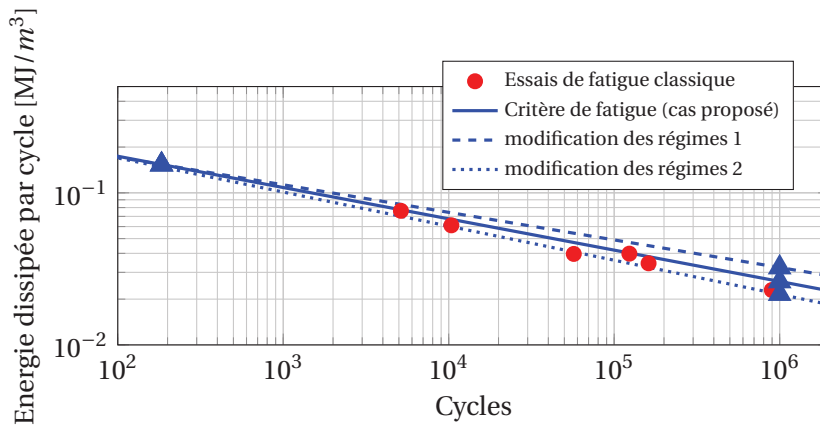
La question ici est : est-ce que l'énergie dissipée par cycle calculée sur les premiers cycles de chargement est représentative de l'ensemble d'un essai de fatigue? Le premier élément de réponse à cette question est donné par l'analyse de l'évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse pendant les essais de fatigue. La figure 4.14 montre l'évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse au cours des essais de fatigue en fonction de l'amplitude de contrainte nominale. Nous pouvons



(a) Cas où le premier régime est surestimé par rapport au cas proposé (modification des régimes 1).



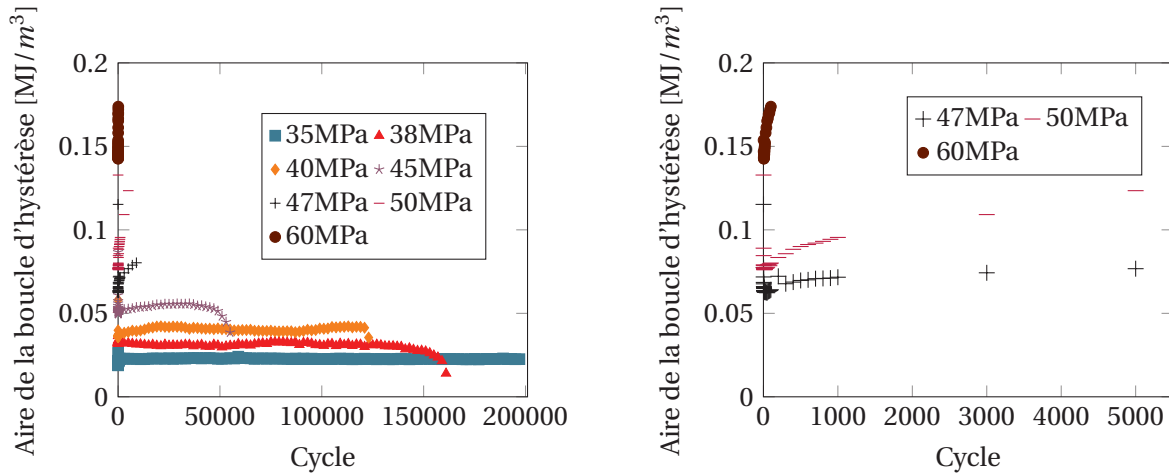
(b) Cas où le deuxième régime est surestimé par rapport au cas proposé (modification des régimes 2).



(c) Critère de fatigue pour chaque cas considéré.

FIGURE 4.13 – Analyse de la sensibilité du dépouillement graphique. Éprouvettes Dogbone 0°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et à température ambiante.

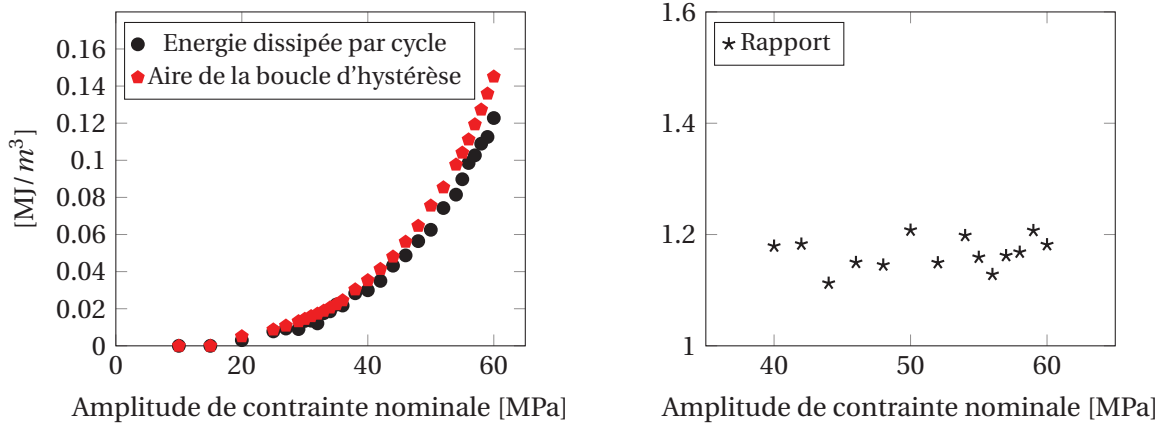
observer que l'aire de la boucle d'hystérèse pour des durées de vie importantes (au-delà d'environ 10000 cycles) est quasi-constante, sauf pour les derniers cycles où l'initiation a déjà eu lieu (constat qui sera montré par la suite). Pour des durées de vie moins importantes, nous pouvons observer une augmentation de l'aire de la boucle d'hystérèse comprise entre 20 et 50% par rapport à la valeur initiale. La figure 4.15 montre la comparaison entre l'énergie dissipée par cycle (analyse globale) et l'aire de la boucle d'hystérèse initiale (entre le quatrième et le vingtième cycle où celle-ci est quasi constante). Nous pouvons observer que l'énergie dissipée par cycle est très proche de l'aire de la boucle d'hystérèse. Ces premiers constats nous permettent de conclure, d'une part, qu'au moins au début des essais de fatigue, la plupart de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur, et que d'autre part, pour des durées de vie importantes, celle-ci sera constante pendant l'ensemble de l'essai. Pour compléter la réponse il faut vérifier si l'évolution de l'énergie dissipée par cycle pour des durées de vie moins importantes est similaire à celle de l'aire de la boucle d'hystérèse, et si c'est le cas, quelle sera l'influence de cette évolution vis-à-vis du critère de fatigue considéré. Cette question sera abordée dans la suite de ces travaux de thèse.



(a) Évolution entre 0 et 200000 cycles. 35MPa rupture après 896484 cycles, 38MPa rupture après 161374 cycles, 40MPa rupture après 123532 cycles, 45MPa rupture après 56933 cycles.

(b) Évolution entre 0 et 5500 cycles. 47MPa rupture après 10378 cycles, 50MPa rupture après 5143 cycles, 60MPa rupture après 184 cycles.

FIGURE 4.14 – Évolution de l’aire de la boucle d’hystérèse pendant les essais de fatigue en fonction de l’amplitude de contrainte nominale. Éprouvettes Dogbone 0°, RH50, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$.



(a) Comparaison de l’aire de la boucle d’hystérèse (cycle 10) avec l’énergie dissipée par cycle (analyse globale).

(b) Rapport entre l’aire de la boucle d’hystérèse et l’énergie dissipée par cycle.

FIGURE 4.15 – Comparaison de l’aire de la boucle d’hystérèse avec l’énergie dissipée par cycle. Éprouvettes Dogbone 0°, RH50, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$.

4.2 Schéma de présentation des résultats

L’objectif dans cette partie est de décrire la façon de montrer les résultats obtenus sur les éprouvettes Dogbone. Les résultats seront toujours divisés en deux parties, ceux associés au comportement et ceux associés à la ruine par fatigue.

4.2.1 Données associées au comportement

Les données associées au comportement peuvent être mécaniques ou thermiques.

- **Données mécaniques**

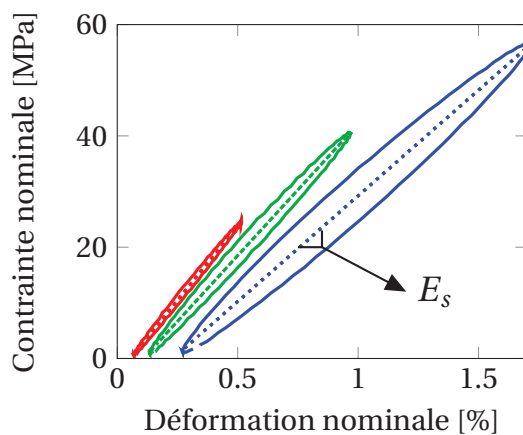
L'aire de la boucle d'hystérèse (notée h), le module sécant (noté E_s) et la déformation résiduelle (notée ε_r) sont les données mécaniques à présenter. Celles-ci peuvent être présentées en fonction du nombre de cycles ou en fonction de l'amplitude de contrainte nominale (notée σ_a). Quelques exemples ont déjà été présentés : pour h sur la figure 4.15a et pour ε_r sur la figure 4.11a. La façon de calculer le module sécant est illustrée sur la figure 4.16a.

- **Données thermiques**

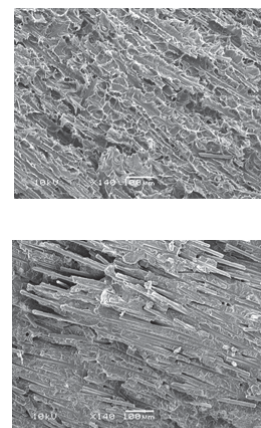
L'énergie dissipée par cycle (noté Δ^*) est la donnée thermique principale à présenter. Celle-ci sera présentée en fonction de σ_a (courbe d'auto-échauffement). Le type d'analyse considéré sera toujours spécifié. La figure 4.4b est un exemple de ce type de courbe. La cartographie de Δ^* sera aussi montrée, obtenue avec la méthode illustrée dans la figure 4.8.

4.2.2 Données associées à la ruine

Les données associées à la ruine par fatigue des éprouvettes sont les courbes de Wöhler en fonction de Δ^* (analyse locale) ou en fonction de σ_a . Le critère de fatigue énergétique en spécifiant les points utilisés pour l'identification et les régimes considérés sera montré avec les courbes de Wöhler en fonction de Δ^* , tel que montré sur la figure 4.10. Finalement, les faciès de rupture seront aussi présentés dans le but d'étudier les différents modes d'endommagement observés et leur relation avec la zone d'initiation observée par mesures thermiques (point chaud). La figure 4.16b montre des exemples de faciès de rupture.



(a) Façon de calculer le module sécant E_s .



(b) Exemples de faciès de rupture.

FIGURE 4.16 – Calcul du module sécant et exemples de faciès de rupture.

4.3 Influence de l'orientation

4.3.1 Éprouvettes Dogbone

Dans cette partie, les données de comportement et de ruine pour chaque orientation considérée (0° , 45° et 90°) seront montrées. L'ensemble des essais est réalisé avec un rapport de charge $R=0$, la fréquence de chargement considérée pour les essais d'auto-échauffement est toujours de 1Hz. Pour les essais de fatigue classique, celle-ci peut être augmentée à 2Hz uniquement pour des durées de vie plus importantes que 10^5 cycles. La figure 4.17 montre l'évolution de h , de E_s et de Δ^* (analyse globale) pour chaque orientation considérée. Il faut remarquer que h et E_s sont quasi constants après le quatrième cycle. Nous prendrons toujours dans la suite leur valeur au cycle 10 pour chaque palier de chargement. Sur cette figure nous pouvons remarquer que, pour les éprouvettes Dogbone 0° et 45° , Δ^* est proche de h ce qui indique la plupart de l'énergie est dissipée en forme de chaleur. Pour les trois cas d'éprouvettes Dogbone, E_s décroît avec l'augmentation du niveau d'amplitude de contrainte imposée. La comparaison en terme de Δ^* des éprouvettes Dogbone est présentée sur la figure 4.17d. Le classement observé semble corrélé vis-à-vis de la raideur des échantillons, ce qui est logique car les essais sont contrôlés en effort et que le module sécant dépend de l'orientation.

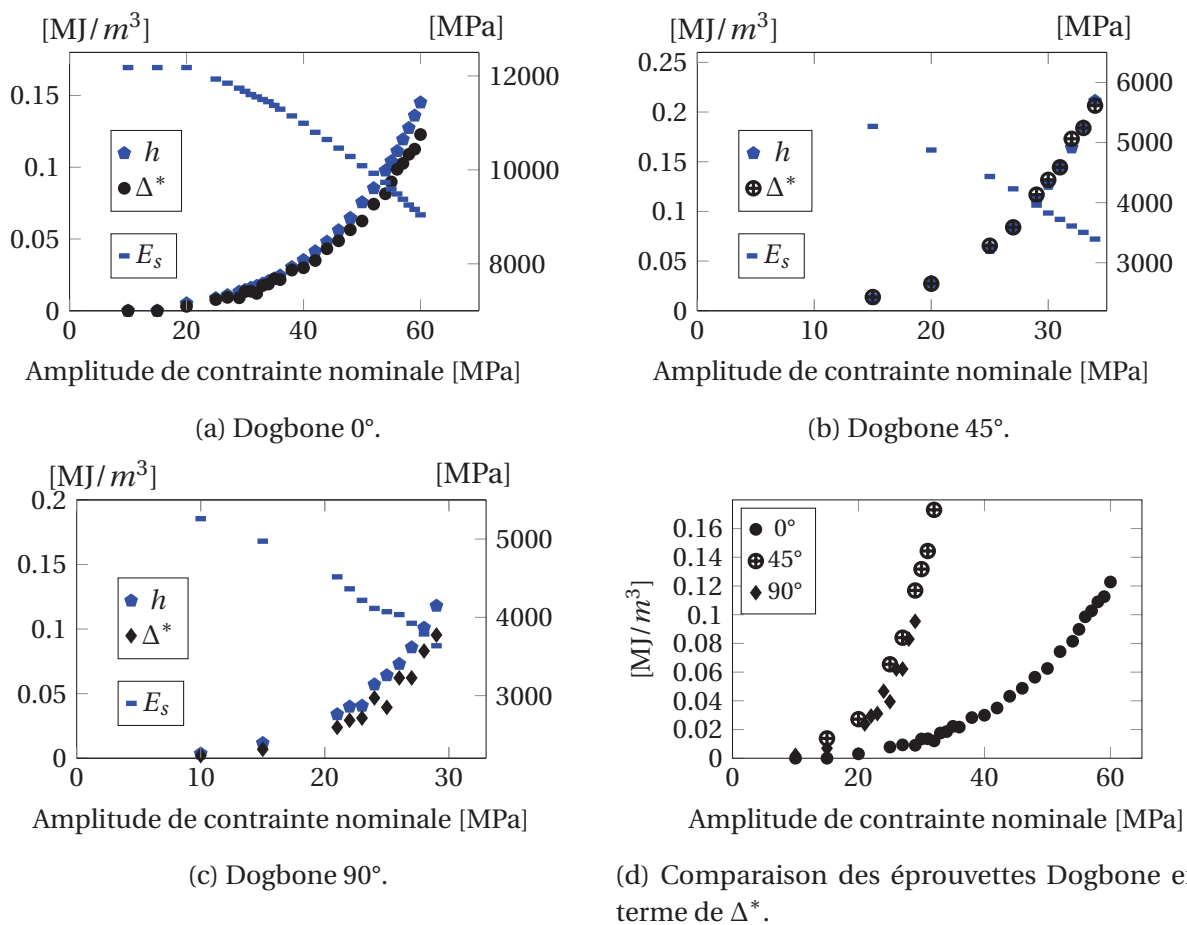


FIGURE 4.17 – Évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse, du module sécant et de l'énergie dissipée par cycle, pendant les essais d'auto-échauffement (analyse globale). RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

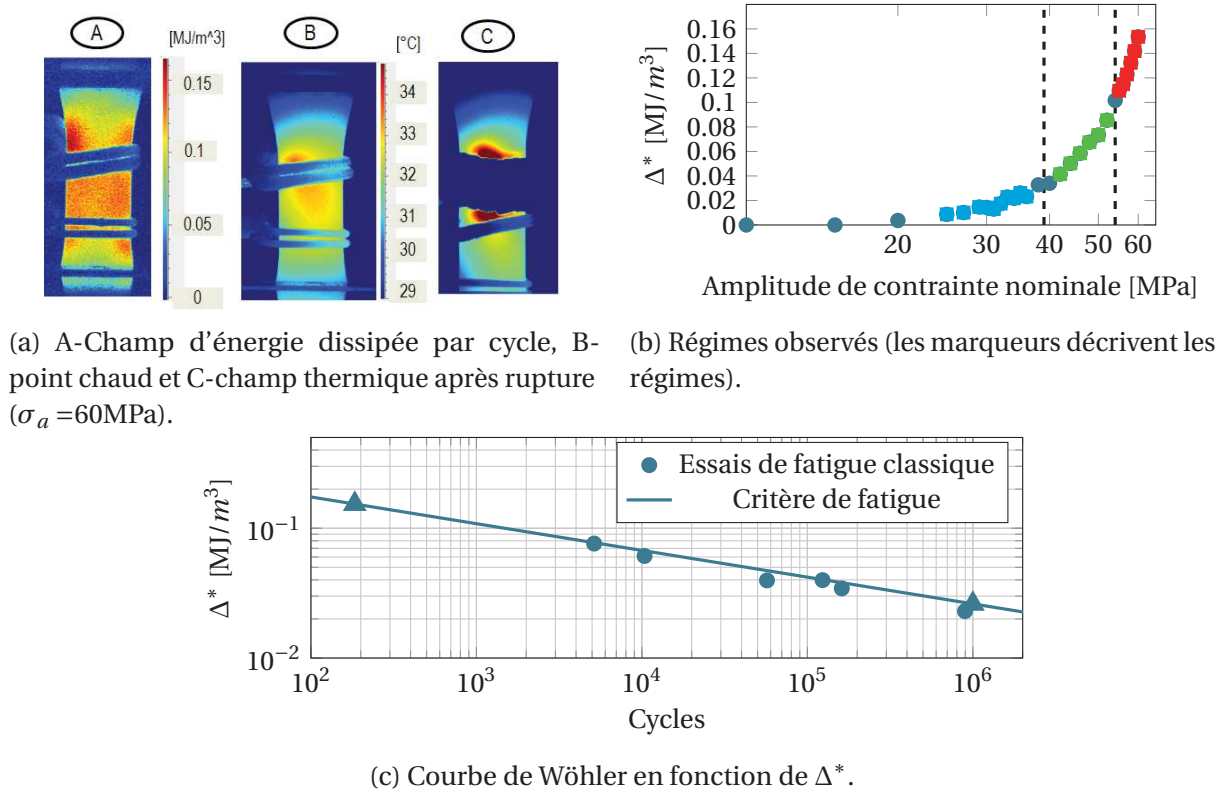


FIGURE 4.18 – Identification du critère de fatigue. Éprouvettes Dogbone 0° , RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

Les figures 4.18, 4.19 et 4.20 montrent les données relatives à l'identification du critère de fatigue. Les courbes présentant Δ^* (analyse locale) en fonction de σ_a sont en échelle semi-logarithmique pour mieux apprécier les régimes et ceux-ci sont marqués de façon similaire à l'exemple montré sur la figure 4.9a. Il faut remarquer que les courbes d'auto-échauffement montrées sont obtenues à partir de plusieurs éprouvettes (pour vérifier la répétabilité des essais). La zone de rupture (point chaud) semble être plus visible sur les éprouvettes Dogbone 0° et 45° par rapport aux éprouvettes Dogbone 90° qui présentent un champ de température plus homogène (constat vérifié sur plusieurs éprouvettes). La cause de ce point chaud plus diffus dans le cas des éprouvettes Dogbone 90° peut être le signe d'une initiation plus en profondeur.

Nous pouvons remarquer que, pour les éprouvettes Dogbone 0° et 45° , les essais de fatigue classiques sont bien corrélés au critère de fatigue (moins d'une demi-décade d'écart par rapport au critère). Pour les éprouvettes Dogbone 90° nous observons quelques points ayant un écart de plus d'une demi-décade. Cela est dû au fait que ce cas d'éprouvettes Dogbone est le plus dispersé en termes de fatigue. Cette dispersion a été vérifiée sur les essais de fatigue classiques réalisés à Solvay *engineering plastics*, lesquels seront montrés par la suite (cf. §4.4.1). L'évolution de h pendant les essais de fatigue pour les éprouvettes Dogbone 45° et 90° présente un comportement similaire à celui des éprouvettes Dogbone 0° (cf. Fig.4.14a), c'est-à-dire que celle-ci est quasi-constante pour des durées de vie au-delà d'environ 10000 cycles et augmente de façon considérable pour des durées de vie moins importantes, tel que montré sur la figure 4.21.

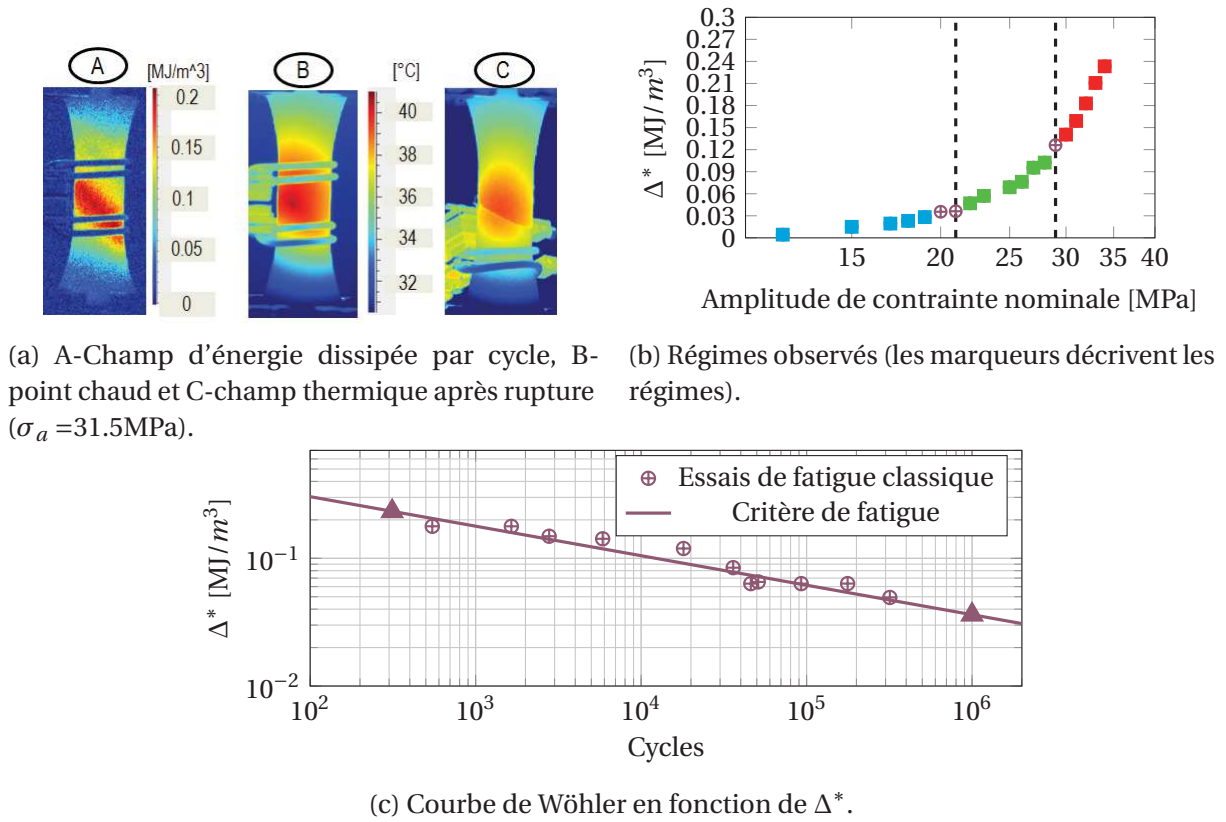
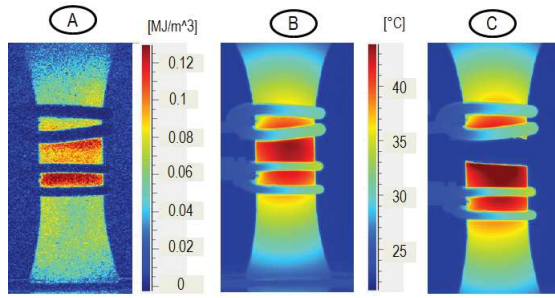
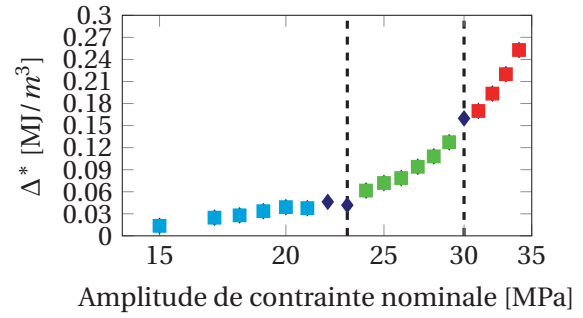


FIGURE 4.19 – Identification du critère de fatigue. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

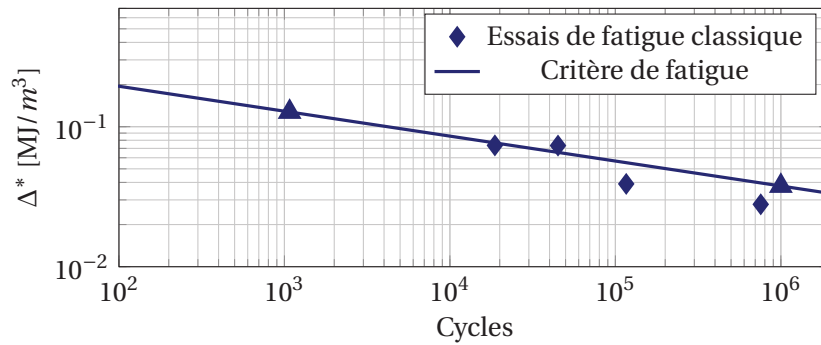
4.3. Influence de l'orientation



(a) A-Champ d'énergie dissipée par cycle, B-point chaud et C-champ thermique après rupture ($\sigma_a = 29\text{MPa}$).

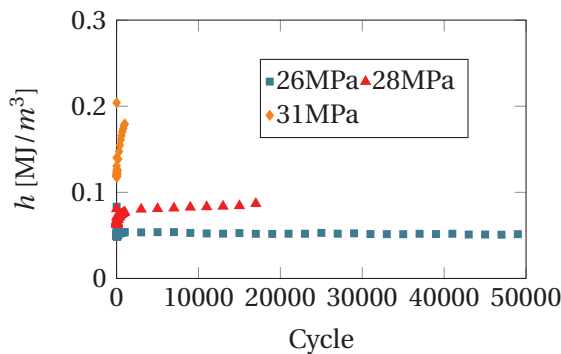


(b) Régimes observés (les marqueurs décrivent les régimes).

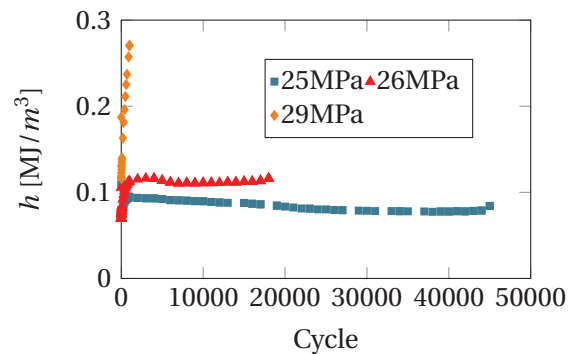


(c) Courbe de Wöhler en fonction de Δ^* .

FIGURE 4.20 – Identification du critère de fatigue. Éprouvettes Dogbone 90°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.



(a) Dogbone 45°. 26MPa rupture après 51016 cycles, 28MPa rupture après 18039 cycles, 31MPa rupture après 2781 cycles.



(b) Dogbone 90°. 25MPa rupture après 45273 cycles, 26MPa rupture après 18702 cycles, 29MPa rupture après 1075 cycles.

FIGURE 4.21 – Évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse pendant quelques essais de fatigue. RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

Comparaison des courbes de Wöhler des éprouvettes Dogbone

La figure 4.22 montre les courbes de Wöhler et les essais de fatigue classique pour les trois cas d'éprouvettes Dogbone. Nous pouvons observer que le critère de fatigue énergétique semble dépendre de l'orientation considérée. Pour la même durée de vie, les éprouvettes Dogbone 45° ont l'énergie dissipée par cycle la plus importante et les Dogbone 0° ont l'énergie dissipée par cycle la moins importante. Les éprouvettes Dogbone 90° semblent avoir une dissipation comprise entre les deux autres cas avec une dispersion plus importante. Cette comparaison a aussi été réalisée pour les essais de fatigue en fonction de σ_a , tel que montré sur la figure 4.23. Nous pouvons observer que les essais de fatigue des éprouvettes Dogbone 45° sont très proches de ceux des éprouvettes Dogbone 90°. Pour le même niveau de σ_a les éprouvettes Dogbone 0° ont une durée de vie beaucoup plus importante (environ trois décades de différence). Ceci paraît logique car la raideur des éprouvettes Dogbone 0° est plus importante. Cette différence est bien plus importante que celle constatée sur la comparaison des essais de fatigue en fonction de Δ^* (moins d'une décade pour le même niveau de Δ^*). La comparaison à d'autres critères de ruine (plasticité cumulée, énergie élastique) serait évidemment très intéressante. Elle est malheureusement limitée dans le cas des éprouvettes utilisées par la localisation de la rupture en dehors de la zone utile pour les éprouvettes Dogbone 0° et par l'apparition de bandes de localisation pour les éprouvettes Dogbone 45° et Dogbone 90°, qui limitent fortement l'utilisation des données obtenues par l'extensomètre pour évaluer ces critères de ruine. Une analyse complémentaire par suivi de champ de déformation sera nécessaire dans les études futures.

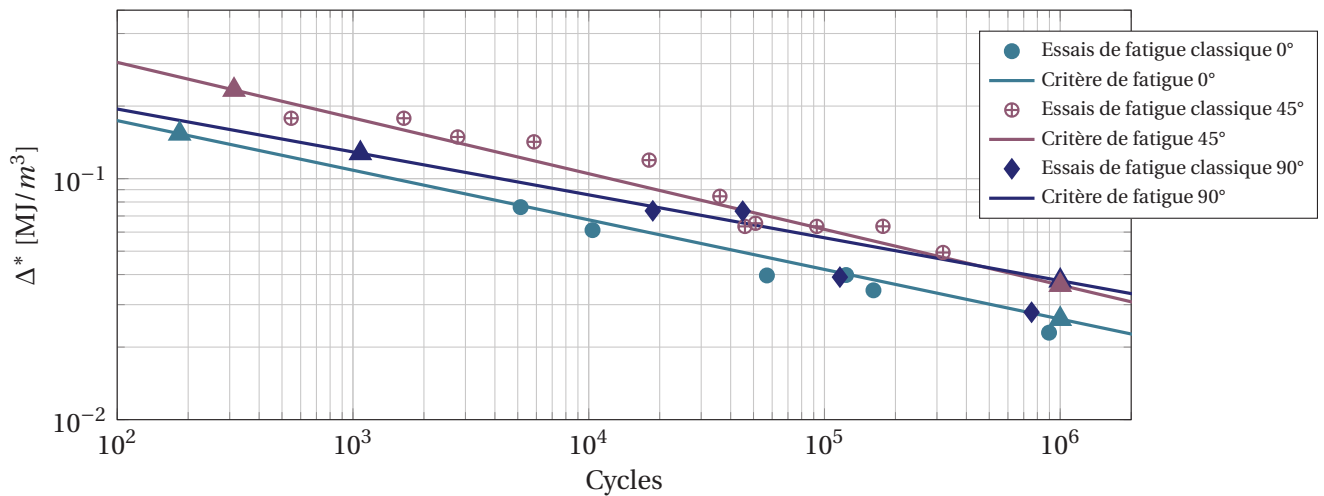


FIGURE 4.22 – Comparaison du critère de fatigue et des essais de fatigue pour chaque cas d'éprouvette Dogbone considérée. RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

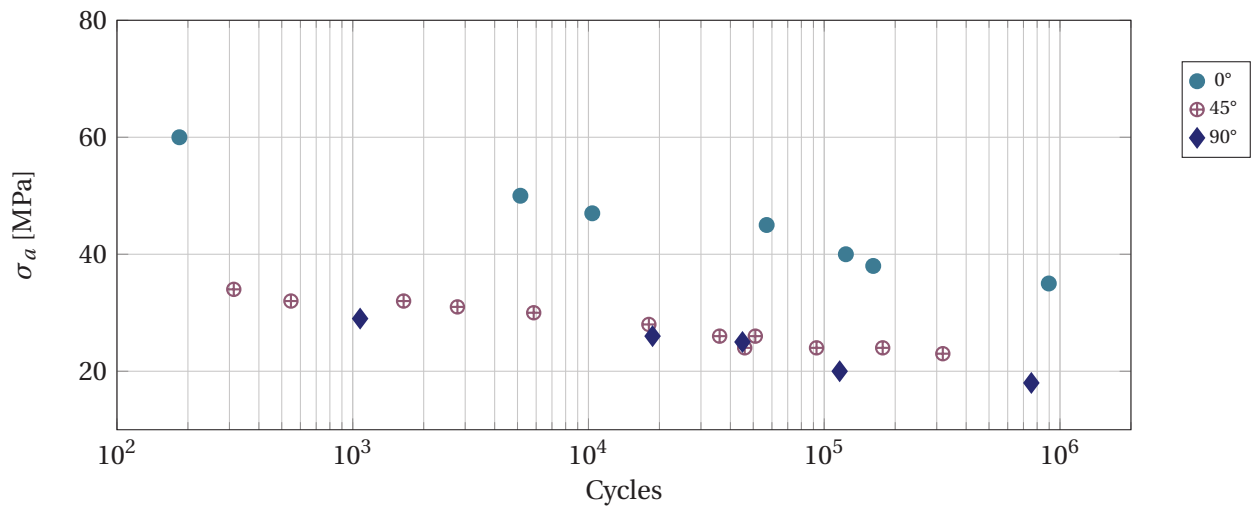


FIGURE 4.23 – Comparaison des essais de fatigue (en fonction de σ_a) pour chaque cas d'éprouvette Dogbone considérée. RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

Faciès de rupture

Les faciès de rupture ont été observés au microscope électronique à balayage dans le but d'identifier les types de rupture (ductile ou fragile), leur localisation et leur relation avec la zone d'initiation détectée par les mesures thermiques. La figure 4.24 montre la reconstruction complète de la surface d'une éprouvette Dogbone 45°. Le premier constat réalisé est la présence d'un mode de rupture ductile caractérisé par des étirements dans la matrice thermoplastique et d'un mode de rupture fragile caractérisé par le déchaussements des fibres. Sur la figure 4.25 sont identifiés le cœur de l'éprouvette, la zone où la rupture ductile a été observée et le point chaud. Nous pouvons observer que la zone de rupture ductile semble apparaître à la même position que le point chaud. En regardant plus en détail, nous pouvons diviser la surface de l'éprouvette en trois zones, tel que montré sur la figure 4.26, où la zone ductile est identifiée comme la zone d'initiation et de propagation (fissure observée par les mesures thermiques) et où le point chaud correspond à la zone présentant les étirements les plus importants (forte ductilité).

La figure 4.27 montre un zoom au niveau du point chaud, où nous pouvons remarquer que les zones présentant la plus forte ductilité apparaissent à l'interface cœur-peau. Cette zone semble être le site d'initiation de la rupture par fatigue. Les faciès de rupture ont aussi été observés sur des éprouvettes ayant une durée de vie plus importante, tel que montré sur la figure 4.28. Nous pouvons observer que pour des durées de vie plus importantes, la zone de rupture ductile augmente. Sur ces éprouvettes il est également observé que la plus forte ductilité apparaît à l'interface cœur-peau. Les analyses présentées ont également été réalisées sur des éprouvettes Dogbone 90°. La figure 4.29 présente le cœur de l'éprouvette, la zone où la rupture ductile a été observée et le point chaud. Pour ce cas d'éprouvette, l'initiation semble apparaître à la fois au niveau du cœur et de l'interface cœur-peau (cf. Fig.4.30).

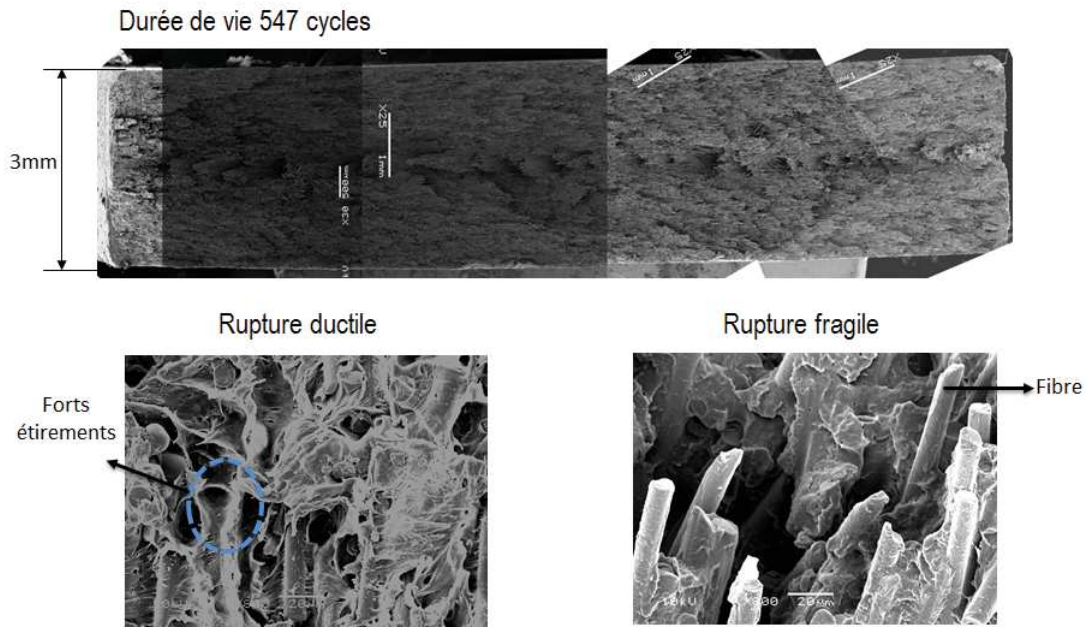


FIGURE 4.24 – Exemples de faciès de rupture observés au microscope électronique à balayage (MEB). Éprouvette Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

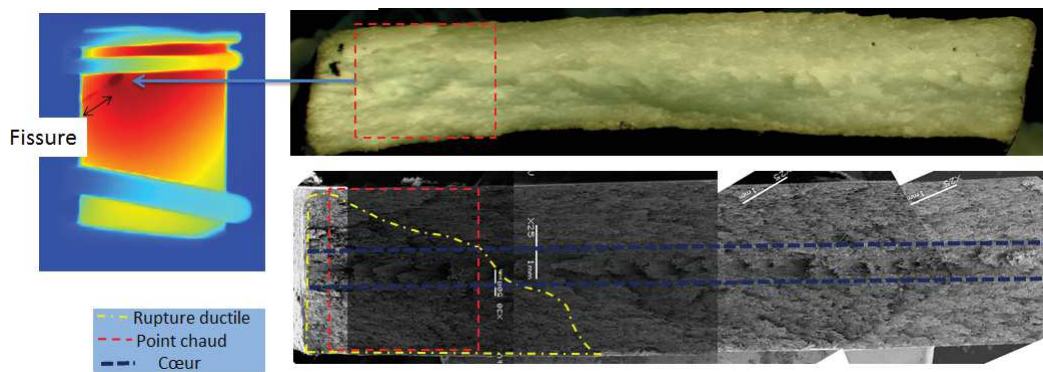


FIGURE 4.25 – Repérage du point chaud, de la rupture ductile et du coeur dans les faciès de rupture. Éprouvette Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

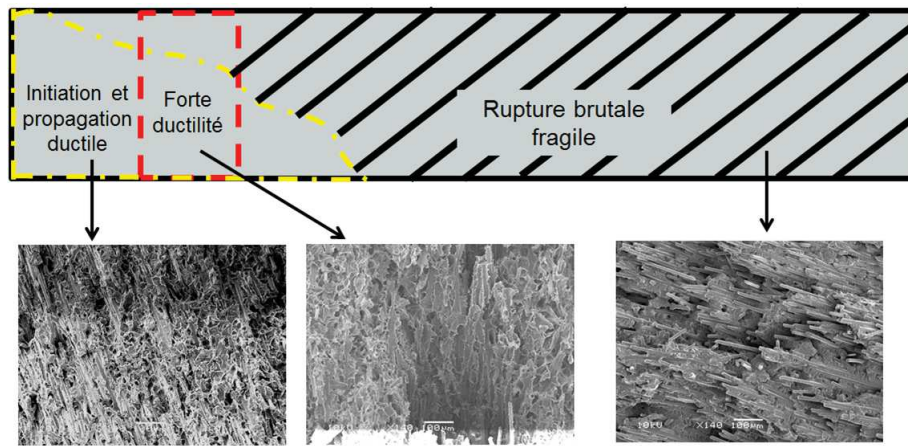


FIGURE 4.26 – Zones identifiées sur les faciès de rupture. Éprouvette Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

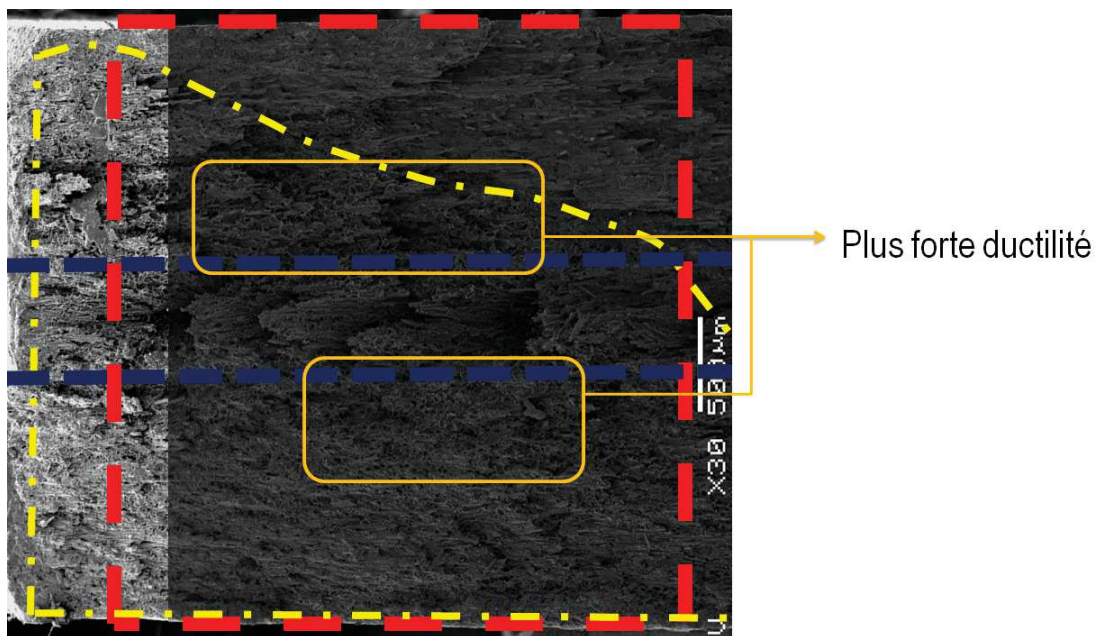


FIGURE 4.27 – Zoom au niveau du point chaud. Éprouvette Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

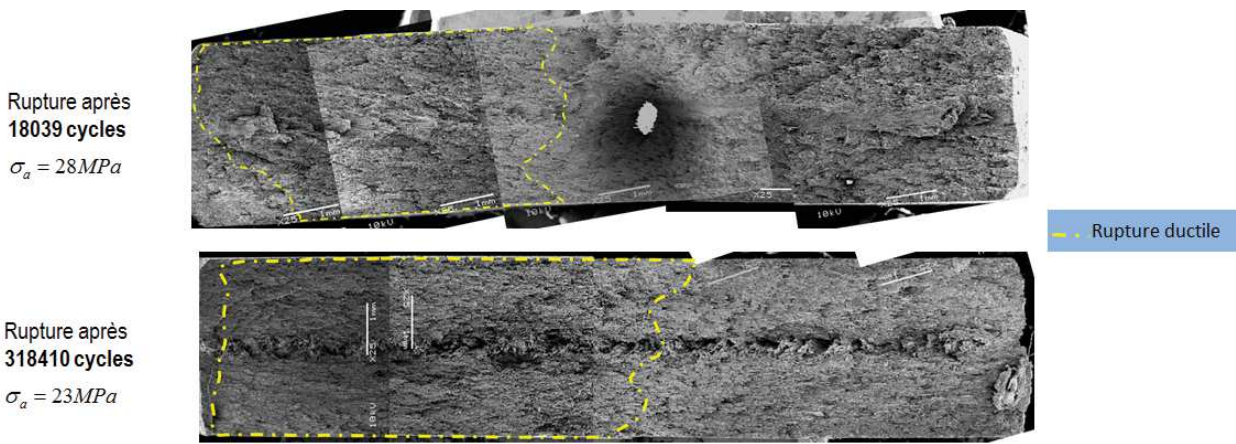


FIGURE 4.28 – Faciès de rupture pour des éprouvettes ayant une durée de vie $> 10^4$ cycles. Éprouvette Dogbone 45°, RH50, $f=1Hz$, $R=0$ et température ambiante.

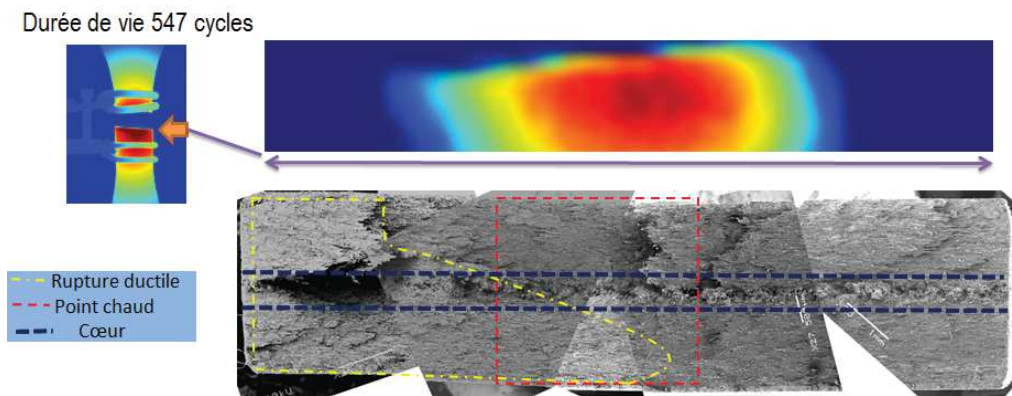


FIGURE 4.29 – Repérage du point chaud, de la rupture ductile et du coeur dans les faciès de rupture. Éprouvette Dogbone 90°, RH50, $f=1Hz$, $R=0$ et température ambiante.

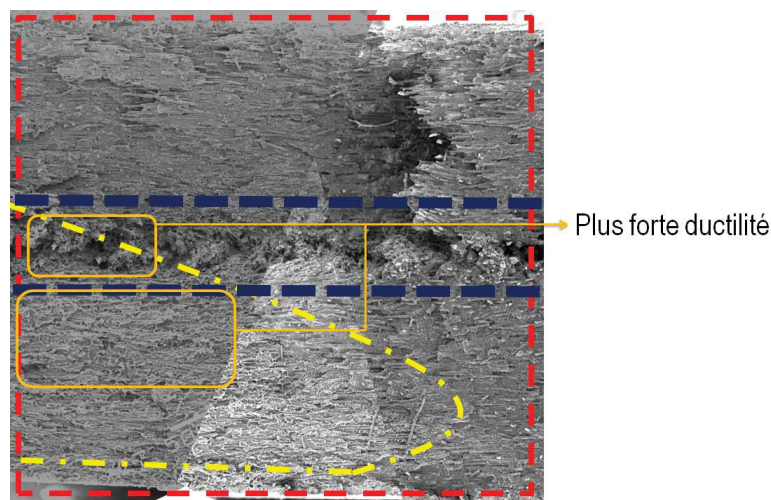


FIGURE 4.30 – Zoom au niveau du point chaud. Éprouvette Dogbone 90°, RH50, $f=1Hz$, $R=0$ et température ambiante.

Dans le cas des éprouvettes Dogbone 0°, il s'avère plus difficile de démarquer les zones ductiles et fragiles car nous ne voyons que le diamètre de la plupart des fibres. Il est donc plus difficile de

définir la localisation des étirements dans la matrice. Cependant, nous pouvons observer les mêmes modes de rupture que ceux observés pour le cas des éprouvettes Dogbone 45° et 90° à l'échelle des fibres, tel que montré sur la figure 4.31. Pour le cas des éprouvettes Dogbone 0° le mode de rupture ductile a été observé au niveau de la peau.

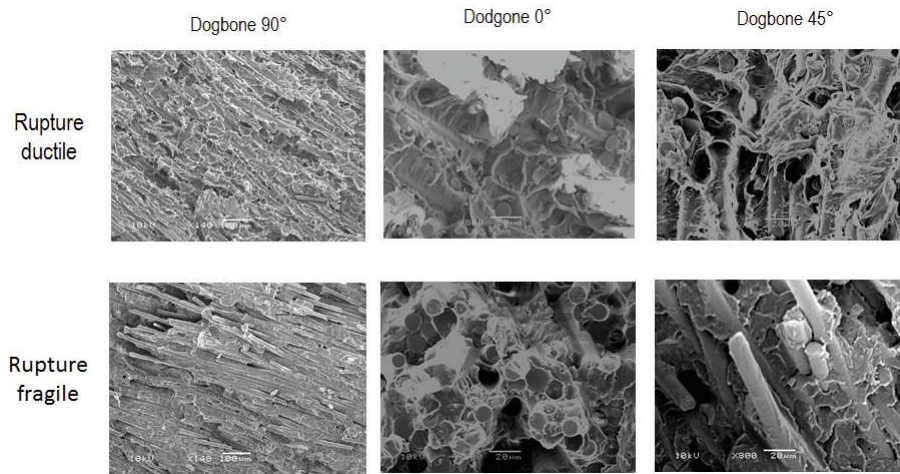


FIGURE 4.31 – Rupture ductile et rupture fragile observées pour chaque cas d'éprouvette Dogbone. RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

4.3.2 Éprouvettes amincies

Comme nous avons pu le constater lors de la présentation des résultats sur les éprouvettes Dogbone, il y a une dépendance entre le critère de fatigue énergétique et l'orientation des fibres. Pour mieux comprendre la relation entre la durée de vie en fatigue et l'énergie dissipée par cycle, des essais d'auto-échauffement et de fatigue ont été réalisés sur des éprouvettes ayant un état d'orientation plus homogène dans l'épaisseur, ce sont les éprouvettes amincies (cf. §3.2.2). Les éprouvettes amincies sont nommées en fonction de l'éprouvette Dogbone dont elles proviennent et de la couche à tester, par exemple, une éprouvette « peau » 0° est la peau d'une éprouvette Dogbone 0°. Les éprouvettes « peau » ont une épaisseur minimale comprise entre 1 et 1.2mm et les éprouvettes « cœur » ont une épaisseur minimale comprise entre 0.7 et 1mm. A partir de la figure 3.4b qui montre l'évolution de l'orientation dans l'épaisseur d'une éprouvette Dogbone 0°, nous pouvons observer que, pour le cas des éprouvettes « peau », l'orientation est homogène dans l'épaisseur (appelée orientation intense). Pour le cas des éprouvettes « cœur » l'orientation évolue jusqu'à une valeur minimale et ensuite elle remonte (appelée orientation diffuse).

La figure 4.32 montre les champs d'énergie dissipée de chaque type d'éprouvette amincie considéré. Nous pouvons observer que les champs sont plus hétérogènes que ceux des éprouvettes Dogbone. Cela est dû au fait que le procédé d'obtention (râpage et polissage) de ces éprouvettes entraîne une évolution de l'épaisseur dans la longueur, tel qu'illustré sur la figure 3.5a. Cependant, nous pouvons détecter précisément les zones dans les éprouvettes ayant la dissipation la plus importante (et aussi le point chaud). Nous pouvons donc appliquer les analyses évoquées précédemment. La figure 4.33 montre les comparaisons entre les courbes d'auto-échauffement (obtenues sur un état transitoire avec l'analyse locale) des éprouvettes amincies avec celles des

éprouvettes Dogbone. Nous pouvons voir que pour le cas des éprouvettes Dogbone 0°, l'énergie dissipée par cycle est très proche de celle des éprouvettes peau 0°. Pour le cas des éprouvettes Dogbone 90° l'énergie dissipée par cycle est très proche de celle des éprouvettes cœur 90°. Pour les éprouvettes Dogbone 45° l'énergie dissipée par cycle est comprise entre celle des éprouvettes cœur 45° et peau 45°.

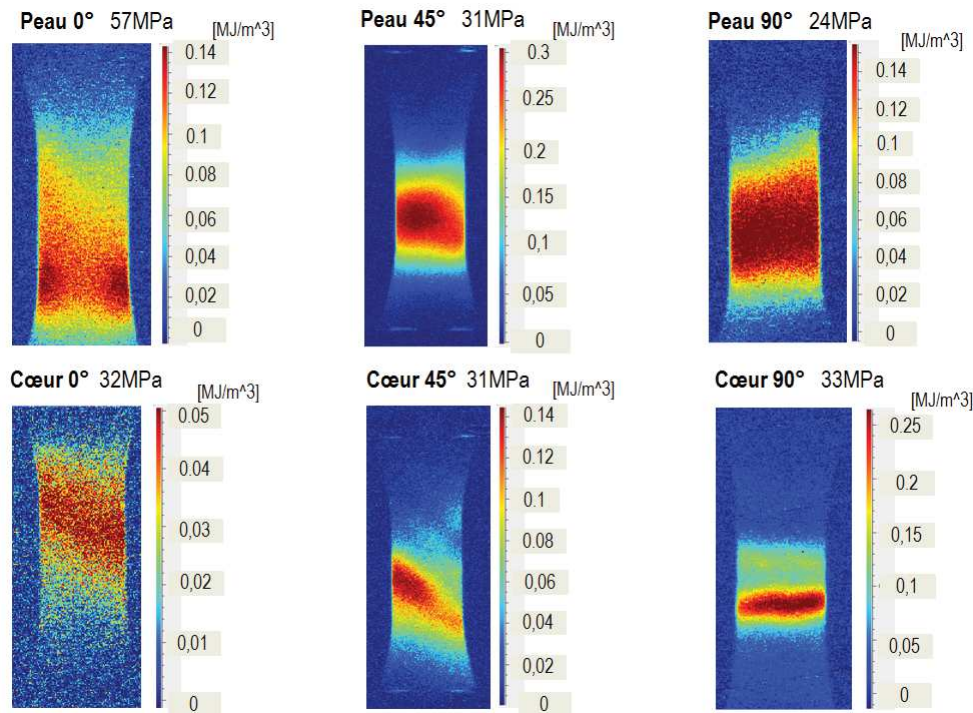


FIGURE 4.32 – Champs d'énergie dissipée par cycle des éprouvettes amincies pour le dernier niveau de contrainte lors des essais d'auto-échauffement. RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

Ces résultats montrent que l'énergie dissipée par cycle d'une éprouvette Dogbone pour une amplitude de contrainte nominale donnée est contrôlée par la couche la plus raide de l'éprouvette (cœur d'une éprouvette Dogbone 90° ou peau d'une éprouvette Dogbone 0°). Pour le cas des éprouvettes Dogbone 45°, les observations sont probablement liées à la nature intense ou diffuse de l'orientation puisque les couches de peau et cœur devraient avoir des orientations moyennes similaires. Pour les éprouvettes peau 45° toutes les fibres sont bien orientées à 45° par rapport à la direction du chargement, par contre pour les éprouvettes cœur 45° il y a quelques fibres qui sont mieux orientées par rapport à la direction du chargement. C'est pourquoi nous observons que pour le même niveau d'amplitude de contrainte nominale, les éprouvettes peau 45° dissipent plus que les éprouvettes cœur 45°.

L'objectif est maintenant d'étudier l'effet de l'orientation sur les courbes d'auto-échauffement. La figure 4.34a montre les courbes d'auto-échauffement pour des orientations intenses (éprouvettes peau). Nous pouvons observer que pour le même niveau d'amplitude de contrainte nominale, la dissipation augmente lorsque les fibres sont moins bien alignées par rapport à la direction de chargement. La figure 4.34b montre la comparaison entre les cas d'orientation intense et diffuse. Nous pouvons observer que pour une amplitude de contrainte nominale donnée, la dissipation

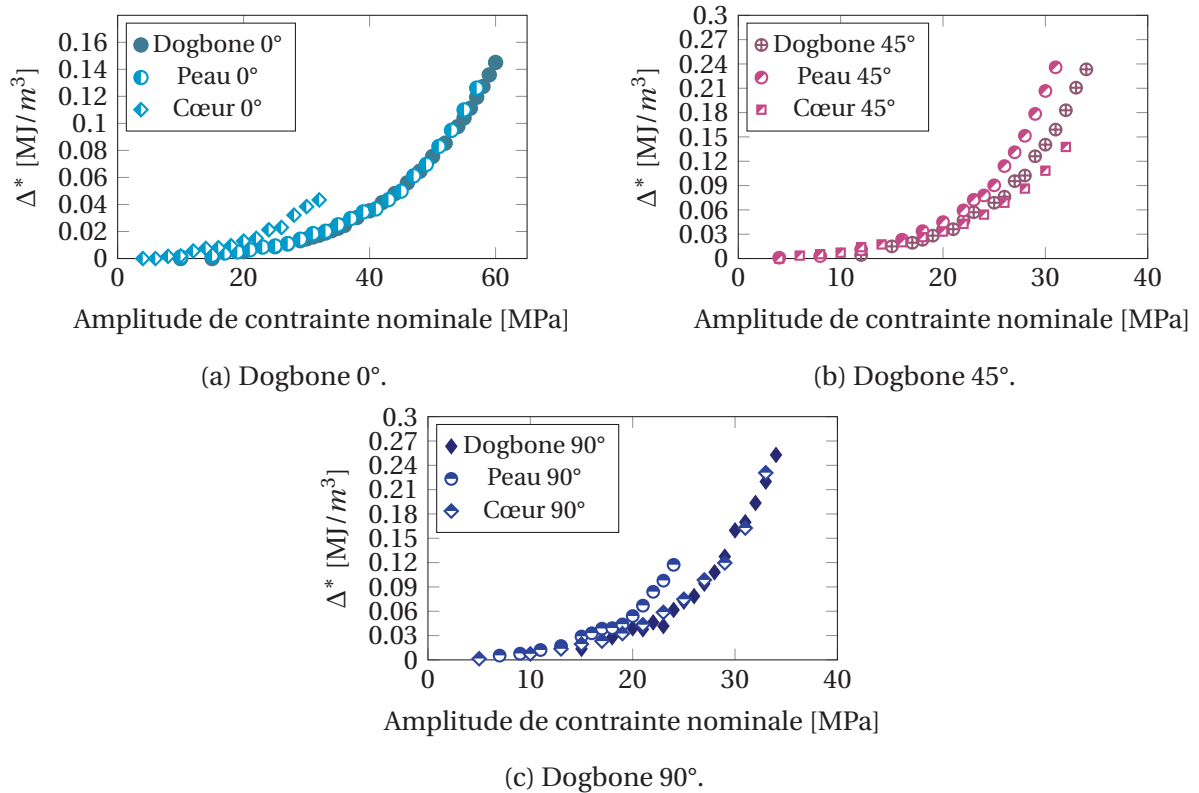


FIGURE 4.33 – Comparaison des essais d’auto-échauffement entre les éprouvettes amincies et les éprouvettes Dogbone (analyse locale). RH50, f=1Hz et R=0.

des éprouvettes ayant une orientation diffuse est comprise entre celle des éprouvettes ayant une orientation intense. Ceci est un résultat logique par rapport à l’alignement des fibres selon la direction de chargement. En effet, un meilleur alignement implique une raideur plus importante. Donc, la déformation et la dissipation seront moins importantes.

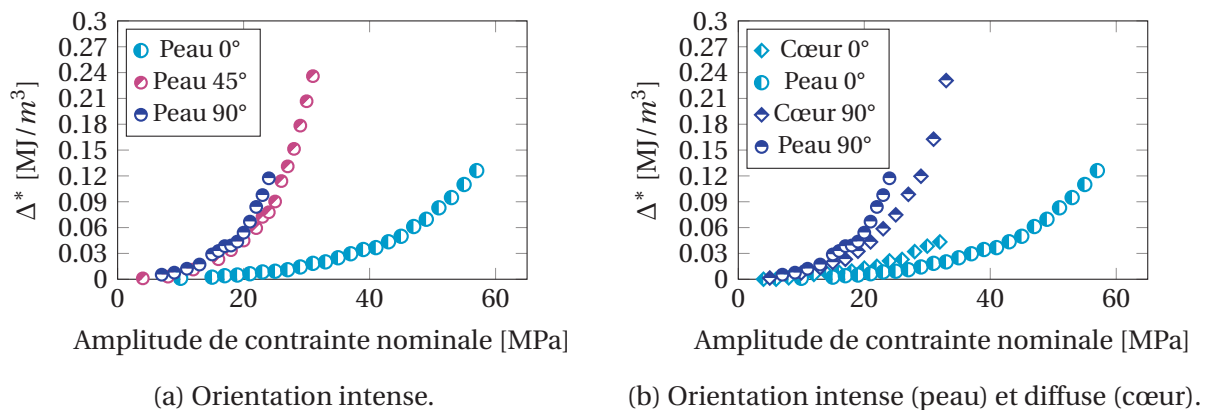


FIGURE 4.34 – Comparaisons entre les cas d’orientation intense et d’orientation diffuse (analyse locale). RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

Quelques essais de fatigue ont été réalisés sur les éprouvettes amincies. La figure 4.35 montre les points de fatigue en fonction de Δ^* ainsi que les critères de fatigue identifiés sur les éprouvettes Dogbone. Nous observons que les éprouvettes peau 45° et cœur 45° sont très proches du critère identifié sur les éprouvettes Dogbone 45° et que les éprouvettes Peau 0°, peau 90°, cœur 0° et

cœur 90° sont plus proches des critères identifiées sur les éprouvettes Dogbone 0° et Dogbone 90°. Ces résultats (qui restent à conforter pour d'autres essais de fatigue) permettent de mieux comprendre les observations réalisées sur les éprouvettes Dogbone, car les éprouvettes ayant une orientation majoritaire à 45° ont toujours une énergie dissipée par cycle plus importante que les éprouvettes ayant une orientation majoritaire à 0° ou 90° pour la même durée de vie. Ceci montre qu'il peut y avoir une partie de la dissipation liée au cisaillement (élevées pour une orientation à 45°), laquelle n'aurait pas d'influence sur le comportement en fatigue. Les éprouvettes peau 45° et cœur 45° ont une durée de vie légèrement plus importante pour le même niveau de Δ^* que les éprouvettes Dogbone 45°. Ceci pourrait être un signe de l'influence de l'interface cœur-peau sur le comportement en fatigue. En second lieu, la figure 4.36 montre les points de fatigue en fonction de σ_a où nous pouvons voir que le fait de changer d'orientation entraîne un écart très important sur la durée de vie (environ 3 décades) pour le même niveau de σ_a par rapport à celle constatée sur la courbe en fonction de Δ^* (environ 1 décade).

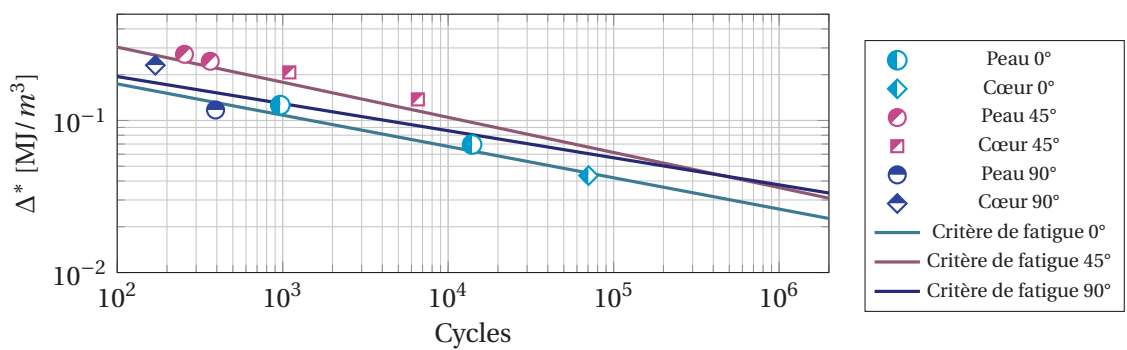


FIGURE 4.35 – Comparaison des critères de fatigue (identifiés sur les éprouvettes Dogbone) et des essais de fatigue sur les éprouvettes amincies. RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

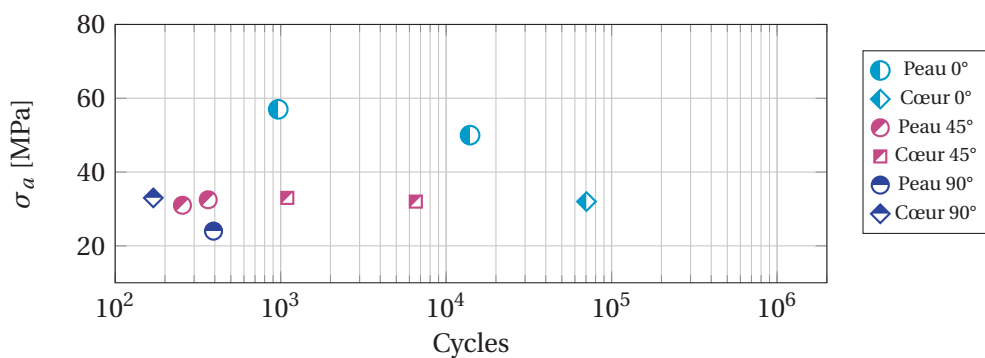


FIGURE 4.36 – Comparaison des essais de fatigue (en fonction de σ_a) des éprouvettes amincies. RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

Comme pour le cas des éprouvettes Dogbone, l'équivalence entre une analyse sur un état transitoire et sur un état stationnaire pour l'obtention de Δ^* a été vérifiée sur les éprouvettes amincies, tel que montré sur la figure 4.37. La vérification a été réalisée pour un seul niveau de σ_a et le temps caractéristique thermique trouvé pour les éprouvettes amincies est autour de la centaine de secondes. Nous constatons que les deux types d'analyses donnent des résultats proches.

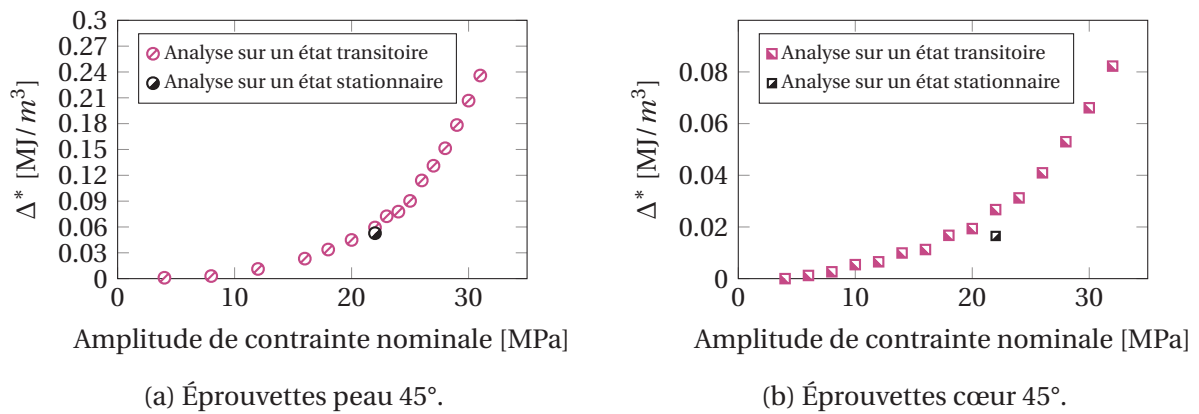


FIGURE 4.37 – Comparaison entre l'analyse sur un état transitoire (analyse globale) et l'analyse sur un état stationnaire des éprouvettes amincies. RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

4.3.3 Bilan

Les résultats présentés dans cette section nous permettent d'effectuer un certain nombre d'observations, les plus importantes sont :

Analyse de la réponse thermo-mécanique

-Données thermo-mécaniques globales :

- Pour les conditions testées (Fréquence de 1 Hz, R=0) il y a une bonne corrélation entre l'aire de la boucle d'hystérèse et l'énergie dissipée par cycle (analyse globale) et l'écart maximum constaté est autour de 20% pour les 3 orientations considérées ;
- le choix des régimes dans la courbe présentant l'énergie dissipée par cycle en fonction de l'amplitude de contrainte semble cohérent avec les régimes observés pour les courbes représentant l'évolution de la déformation résiduelle ou du module sécant en fonction de l'amplitude de contrainte.

-Influence de l'orientation moyenne :

- l'énergie dissipée par cycle au même niveau d'amplitude de contrainte nominale dépend du cas d'orientation considéré. Le classement des courbes est corrélé vis à vis de la raideur des échantillons, ce qui est logique car les essais sont contrôlés en effort et que le module sécant dépend de l'orientation.

-Éprouvettes Dogbone et éprouvettes amincies :

- en général, nous constatons une différence claire entre les éprouvettes Dogbone et les éprouvettes amincies en terme d'énergie dissipée par cycle en fonction de l'amplitude de contrainte nominale. Cette observation est là encore logique du fait de l'évolution de la raideur des éprouvettes en fonction des orientations et des couches considérées ;
- pour le même niveau d'amplitude de contrainte nominale, l'énergie dissipée par cycle d'une éprouvette Dogbone est très proche de celle de sa couche la plus raide (cœur

ou peau). Ceci est compréhensible en imaginant les éprouvettes Dogbone comme des éprouvettes stratifiées ;

- la comparaison entre les éprouvettes Dogbone et les éprouvettes amincies nécessite d'être abordée par des simulations numériques (à l'aide d'un modèle de comportement pertinent) afin de mieux comprendre les gradients de contrainte et donc de dissipation induits. Cette analyse numérique permettra ainsi de mieux évaluer la correspondance entre l'énergie dissipée mesurée en peau et l'énergie moyenne dissipée dans le volume ;
- d'après les résultats sur les orientations intenses (cas des éprouvettes « peaux »), nous vérifions que pour le même niveau d'amplitude de contrainte nominale, l'énergie dissipée par cycle est minimale lorsque les fibres sont orientées longitudinalement et que celle-ci est maximale lorsque les fibres sont orientées transversalement ;
- les courbes d'auto-échauffement des orientations diffuses sont toujours comprises entre les cas extrêmes des orientations intenses.

Analyse de la ruine

-Données thermo-mécaniques globales :

- l'utilisation des données mécaniques globales tels que le module sécant ou la déformation résiduelle pour la mise en place de critères de fatigue s'avère difficile. En effet, soit la rupture est localisée en dehors de la zone utile de l'éprouvette (observation systématique pour les Dogbone 0°, occasionnelle pour les cas à 90° et 45°) et nous constatons des bandes de localisation (Dogbone 45° et 90°). C'est pourquoi il est important d'utiliser les mesures de champs, qui dans notre étude sont uniquement thermiques, mais des mesures de champs de déformation seraient également précieuses. Nous les mettrons à profit dans le chapitre suivant sur les éprouvettes de structure ;
- d'après le suivi de l'aire de la boucle d'hystérèse pendant les essais de fatigue, nous observons que l'énergie dissipée par cycle peut augmenter pendant un essai de fatigue lorsque la durée de vie est inférieure à quelques 10^4 cycles. Pour des durées de vie plus importantes, l'aire de la boucle d'hystérèse est quasi constante pendant l'essai (après une stabilisation rapide en quelques cycles et jusqu'à une augmentation quelques cycles avant la rupture).

-Initiation et propagation :

- l'étape de propagation pour tous les cas d'éprouvettes peut être considérée comme négligeable vis-à-vis de la durée de vie en fatigue (<1% de la durée de vie jusqu'à rupture) ;
- pour chaque cas d'orientation considéré des modes de rupture ductiles et fragiles sont visibles sur les faciès de rupture et la zone de rupture ductile semble être corrélée à la localisation de l'initiation mesurée thermiquement (appelée "point chaud" dans ce manuscrit) ;
- la localisation de la rupture ductile dans l'épaisseur se situe au niveau de l'interface cœur-peau pour les éprouvettes Dogbone 45°, au niveau du cœur et de l'interface pour les

éprouvettes Dogbone 90° et au niveau de la peau pour les éprouvettes Dogbone 0° ;

- la taille de la zone de rupture ductile est proportionnelle à la durée de vie ;
- pour le même niveau d'énergie dissipée par cycle, la durée de vie des éprouvettes amincies est comparable à celle des éprouvettes Dogbone. Cela tend à montrer que l'influence de l'interface cœur-peau sur la tenue en fatigue est du deuxième ordre. Le comportement en fatigue des éprouvettes Dogbone semble donc être piloté par la matrice au niveau de la couche la plus raide (peau pour 0°, cœur pour 90°, interface pour 45°).

-Critère de fatigue :

- le critère de fatigue énergétique est bien corrélé aux essais de fatigue classique pour chaque cas d'orientation considérée, pour les éprouvettes Dogbone ou amincies ;
- le critère de fatigue semble unifié lorsque l'orientation est longitudinale ou transversale. Ce résultat est visible à la fois pour des orientations combinées (Dogbone 0° et 90°) mais également pour des orientations simples (éprouvettes amincies, par exemple, les éprouvettes de peau et de cœur issues des Dogbones 0°). Cela semble montrer que le comportement en fatigue est principalement contrôlé par celui de la matrice ;
- pour une orientation à 45°, qu'il s'agisse d'éprouvettes amincies (peau 45° ou cœur 45°) ou complètes (Dogbone 45°) un seul critère énergétique s'applique, qui est différent de celui identifié pour les éprouvettes à 0° et 90°. Il y a visiblement une contribution à l'énergie dissipée par cycle liée au cisaillement qui pourrait expliquer le fait qu'une orientation à 45° induit une dissipation supérieure aux orientations à 0° et 90°, pour une même durée de vie ;
- de manière attendue, l'énergie dissipée par cycle permet d'unifier les résultats de fatigue, obtenus pour les trois cas d'orientation moyenne, de manière plus satisfaisante qu'une représentation en fonction de l'amplitude de contrainte nominale ;
- l'analyse basé sur les éprouvettes amincies paraît très intéressante car l'orientation est mieux maîtrisée et que la durée de vie semble identique à celle des éprouvettes complètes. Cette configuration permet donc de simplifier l'analyse de l'effet de l'orientation des fibres sur les relations entre comportement et tenue en fatigue.

4.4 Influence du chargement mécanique

Le premier objectif abordé dans cette partie est d'étudier l'évolution de la courbe d'auto-échauffement et des propriétés en fatigue pour plusieurs rapport de charge, pour chaque cas d'éprouvette Dogbone. Le deuxième objectif est d'étudier les changements des propriétés mécaniques, de la dissipation et de la tenue en fatigue entraînés par l'histoire de chargement sur les éprouvettes Dogbone. Ces types d'essais ont été réalisés uniquement sur les éprouvettes Dogbone 45°, car ce sont les éprouvettes les moins dispersées en termes de fatigue. Cette propriété permet de mieux quantifier l'influence de l'histoire de chargement sur la tenue en fatigue.

4.4.1 Variation du rapport de charge

Analyse de l'auto-échauffement et critère de fatigue

- Rapports de charge positifs (R=0.1 et R=0.3)

Ces premiers cas de rapport de charge ont pour objectif d'augmenter la contrainte moyenne nominale et de diminuer l'amplitude de contrainte nominale (pour la même contrainte nominale maximale) par rapport au cas déjà présenté (R=0). Les figures 4.38, 4.39 et 4.40 montrent, dans la colonne de gauche, les courbes d'auto-échauffement (analyse locale) pour les rapports de charge R=0, R=0.1 et R=0.3 des 3 cas d'éprouvette Dogbone. Dans la colonne de droite, les figures montrent les comparaisons entre les essais de fatigue à un rapport de charge R=0.1 ou R=0.3 avec les essais de fatigue et le critère de fatigue identifié pour un rapport de charge R=0 pour chaque cas d'éprouvette Dogbone. Les courbes d'auto-échauffement sont présentées par rapport à la contrainte nominale maximale (notée σ_{max}) pour mieux apprécier l'influence de l'amplitude de contrainte nominale qui diminue lorsque le rapport de charge augmente. L'évolution de la courbe d'auto-échauffement peut donc être associée de manière logique aux changements de l'amplitude de contrainte. Nous observons une forte diminution de l'énergie dissipée par cycle lorsque le rapport de charge augmente pour les éprouvettes Dogbone 0° et 45° (environ 60% entre R=0 et R=0.3 pour le dernier niveau de σ_{max} considéré). Pour le cas des éprouvettes Dogbone 90° cette diminution est moins prononcée (environ 40% entre R=0 et R=0.3 pour le dernier niveau de σ_{max} considéré). Notons que l'identification des critères énergétiques à partir des courbes d'auto-échauffement est tout à fait possible (et donne des résultats cohérents), mais le nombre d'essais de fatigue n'est pas suffisant pour en discuter ici. Cette analyse ne sera donc pas détaillée ici. Nous pouvons voir que les résultats des essais de fatigue sont proches du critère de fatigue énergétique identifiée pour un rapport de charge R=0, et ce pour les trois cas d'orientation considérés. Cette observation donne un espoir certain sur la possibilité d'identifier un critère de fatigue énergétique capable de prendre en compte une plage de rapports de charge. En effet, la diminution de l'énergie dissipée par cycle avec le rapport de charge est accompagnée d'une augmentation de la durée de vie proche de la prédiction du critère. Il faudrait tester d'autres cas de rapport de charge et réaliser plus d'essais de fatigue pour confirmer ces observations.

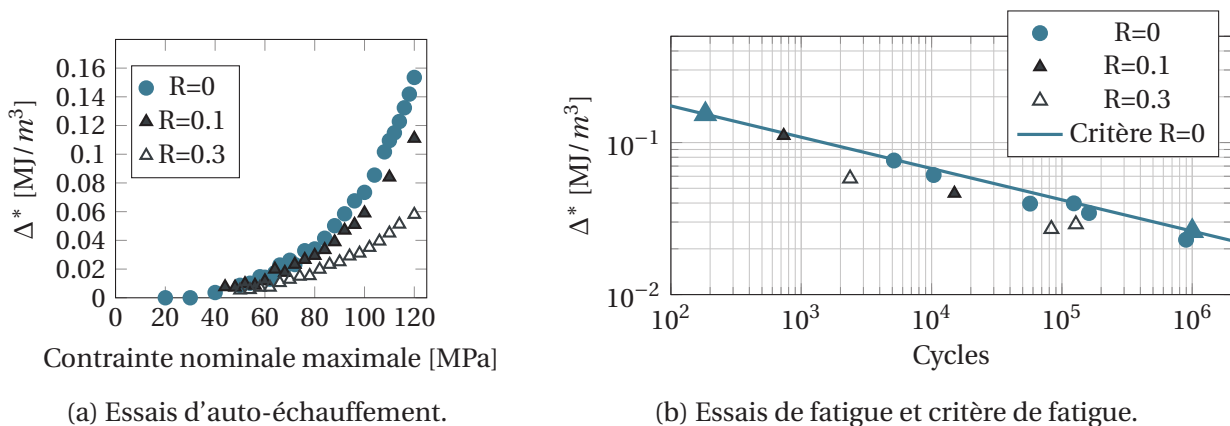


FIGURE 4.38 – Comparaison des essais d'auto-échauffement et de fatigue pour des rapports de charge R=0,0.1 et 0.3. Dogbone 0°, RH50, f=1Hz et température ambiante.

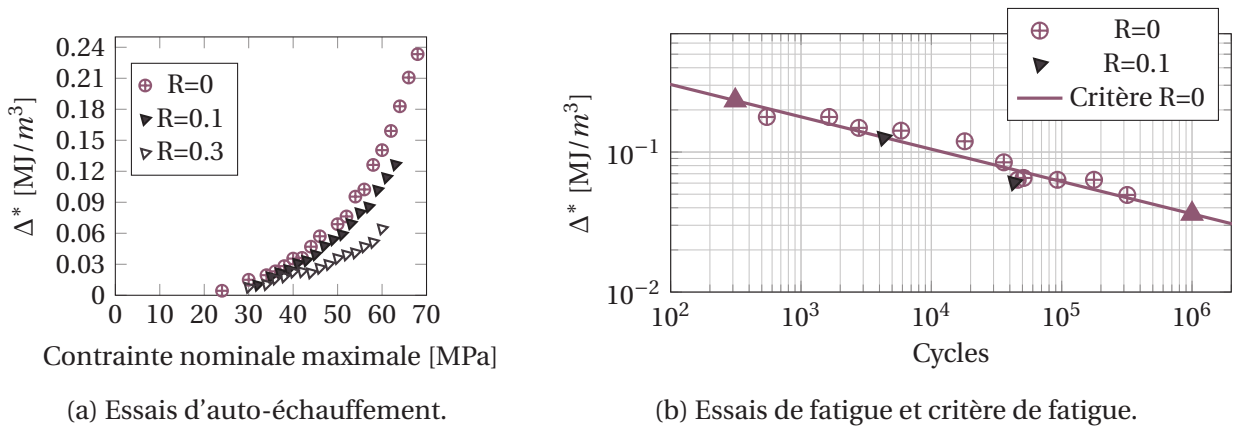


FIGURE 4.39 – Comparaison des essais d'auto-échauffement et de fatigue pour des rapports de charge $R=0,0.1$ et 0.3 . Dogbone 45° , RH50, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

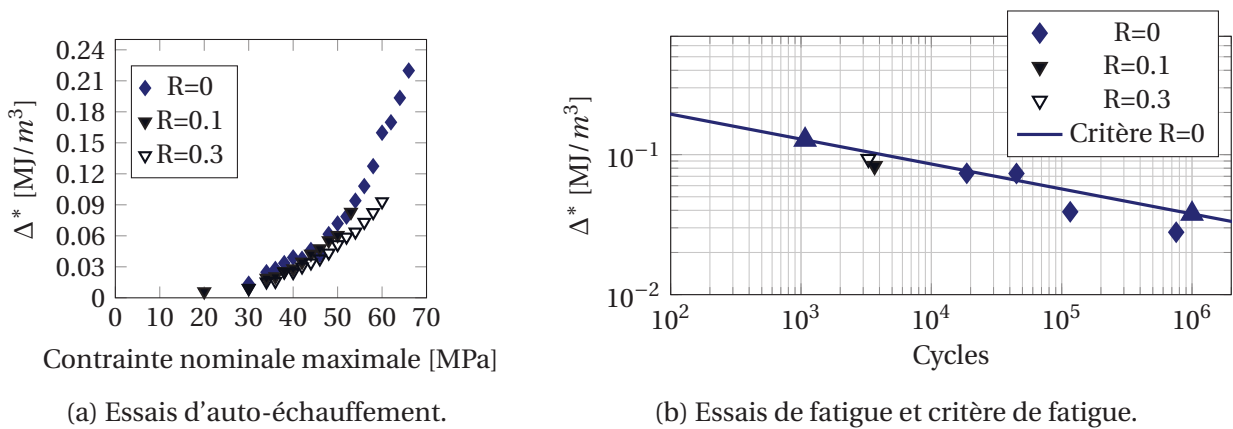


FIGURE 4.40 – Comparaison des essais d'auto-échauffement et de fatigue pour des rapports de charge $R=0,0.1$ et 0.3 . Dogbone 90° , RH50, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

Dans le cadre du projet DURAFIP des campagnes d'essais de fatigue sur les éprouvettes Dogbone ont aussi été réalisées à Solvay *engineering plastics*. Les caractéristiques des essais sont un rapport de charge $R=0.1$ et une fréquence de 3Hz . L'ensemble des essais est réalisé dans une enceinte climatique permettant de générer une convection forcée (pour limiter l'augmentation de température). La figure 4.41 montre les comparaisons entre les essais de fatigue réalisés à Solvay avec ceux réalisés à l'ENSTA Bretagne ($R=0.1$ et $f=1\text{Hz}$) pour chaque cas d'éprouvettes Dogbone. Nous observons que pour le même niveau de σ_{max} les essais réalisés à l'ENSTA Bretagne sont au moins une demi décade à gauche de la courbe moyenne des essais réalisés à Solvay *engineering plastics*. Cette différence vient probablement de la variation de la fréquence de chargement entre les essais. En effet, lorsque celle-ci est augmentée, les essais sont plus courts pour la même durée de vie, donc la composante associée au fluage pendant les chargements cycliques sera moins sévère pour une fréquence plus importante. Le nombre d'essais réalisés à Solvay *engineering plastics* permet néanmoins de mieux apprécier la dispersion des essais de fatigue. Les éprouvettes Dogbone 45° présentent ainsi la dispersion la moins importante et les éprouvettes Dogbone 90° montrent la dispersion la plus importante.

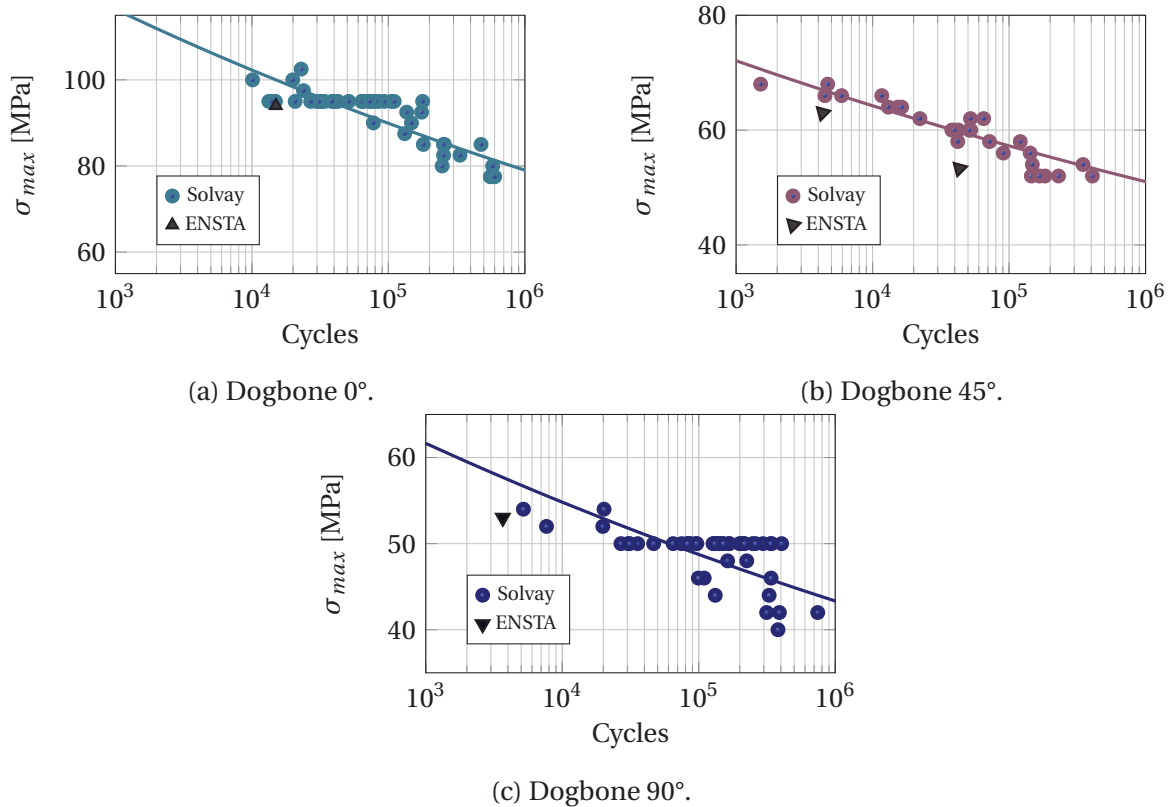


FIGURE 4.41 – Comparaison des essais de fatigue réalisés à Solvay *engineering plastics* et ceux réalisés à l’ENSTA Bretagne. RH50 et R=0.1.

- Rapport de charge négatif (R=-1)

Ce cas de rapport de charge a pour effet d’enlever la contrainte moyenne nominale. La figure 4.42 montre les courbes d’auto-échauffement (analyse locale) pour les rapports de charge R=0 et R=-1 pour les 3 cas d’orientation d’éprouvette Dogbone. Ces courbes sont présentées en fonction de σ_a pour mieux apprécier l’effet de l’annulation de la contrainte moyenne sur la dissipation. Pour le même niveau de σ_a une diminution très importante de l’énergie dissipée par cycle est constatée entre le cas R=0 et R=-1. Il faut remarquer que, comme il ne faut que 20 cycles de chargement pour calculer l’énergie dissipée par cycle pour chaque niveau de σ_a , le risque de flambement dû à l’adoucissement des éprouvettes ou au cumul de plasticité pour les hauts niveaux de σ_a et R=-1 est limité. Sur les niveaux présentés, aucun flambement n’a été noté. Par contre, pendant les essais de fatigue classiques le risque de flambement est bien plus important pour les courtes durées de vie. Les essais de fatigue considérés pour le rapport de charge R=-1 ont donc une durée de vie minimale de l’ordre de quelques dizaines de milliers de cycles.

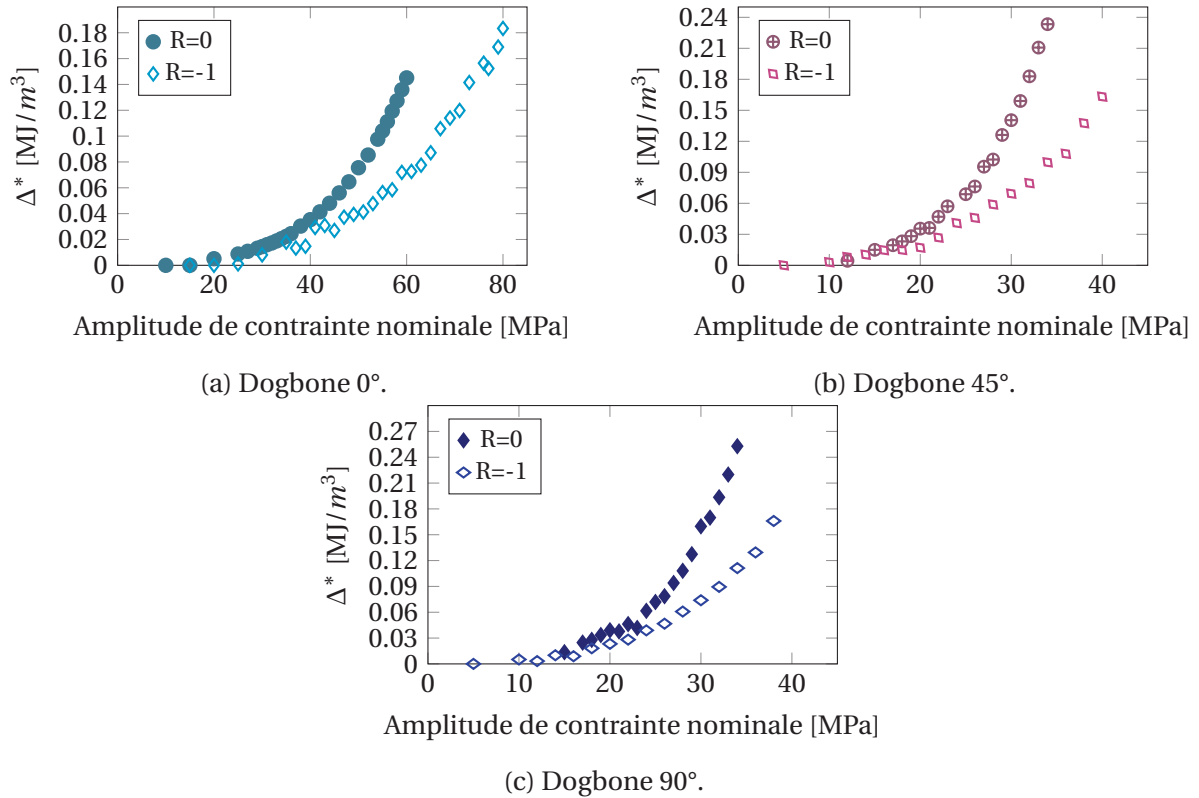


FIGURE 4.42 – Courbes d’auto-échauffement (analyse locale) pour un rapport de charge $R=0$ et un rapport de charge $R=-1$. RH50, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

De la même façon que pour le cas $R=0$, l’aire de la boucle d’hystérèse (h) et le module sécant (E_s) ont été étudiés pendant les essais d’auto-échauffement avec un rapport de charge $R=-1$. La figure 4.43 montre les évolutions de h , de E_s et de Δ^* (analyse globale) pour chaque orientation considérée. Nous pouvons observer qu’il y a une très bonne correspondance entre h et Δ^* pour les trois cas d’éprouvette Dogbone et aussi une diminution continue de E_s . Cela montre que la presque totalité de l’énergie est transformée en chaleur. Cette correspondance semble meilleure que celle constatée avec un rapport de charge $R=0$ (cf. Fig.4.17). Cette amélioration peut être liée au fait que, pour un rapport de charge $R=-1$, la contrainte nominale maximale considérée est moins importante que celle considérée pour un rapport de charge $R=0$. La composante visco-plastique sera donc elle aussi moins importante. Par exemple pour le cas d’éprouvettes Dogbone 0°, l’amplitude de contrainte la plus importante considérée pour $R=0$ a été de 60MPa ($\sigma_{max}=120\text{MPa}$) et pour $R=-1$ elle a été de 80MPa ($\sigma_{max}=80\text{MPa}$).

Les essais de fatigue avec un rapport de charge $R=-1$ ont été réalisés uniquement sur les éprouvettes Dogbone 0°, car ce sont les éprouvettes Dogbone les plus raides. Il y a donc moins de risque de flambement pendant les essais de fatigue. La figure 4.44 montre les régimes observés sur la courbe d’auto-échauffement pour $R=-1$ ainsi que les points de fatigue et les critères de fatigue pour les rapports de charge $R=0$ et $R=-1$. Il faut remarquer que l’identification du critère de fatigue pour le cas $R=-1$ a été réalisée en utilisant deux éprouvettes. La première a été utilisée pour faire l’essai d’auto-échauffement et déterminer les régimes, mais, le dernier niveau de σ_a considéré étant de 80MPa, il pourrait entraîner du flambement au cours de l’essai mené jusqu’à rupture. Ce niveau de chargement n’est donc pas pris en compte pour l’identification du critère,

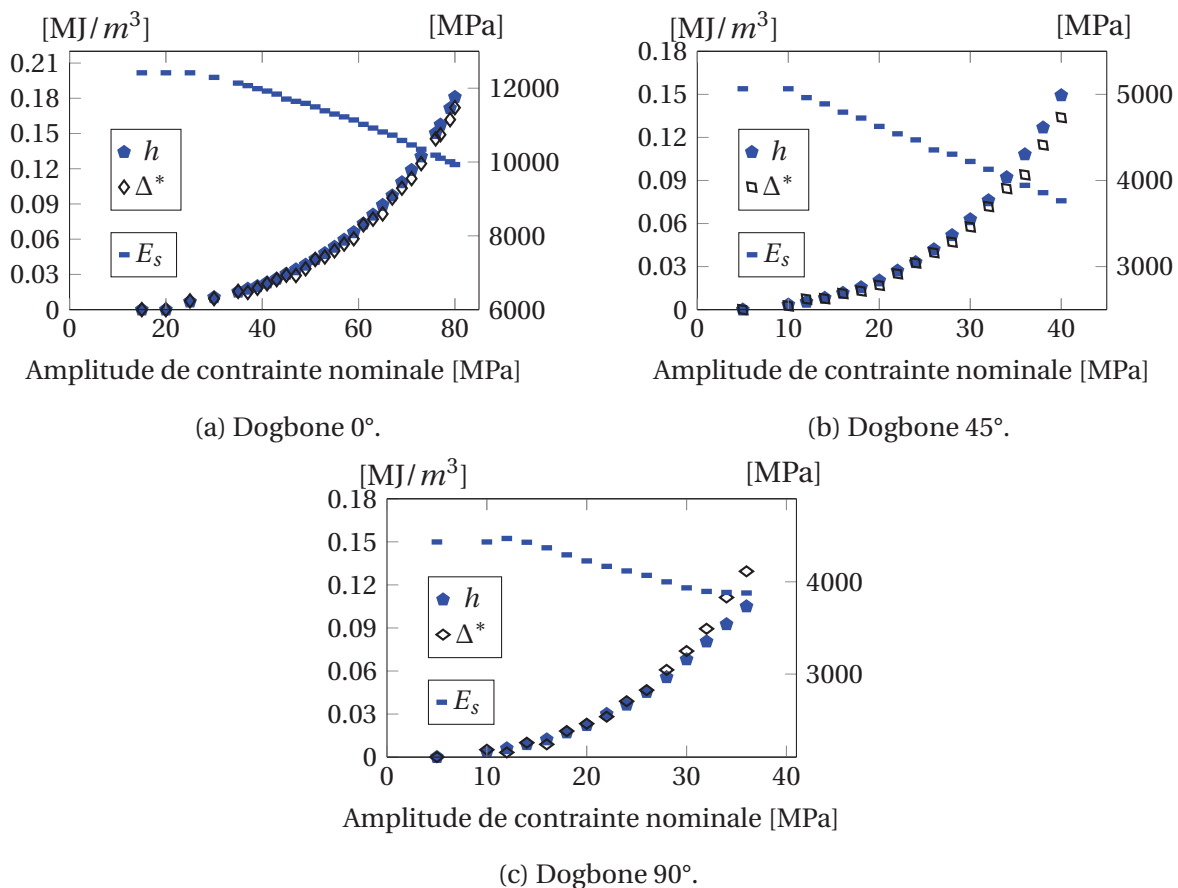
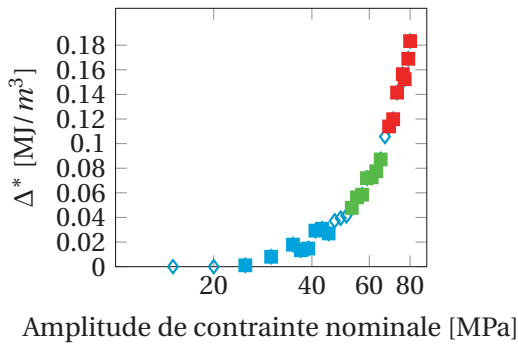
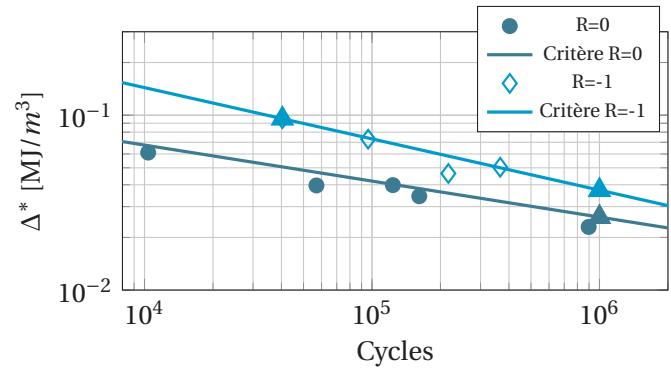


FIGURE 4.43 – Évolution de l’aire de la boucle d’hystérèse, du module sécant et de l’énergie dissipée par cycle, pendant les essais d’auto-échauffement (analyse globale). RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=-1$ et température ambiante.

et une deuxième éprouvette a été testée avec un $\sigma_a=64\text{MPa}$ menant à une durée de vie de 40376 cycles. Pendant l’essai de fatigue aucun flambement n’a été observé et cette éprouvette fournit le deuxième point pour l’identification du critère de fatigue. Nous observons que, comme pour le cas $R=0$, il y a une bonne correspondance entre les essais de fatigue et le critère de fatigue identifié avec un rapport de charge $R=-1$. Nous observons aussi que, pour le même niveau de Δ^* , il y a environ une décade de différence entre les deux cas de rapport de charge, c’est-à-dire que les éprouvettes testées avec un rapport de charge $R=-1$ ont une durée de vie plus importante pour le même niveau de Δ^* .



(a) Régimes observés (R=-1).

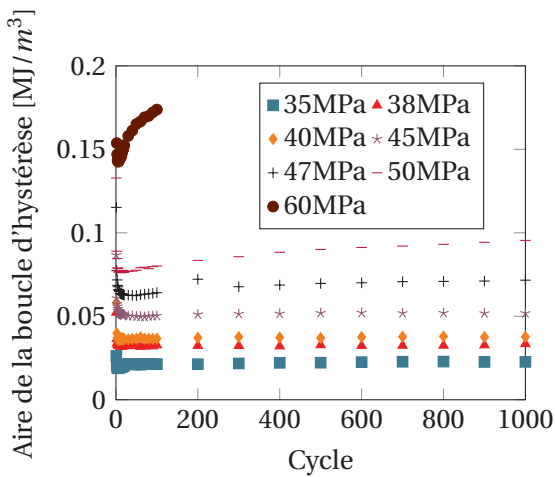


(b) Essais de fatigue et critère de fatigue (R=0 et R=-1).

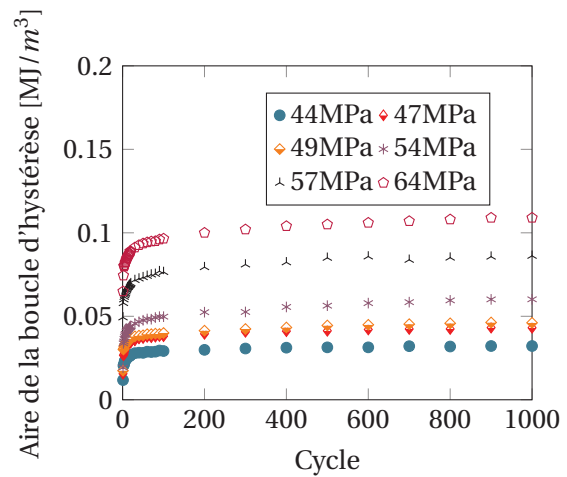
FIGURE 4.44 – Identification du critère de fatigue sur les éprouvettes Dogbone 0° avec un rapport de charge R=-1 et comparaison avec le cas R=0. RH50, f=1Hz et température ambiante.

Suivi des variables mécaniques durant les essais de fatigue

L'aire de la boucle d'hystérèse et le module sécant ont été mesurés pendant les essais de fatigue pour chaque cas de rapport de charge, tel que montré dans les figures 4.45, 4.46 et 4.47. D'un côté nous pouvons observer au cours des premiers 1000 cycles (cf. Fig.4.45) une stabilisation rapide de l'aire de la boucle d'hystérèse pour la plupart des essais (sauf ceux qui ont une durée de vie très courte). De l'autre côté, à partir de l'évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse pour une plage de cycles plus importante (cf. Fig.4.46) nous observons que celle-ci est quasi constante durant la majorité de l'essai lorsque la durée de vie est suffisamment longue (plus de 10000 cycles pour R=0 et plus de 50000 cycles pour R=-1). Le module sécant évolue de façon inverse à l'aire de la boucle d'hystérèse (cf. Fig.4.47). Ceci paraît compréhensible au moins en terme d'énergie élastique, pour un pilotage en effort. En termes de stabilisation le comportement des deux variables est similaire.

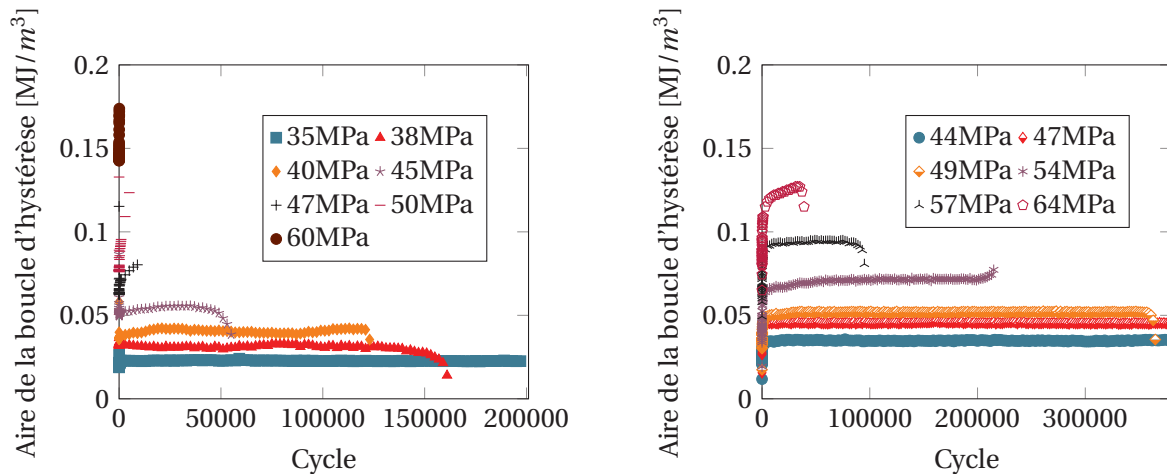


(a) Évolution entre 0 et 1000 cycles (R=0).



(b) Évolution entre 0 et 1000 cycles (R=-1).

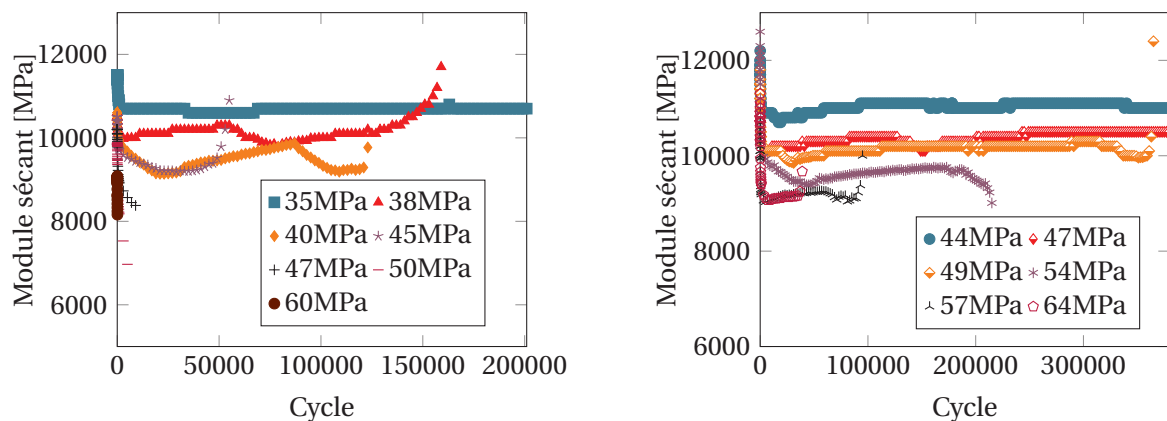
FIGURE 4.45 – Évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse pendant les essais de fatigue en fonction de l'amplitude de contrainte nominale. Éprouvettes Dogbone 0°, RH50, f=1Hz et température ambiante.



(a) Évolution entre 0 et 200000 cycles (R=0). 35MPa rupture-896484 cycles, 38MPa rupture-161374 cycles, 40MPa rupture-123532 cycles, 45MPa rupture-56933 cycles, 47MPa rupture-10378 cycles, 50MPa rupture-5143 cycles, 60MPa rupture-184 cycles.

(b) Évolution entre 0 et 350000 cycles (R=-1). 44MPa pas de rupture, 47MPa pas de rupture, 49MPa rupture-366282 cycles, 54MPa rupture-216602 cycles, 57MPa rupture-96177 cycles, 64MPa rupture-40376 cycles.

FIGURE 4.46 – Évolution de l’aire de la boucle d’hystérèse pendant les essais de fatigue en fonction de l’amplitude de contrainte nominale. Éprouvettes Dogbone 0°, RH50, f=1Hz et température ambiante.

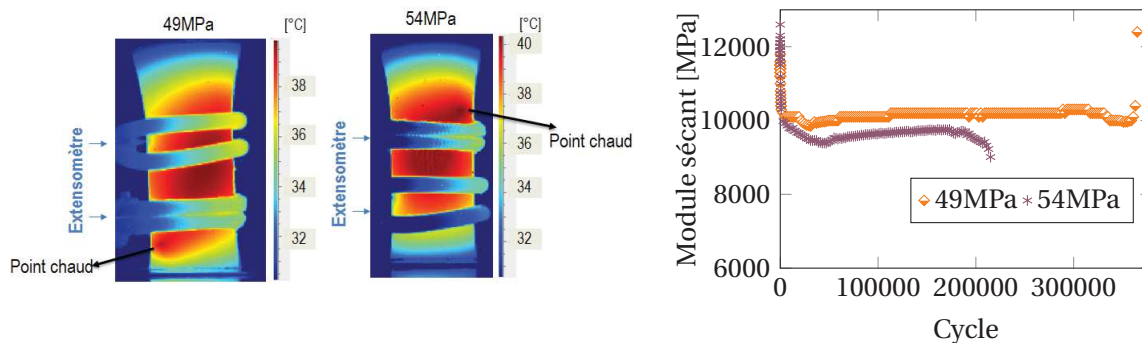


(a) Évolution entre 0 et 200000 cycles (R=0). (b) Évolution entre 0 et 350000 cycles (R=-1).

FIGURE 4.47 – Évolution du module sécant pendant les essais de fatigue en fonction de l’amplitude de contrainte nominale. Éprouvettes Dogbone 0°, RH50, f=1Hz et température ambiante.

La dernière observation réalisée sur l’évolution de ces deux variables au cours des essais de fatigue est leur évolution quelques cycles avant la rupture. Nous pouvons observer, par exemple sur l’évolution du module sécant, quelques cas où une augmentation est constatée avant la rupture et d’autres cas où une diminution est constatée. Nous savons que cette évolution avant la rupture est liée à l’initiation, mais pourquoi le module sécant augmenterait-il avant la rupture (puisque l’endommagement serait plutôt traduit par une diminution de celui-ci) ? L’explication de ce phénomène est donnée par la localisation de la zone d’initiation par rapport à l’extensomètre. Tel qu’illustré sur la figure 4.18a, le point chaud pour les éprouvettes Dogbone 0° apparaît

en dehors de la zone utile des éprouvettes. La figure 4.48 montre deux éprouvettes Dogbone 0° en spécifiant la localisation du point chaud et aussi l'évolution du module sécant pour chacune des éprouvettes. Il est observé que lorsque le point chaud apparaît du même côté que l'extensomètre (éprouvette à 49MPa) le module sécant semble augmenter avant la rupture de l'éprouvette et lorsque celui-ci apparaît du côté opposé à l'extensomètre (éprouvette à 54MPa) le module sécant semble diminuer avant la rupture de l'éprouvette. Ce comportement est lié au fait que la déformation mesurée par l'extensomètre sera bien évidemment modifiée par l'apparition d'une fissure (point chaud) en dehors de la zone d'analyse, entraînant une augmentation ou une diminution locale de la déformation mesurée par l'extensomètre et liée uniquement à l'emplacement de la fissure.



(a) Position du point chaud.

(b) Évolution du module sécant pour les deux cas présentés.

FIGURE 4.48 – Corrélation entre la position du point chaud et l'évolution du module sécant. Éprouvettes Dogbone 0°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=-1$ et température ambiante.

4.4.2 Essais de fatigue interrompus

L'objectif de ce premier type de chargement complexe est de connaître l'évolution de l'énergie dissipée par cycle au cours d'un essai de fatigue. Cela permettra de vérifier si la corrélation entre l'aire de la boucle d'hystérèse et l'énergie dissipée par cycle continue à être observée au cours de l'essai (corrélation vérifiée au début de l'essai). Le protocole expérimental de ce type d'essai est illustré sur la figure 4.49. Tout d'abord, un essai d'auto-échauffement est mené jusqu'à un certain niveau d'amplitude de contrainte nominale. Ensuite, pour le dernier niveau de σ_a considéré, l'éprouvette est sollicitée jusqu'à un certain pourcentage de la durée de vie (appelé palier de fatigue). Puis, l'essai est stoppé et l'éprouvette est maintenue à effort nul et dès que l'éprouvette revient à l'équilibre thermique un nouvel essai d'auto-échauffement est réalisé. Ce processus est répété pour un certain nombre de pourcentages de la durée de vie. Finalement, après avoir fait les essais pour chaque pourcentage souhaitée de la durée de vie souhaité, l'éprouvette est menée jusqu'à la rupture.

Un seul essai de ce type a été réalisé, l'amplitude de contrainte nominale du palier de fatigue considérée est de 26.65MPa ($R=0$ et $f=1\text{Hz}$), la durée de vie estimée pour ce niveau de chargement est autour de 10000 cycles. Les pourcentages de la durée de vie considérés sont : 10%, 25%, 50%, 60%, 80% et 100%. Il faut remarquer que 100% de la durée de vie est associé à la durée de vie

estimée (10000 cycles). Celui-ci a été testé parce que la durée de vie réelle de l'éprouvette a dépassé la valeur estimée.

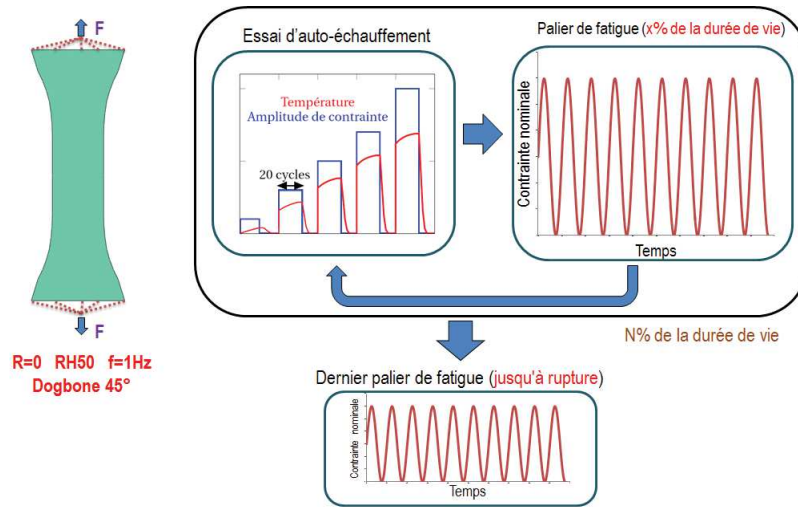
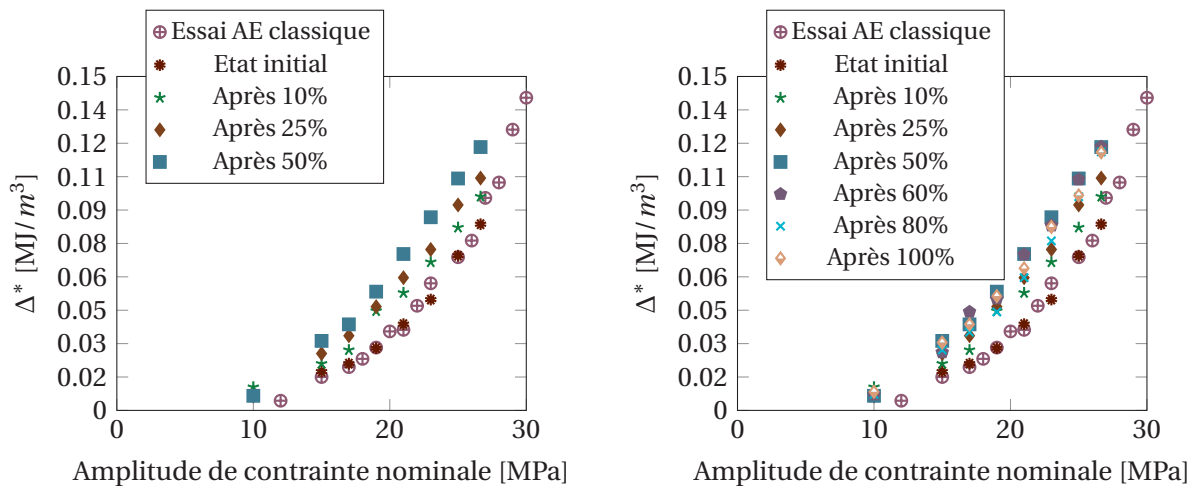


FIGURE 4.49 – Protocole expérimental des essais de fatigue interrompus.



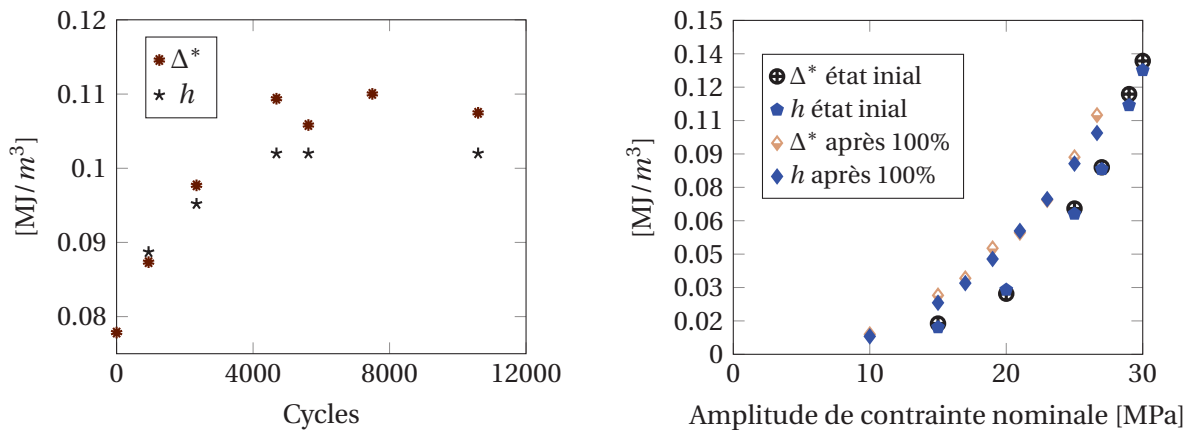
(a) Augmentation de Δ^* jusqu'à 50% de la durée de vie estimée.

(b) Stabilisation de Δ^* à partir de 50% de la durée de vie estimée.

FIGURE 4.50 – Évolution de l'énergie dissipée par cycle en fonction du pourcentage de la durée de vie estimée considéré. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

Il est constaté que l'énergie dissipée par cycle (analyse locale) augmente jusqu'à 50% de la durée de vie estimée, tel que montré sur la figure 4.50a. Pour des pourcentages plus importants de la durée de vie, il semble que l'énergie dissipée par cycle tend à se stabiliser, tel que montré sur la figure 4.50b. Ce résultat montre que l'énergie dissipée par cycle peut augmenter au cours d'un essai de fatigue. Pour mieux apprécier cette évolution, la figure 4.51a montre l'évolution de Δ^* en fonction du nombre de cycles de sollicitation. Nous pouvons observer que la stabilisation commence autour de 5000 cycles (50% de la durée de vie estimée) et que h est toujours proche de Δ^* . Finalement, la figure 4.51b montre que l'aire de la boucle d'hystérèse et l'énergie dissipée par cycle sont très proches pour une éprouvette à l'état initial comme pour l'éprouvette ayant été sollicitée à 100% de la durée de vie estimée. Ce dernier résultat répond à la question sur la

correspondance entre h et Δ^* au cours des essais de fatigue, donc nous pouvons supposer que l'évolution de h lors des essais de fatigue classique permet d'évaluer l'évolution de Δ^* .



(a) Évolution Δ^* et h en fonction du nombre de cycles considéré pour $\sigma_a=26.65\text{MPa}$.

(b) Correspondance entre h et Δ^* (analyse globale) à l'état initial et après 100% de la durée de vie estimée.

FIGURE 4.51 – Évolution de Δ^* et de h lors de l'essai interrompu. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

Au niveau du champ d'énergie dissipée par cycle, il est observé que l'allure du champ de dissipation est la même pour l'état initial et après 100% de la durée de vie, tel que montré sur la figure 4.52a. Cela veut dire que l'augmentation de l'énergie dissipée par cycle est homogène dans l'éprouvette. La rupture lors du dernier palier de fatigue a eu lieu après 10153 cycles. Donc, la durée de vie réelle de l'éprouvette est autour de 20000 cycles. Cette durée de vie semble haute par rapport à celle estimée, mais il faut prendre en compte le fait que les périodes d'interruption considérées pour faire les essais d'auto-échauffement peuvent avoir une influence sur la durée de vie finale de l'éprouvette. La figure 4.52b montre le point de fatigue par rapport à l'énergie dissipée à l'état initial et celle après 100% de la durée de vie estimée. Il est observé que pour les deux valeurs de Δ^* , le point de fatigue est proche du critère de fatigue énergétique. Pour ce niveau de durée de vie, l'augmentation de Δ^* est donc négligeable vis-à-vis du critère de fatigue. La variation de Δ^* ne remet pas en cause la construction du critère.

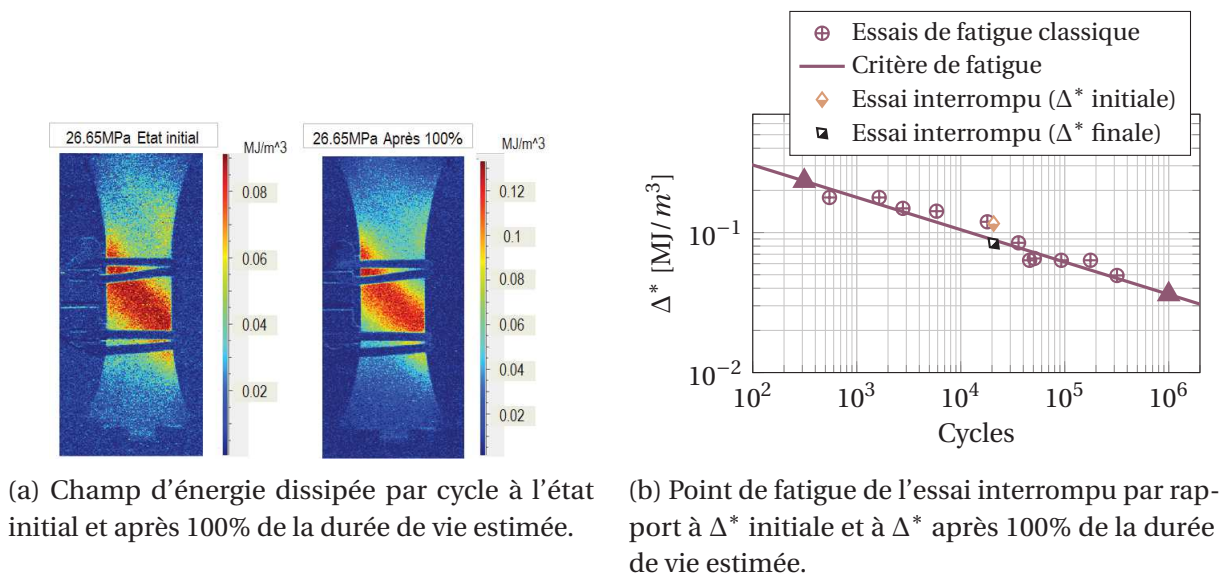


FIGURE 4.52 – Champ d'énergie dissipée par cycle et point de fatigue de l'essai interrompu. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

4.4.3 Enchaînement de blocs

Ce type d'essai est composé de plusieurs blocs de chargement ayant une amplitude de contrainte nominale différente. Dans le cadre de cette étude nous ne considérons que le cas avec deux blocs, où l'un des blocs a une amplitude de contrainte nominale très importante (durée de vie autour de 1000 cycles) et l'autre bloc a une amplitude de contrainte nominale beaucoup moins importante (durée de vie autour de 300000 cycles). L'objectif de ce type d'essai est, d'une part, de mesurer l'évolution de la courbe d'auto-échauffement après avoir soumis l'éprouvette à un certain pourcentage de la durée de vie du premier bloc de chargement. D'autre part, il permet de mesurer le changement des propriétés en fatigue sur le deuxième bloc de chargement dûs à l'application du premier bloc. Le protocole expérimental de ce type d'essai est illustré sur la figure 4.53. Un essai d'auto-échauffement est tout d'abord réalisé. Puis, le bloc ayant un haut niveau d'amplitude de contrainte nominale (appelé palier HA) est lancé jusqu'à un certain pourcentage de la durée de vie. L'essai est stoppé à zéro effort et dès que l'éprouvette retourne à l'équilibre thermique un nouvel essai d'auto-échauffement est réalisé. Finalement, l'éprouvette est soumise au bloc ayant un bas niveau d'amplitude de contrainte (appelé palier BA) jusqu'à la rupture.

L'amplitude de contrainte nominale choisie pour le palier HA est de 31.5MPa (durée de vie moyenne de 1350 cycles) et celle du palier BA est de 23MPa (durée de vie moyenne de 300000 cycles). Le nombre de cycles du palier HA est de 500 cycles (environ 40% de la durée de vie moyenne). La figure 4.54a montre la courbe d'auto-échauffement avant et après le palier HA. Par rapport à un essai d'auto-échauffement classique, cette courbe permet de voir la répétabilité de la réponse pour les éprouvettes à l'état initial, et l'augmentation de l'énergie dissipée par cycle après le palier HA. La figure 4.54b montre l'évolution des courbes d'auto-échauffement par rapport à un essai classique après le palier HA pour trois essais identiques. Cette figure montre que l'évolution de l'énergie dissipée par cycle peut varier en fonction de l'éprouvette, même si le

palier HA est identique pour toutes. Ce comportement est représentatif de la dispersion induite par les cycles de fatigue et nous supposons que l'endommagement entraîné par le palier HA n'est pas le même pour chacune des éprouvettes.

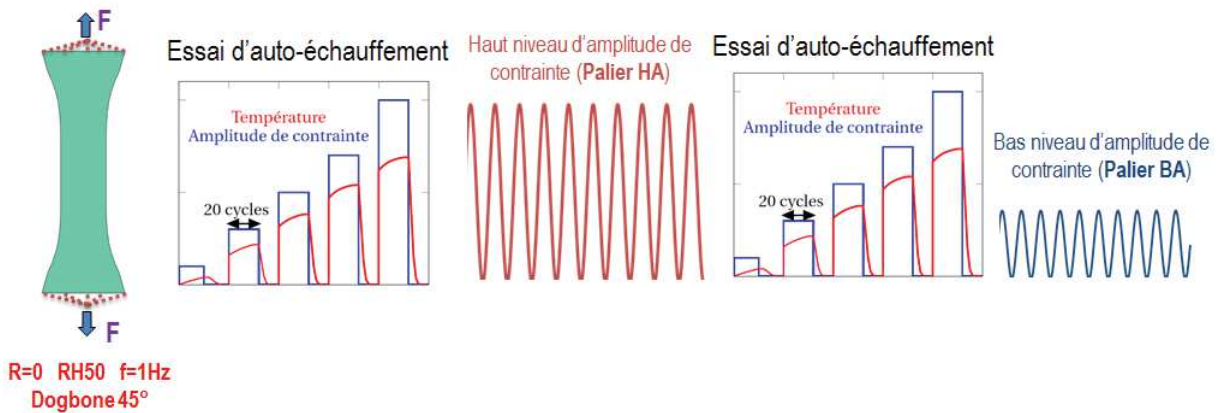


FIGURE 4.53 – Protocole expérimental des essais en deux blocs.

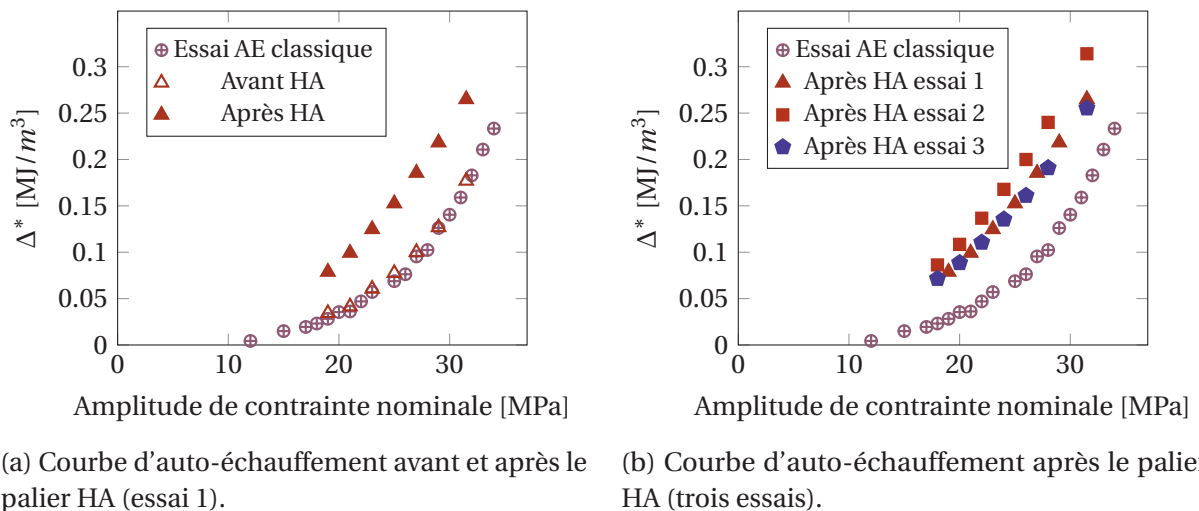
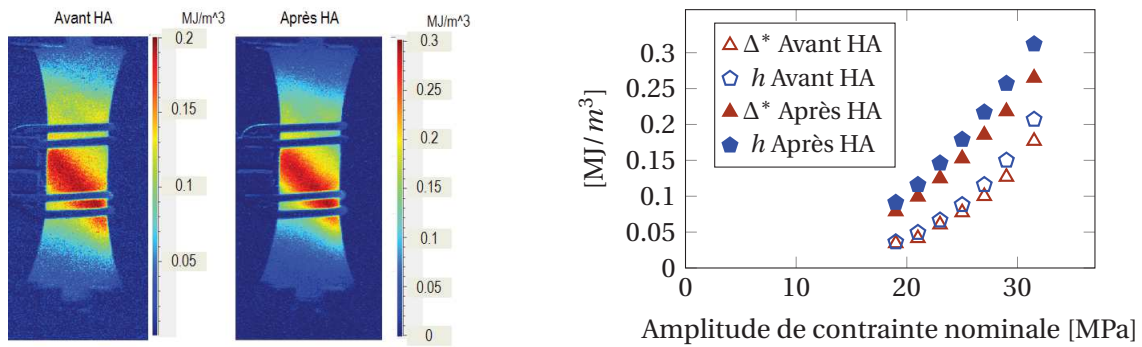


FIGURE 4.54 – Évolution de la courbe d'auto-échauffement lors des enchainements de blocs. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

La figure 4.55a montre que le champ d'énergie dissipée par cycle a la même allure avant et après le palier HA, donc l'augmentation de l'énergie dissipée par cycle semble être homogène. La correspondance entre l'aire de la boucle d'hystérèse et l'énergie dissipée par cycle avant et après le palier HA est illustré sur la figure 4.55b. Nous observons qu'il y a une bonne correspondance après le palier HA.

La figure 4.56 met en place l'ensemble des résultats sur la courbe de fatigue des éprouvettes Dogbone 45° en fonction de Δ^* . Nous pouvons voir la position du palier HA par rapport à sa durée de vie estimée. Nous pouvons aussi voir l'emplacement des points de fatigue du palier BA des trois éprouvettes considérées et leur comparaison par rapport à un essai de fatigue classique à la même amplitude de contrainte nominale. L'influence du palier HA en termes d'énergie dissipée par cycle et de durée de vie sur le palier BA est très claire. Deux remarques



(a) Champ d'énergie dissipée par cycle avant et après le palier HA. (b) Correspondance entre h et Δ^* (analyse globale) avant et après le palier HA.

FIGURE 4.55 – Champ d'énergie dissipée par cycle et correspondance entre h et Δ^* avant et après le palier HA. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

intéressantes peuvent être réalisées : par rapport aux paliers BA, si l'énergie dissipée par cycle est plus importante, la durée de vie sera plus courte, pour le même niveau de Δ^* les points de fatigue des paliers BA sont éloignés d'environ une décade à droite par rapport au critère de fatigue. Ces deux observations montrent que la dispersion en termes de fatigue des éprouvettes est captée par l'énergie dissipée par cycle et que le critère de fatigue énergétique capte la tendance et est conservatif par rapport aux points de fatigue des paliers BA.

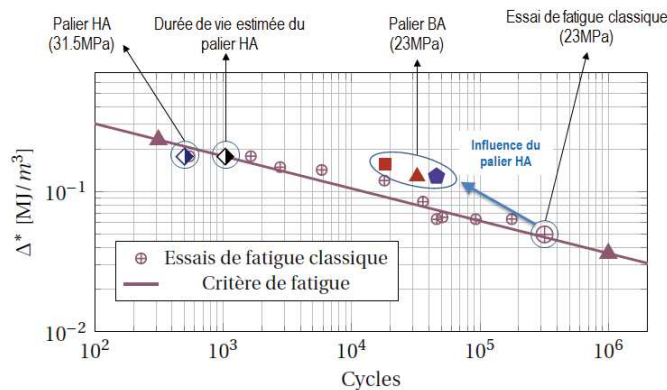


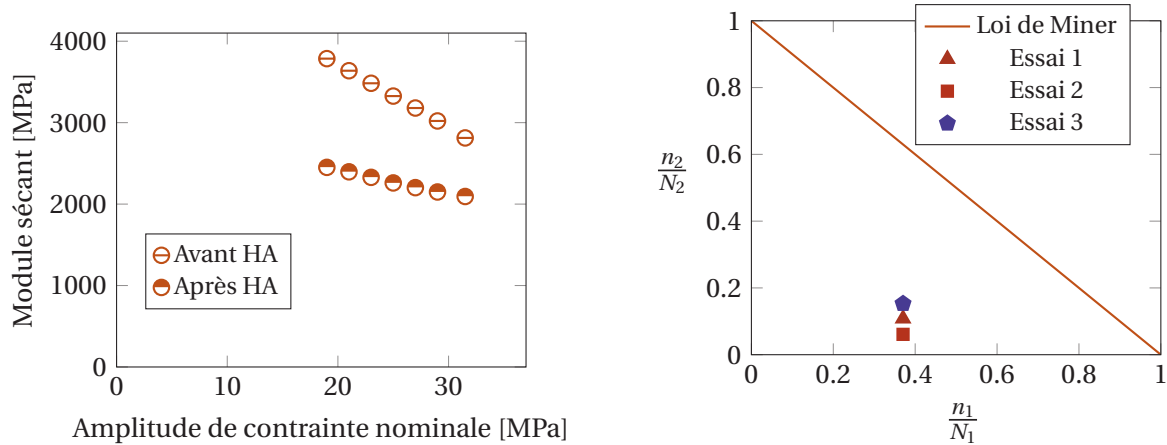
FIGURE 4.56 – Résultats en termes de fatigue en fonction de Δ^* pour les enchainements de blocs. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

La figure 4.57a montre l'évolution du module sécant avant et après le palier HA. Nous pouvons remarquer que la valeur du module sécant chute de façon importante après le palier HA et que la dépendance du module sécant à l'amplitude de contrainte nominale est moins marquée pour les points après le palier HA.

La figure 4.57b montre l'emplacement des essais réalisés par rapport à une loi de Miner classique, c'est-à-dire :

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \tag{4.3}$$

où n_i est le nombre de cycles auxquels l'éprouvette a été soumise pour un niveau d'amplitude de contrainte nominale σ_i pour laquelle la durée de vie moyenne est de N_i cycles. Dans les cas étudiés, $n_1=500$ cycles et $N_1=1350$ cycles (palier HA). $N_2=300000$ cycles et n_2 est le nombre de cycles à rupture du palier BA pour chaque éprouvette. Nous observons qu'il n'y a pas une bonne correspondance entre les essais et la loi de Miner classique (et que cette loi de cumul est non conservative).



(a) Évolution du module sécant avant et après le palier HA.

(b) Comparaisons des points de fatigue des paliers BA par rapport à la loi de Miner classique.

FIGURE 4.57 – Évolution du module sécant et comparaison par rapport à la loi de Miner classique des enchainements de blocs. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

4.4.4 Essais de fatigue après fluage

Ce type d'essai est réalisé en deux temps : tout d'abord les éprouvettes sont soumises à un palier de fluage (contrainte constante pendant un certain temps). Cette étape est réalisée par Solvay *engineering plastics*. Ensuite, les éprouvettes sont envoyées à l'ENSTA Bretagne, où des essais d'auto-échauffement suivis d'un palier de fatigue jusqu'à la rupture de l'éprouvette sont réalisés. Le protocole expérimental de ce type d'essai est illustré sur la figure 4.58. L'objectif de ces essais est d'étudier l'influence d'un palier de fluage sur la courbe d'auto-échauffement et sur les propriétés en fatigue des éprouvettes.

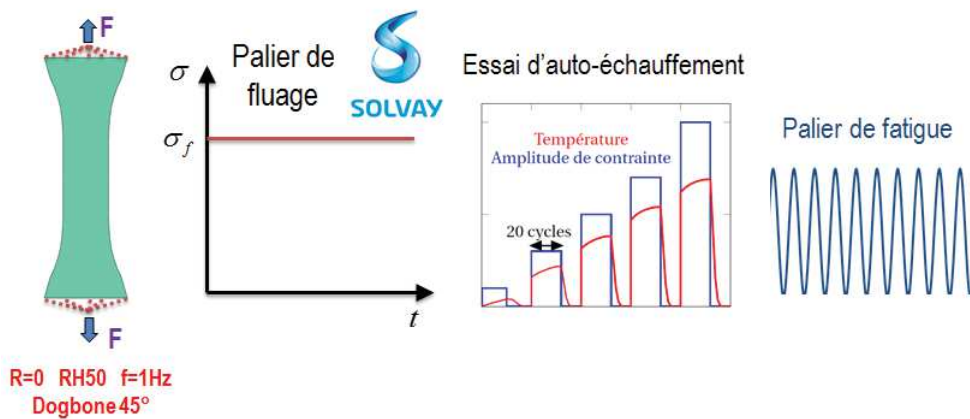
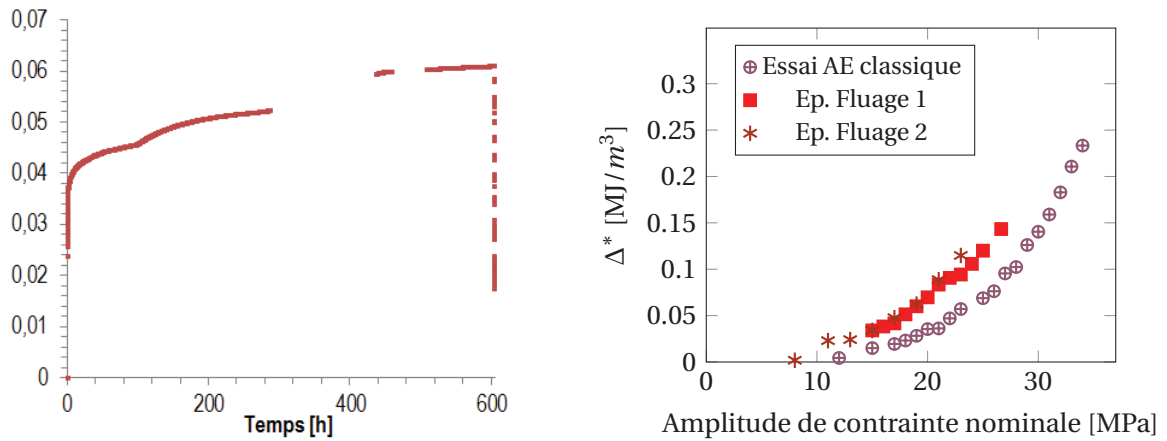


FIGURE 4.58 – Protocole expérimental des essais avec palier de fluage.

Deux éprouvettes ayant subi un palier de fluage ont été testées. La première a été soumise à une contrainte constante de 53.3MPa pendant trois semaines et la deuxième a été soumise à une contrainte constante de 54.2MPa pendant trois semaines. L'évolution de la déformation pendant le palier de fluage de la première éprouvette est montrée sur la figure 4.59a, cette déformation a été mesurée à l'aide d'une jauge de déformation collée dans la zone utile de l'éprouvette. Nous pouvons observer que la déformation augmente pendant tout le palier de fluage, la valeur maximale observée est d'environ 0.06. L'éprouvette est déchargée après environ 600h et une bonne partie de la déformation est recouverte très rapidement (en atteignant une valeur d'environ 0.015).

La figure 4.59b montre l'évolution des courbes d'auto-échauffement des éprouvettes ayant subi un palier de fluage par rapport à la courbe classique. Une augmentation de l'énergie dissipée par cycle est observée. Les courbes d'auto-échauffement des deux éprouvettes ayant subi un palier de fluage semblent être répétables, ce constat est un indicateur que l'endommagement dû au fluage pour chaque éprouvette est similaire. La figure 4.60 montre les résultats associés à la fatigue des éprouvettes ayant subi un palier de fluage (ep. fluage 1 et ep. fluage 2) par rapport au critère de fatigue et aux essais de fatigue classiques. Nous observons que l'éprouvette de fluage 1 testée avec une contrainte maximale nominale égale à la contrainte lors du palier du fluage ne présente pas une évolution remarquable en termes de durée de vie en fatigue par rapport à des essais de fatigue classique au même niveau de sollicitation (quatre essais de fatigue classiques ont été réalisés au même niveau d'amplitude de contrainte). L'éprouvette de fluage 2 a été testée avec une contrainte nominale maximale moins importante que celle du palier de fluage, nous observons une forte influence du palier de fluage par rapport à un essai de fatigue classique au même niveau de sollicitation. Comme dans le cas des enchaînements de blocs, le critère de fatigue énergétique est conservatif par rapport aux points de fatigue après le palier de fluage. Ces résultats montrent que l'influence de l'endommagement par fluage sur la durée de vie en fatigue sera importante pour les niveaux inférieurs à la contrainte de fluage. Mais lorsque la contrainte maximale de sollicitation cyclique est proche de la contrainte de fluage, l'influence semble moins marquée. Il faudrait réaliser une série d'essais avec palier de fluage pour vérifier si la dispersion des éprouvettes ayant un palier de fluage est similaire à celle des éprouvettes classiques.



(a) Déformation lors d'un palier de fluage.

(b) Courbes d'auto-échauffement des éprouvettes ayant un palier de fluage.

FIGURE 4.59 – Déformation lors d'un palier de fluage et courbes d'auto-échauffement des éprouvettes ayant un palier de fluage. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

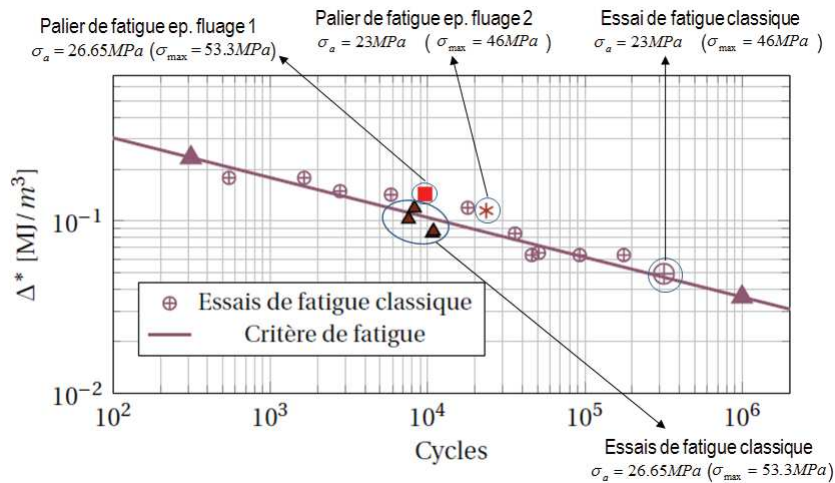
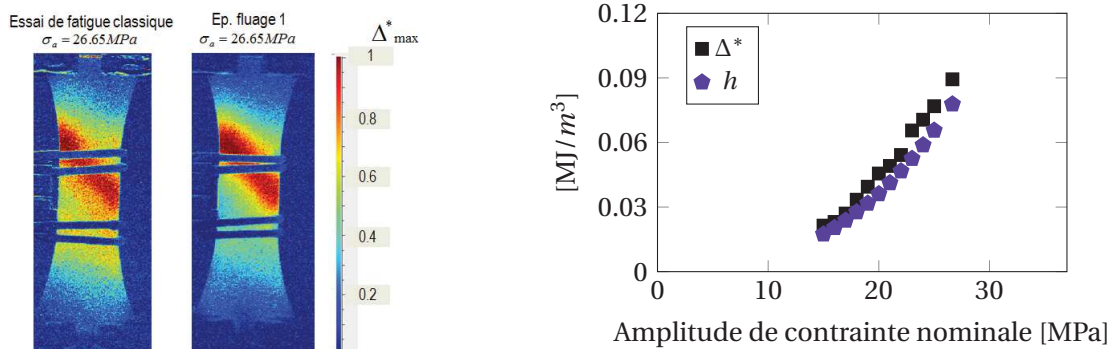


FIGURE 4.60 – Résultats en termes de fatigue en fonction de Δ^* pour les essais après fluage. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, f=1Hz, R=0 et température ambiante.

Une autre observation intéressante sur les éprouvettes ayant subi un palier de fluage est l'évolution du champ d'énergie dissipée par cycle par rapport à une éprouvette de fatigue classique. La figure 4.61a montre le champ d'énergie dissipée par cycle de l'éprouvette fluage 1 et celui d'une éprouvette de fatigue classique au même niveau d'amplitude de contrainte nominale. Les champs ont été normalisés par rapport à la valeur maximale de Δ^* mesurée sur chacune des éprouvettes. Nous remarquons que la distribution de Δ^* est plus « localisée » dans le cas de l'éprouvette « fluage 1 ». Il semble ainsi que l'endommagement est plus localisé dans le cas d'un palier de fluage par rapport à l'endommagement produit par un chargement de fatigue. La correspondance entre l'aire de la boucle d'hystérèse et l'énergie dissipée par cycle pour l'éprouvette fluage 1 est illustrée sur la figure 4.61b. Nous observons qu'il y a une bonne correspondance entre les évolutions de h et Δ^* .



(a) Allure du champ d'énergie dissipée par cycle de l'éprouvette fluage 1 et d'une éprouvette de fatigue classique au même niveau de contrainte nominale.

(b) Correspondance entre h et Δ^* (analyse globale) pour l'éprouvette fluage 1.

FIGURE 4.61 – Champ d'énergie dissipée par cycle et correspondance entre h et Δ^* des éprouvettes ayant subi un palier de fluage. Éprouvettes Dogbone 45°, RH50, $f=1\text{Hz}$, $R=0$ et température ambiante.

4.4.5 Bilan

Les observations les plus importantes sur les chargements mécaniques complexes sont :

Variation du rapport de charge

- la courbe d'auto-échauffement dépend de manière logique du rapport de charge ;
- les paramètres du critère de fatigue énergétique semblent être constants pour les trois rapports de charge positifs considérés ;
- les essais de fatigue réalisés à Solvay *engineering plastics* ($f=3\text{Hz}$, $R=0.1$ et convection forcée) ont une durée de vie plus importante pour le même niveau contrainte maximale que les essais réalisés à l'ENSTA Bretagne ($f=1\text{Hz}$, $R=0.1$ et convection naturelle). Ceci pourrait être lié au fait que le fluage est plus important lorsque la fréquence diminue ;
- pour le rapport de charge $R=-1$ une bonne correspondance entre l'aire de la boucle d'hystérèse et l'énergie dissipée par cycle a également été observée ;
- les paramètres du critère de fatigue énergétique évoluent fortement entre un rapport de charge $R=0$ et $R=-1$;
- l'évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse pendant les essais de fatigue a un comportement similaire pour les rapports de charge $R=0$ et $R=-1$.

Essais de fatigue interrompus

La question était ici de valider si l'utilisation de l'énergie dissipée par cycle évaluée sur quelques cycles initiaux du palier de chargement pouvait être représentative de l'énergie dissipée tout au long de l'essai de fatigue. Pour répondre à cette question, nous avons réalisé des essais de

fatigue interrompus et mesuré les courbes d'auto-échauffement et l'aire de la boucle d'hystérèse pour différents nombres de cycles, correspondant à différents pourcentages de la durée de vie attendue.

- la première conclusion est que les évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse et de l'énergie dissipée par cycle sont bien corrélées sur les essais d'auto-échauffement effectués lors des interruptions de l'essai de fatigue. Il semble donc que la corrélation entre ces deux valeurs ne soit pas impactée de manière sensible par une variable d'histoire de fatigue (plasticité, endommagement). Comme l'aire de la boucle d'hystérèse stabilise lors des essais de fatigue continus, cela paraît indiquer que l'énergie dissipée par cycle stabilise également lors des essais de fatigue continus ;
- par ailleurs, l'évolution constatée sur la valeur de l'énergie dissipée par cycle entre la valeur initiale et celle stabilisée, que ce soit pour des essais continus ou interrompus, n'impacte pas de manière importante la pertinence du critère de fatigue identifié et il ne semble donc pas nécessaire, en première approximation, de décrire l'évolution de l'énergie dissipée par cycle lors de l'essai de fatigue. Il nous semble donc qu'une évaluation initiale de l'énergie dissipée par cycle est pertinente ;
- nous observons également des différences intéressantes entre les essais de fatigue interrompus et les essais continus. Nous constatons tout d'abord une augmentation sensible de la durée de vie pour l'essai de fatigue interrompu (facteur 2) par rapport à la prédiction obtenue pour un essai de fatigue continu. D'autre part, les cinétiques d'évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse observées pour des essais de fatigue continus ou interrompus ne semblent pas être identiques. En effet, dans le cas des essais de fatigue continus (menant à une durée de vie égale ou supérieure à 10^4 cycles), la stabilisation s'effectue en moins de 10% de la durée de vie. Pour l'essai interrompu considéré, cette stabilisation s'opère beaucoup plus progressivement, après environ 25% de la durée de vie effectivement observée (50% de la durée de vie prédite pour un essai continu). Il semble donc que les paliers de recouvrement aient un rôle bénéfique sur la durée de vie en retardant l'atteinte d'un état de dissipation stabilisé. Cette conclusion reste clairement à étoffer au travers d'une campagne expérimentale plus large.

Enchaînement de blocs

- après le palier HA les éprouvettes présentent une augmentation importante de l'énergie dissipée par cycle (pour le même niveau de σ_a) ;
- la durée de vie du palier BA est très réduite par rapport à un essai de fatigue classique au même niveau de σ_a ;
- l'énergie dissipée par cycle après le palier HA est inversement proportionnelle à la durée de vie du palier BA ;
- le critère de fatigue est conservatif par rapport aux points de fatigue des paliers BA.
- l'approche par loi de Miner donne des résultats non conservatifs.

Essais de fatigue après fluage

- après le palier de fluage les éprouvettes présentent une augmentation importante de l'énergie dissipée par cycle (pour le même niveau de σ_a) ;
- lorsque la valeur maximale de la contrainte cyclique est égale à la contrainte du palier de fluage, il semble avoir peu d'influence du palier de fluage sur la durée de vie en fatigue. Ceci semble montrer que l'endommagement causé par le chargement cyclique est prépondérant par rapport à celui causé par le chargement statique ;
- lorsque la valeur maximale de la contrainte cyclique est moins importante que la contrainte du palier de fluage, l'influence du palier de fluage est visible ;
- les points de fatigue après le palier de fluage sont bien corrélés au critère de fatigue énergétique.

4.5 Chargements mécaniques simples pour différentes conditions thermo-hygrométriques (température et teneur en humidité)

4.5.1 Dispositif expérimental

Ce type d'essais est réalisé dans l'enceinte thermo-hygrométrique pour maîtriser la température et l'humidité relative des éprouvettes. Le dispositif expérimental est montré sur la figure 4.62. Pour pouvoir mesurer la température de l'éprouvette à l'intérieur de l'enceinte, une vitre avec une transmittance très élevée est utilisée, de façon que le rayonnement émis par l'éprouvette arrive aux capteurs de la caméra en limitant au maximum les pertes dues à l'absorption et aux réflexions de la vitre. Tel que montré sur la figure 4.62, la caméra est inclinée par rapport à la vitre, cette configuration est nécessaire pour éviter l'effet Narcisse lors des mesures infrarouges. L'effet Narcisse apparaît lorsque l'objectif de la caméra est parallèle à la vitre. A cause des réflexions dans la vitre, la caméra mesure la température de son propre capteur reflété dans la vitre. Le protocole expérimental pour l'obtention de la courbe d'auto-échauffement est inchangé. Il faut remarquer que pour les essais réalisés avec la vitre, la calibration constructeur pour la caméra infrarouge est utilisée parce que la calibration pixel-à-pixel n'a pas été identifiée pour des mesures avec la vitre.

4.5. Chargements mécaniques simples pour différentes conditions thermo-hygrométriques (température et teneur en humidité)

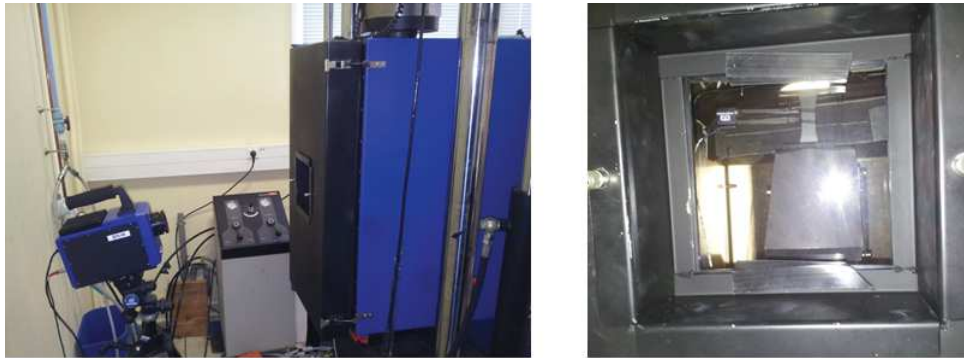
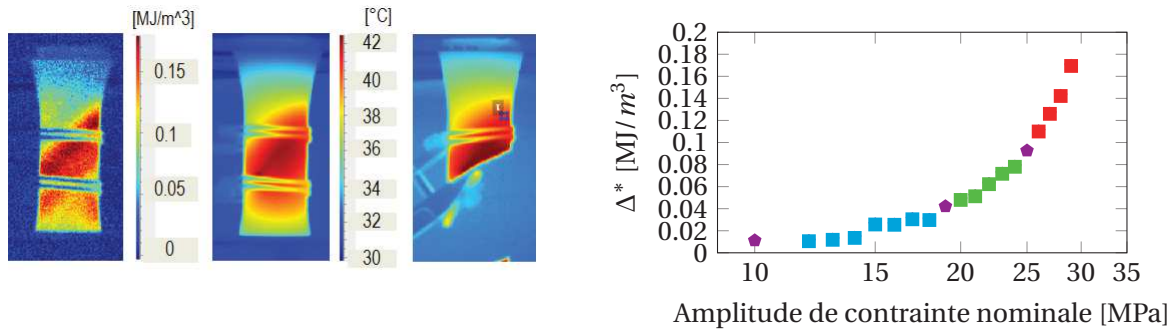


FIGURE 4.62 – Dispositif expérimental des essais avec température et humidité contrôlées.

4.5.2 Résultats

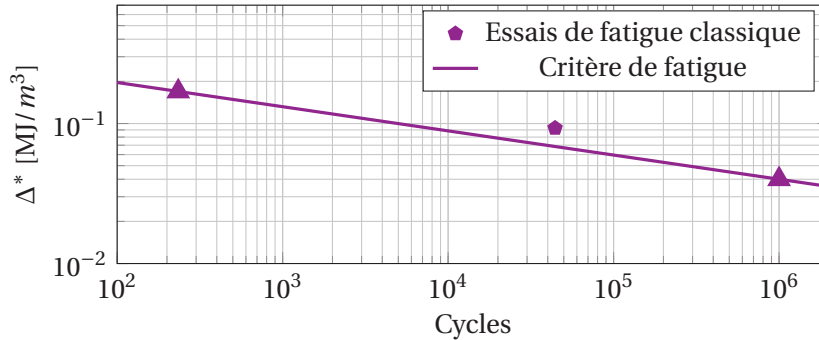
Pour l'identification du critère de fatigue, deux conditions thermo-hygrométriques ont été considérées. La première utilise des éprouvettes Dogbone 45° ayant une teneur en humidité de RH80 et testées à température ambiante. La deuxième utilise des éprouvettes Dogbone 45° ayant une teneur en humidité de RH50 et testées à une température de 60°C. Les données relatives à l'identification du critère de fatigue sont montrées sur les figures 4.63 et 4.64. Il n'y a qu'un seul point de fatigue pour chaque condition thermo-hygrométrique. Dans les deux cas le point est proche du critère de fatigue. Comme les éprouvettes Dogbone 45° RH80 ont été testées à température ambiante, la vitre n'a pas été utilisée pour l'essai d'auto-échauffement. C'est pourquoi les champs mesurés sur ce cas d'éprouvettes sont plus nets par rapport à ceux des éprouvettes Dogbone RH50 testées à 60°C (le champ devient un peu flou à cause de la vitre). La figure 4.65 montre, d'une part, les comparaisons des courbes d'auto-échauffement de toutes les conditions thermo-hygrométriques des éprouvettes Dogbone 45° à R=0 et, d'autre part, les comparaisons des critères de fatigue et des points de fatigue de chacune des conditions. Nous pouvons observer que pour les éprouvettes RH50 à température ambiante ou à 60°C, les courbes d'auto-échauffement sont très proches. Pour les éprouvettes RH80 à température ambiante, la courbe d'auto-échauffement est légèrement décalée vers le haut.

Comme l'illustre la figure 4.65b, le critère identifié pour RH50 à 60°C et RH80 à température ambiante sont très proches et celui identifié pour RH50 à température ambiante est légèrement décalé vers le haut. Un essai de fatigue réalisé à 80°C et RH50 est également présenté (le critère de fatigue n'a pas été identifiée pour ces conditions thermo-hygrométriques). Pour mieux comprendre ces résultats, il faut déterminer l'écart à la T_g de chaque condition. Le but est de savoir si l'équivalence en terme de fatigue observée est traduite par un écart à la T_g similaire (cf. §1.4.4). D'après la figure 1.23a, nous pouvons déterminer que pour le cas RH50 la température de transition vitreuse est autour de 20°C et pour le cas RH80 celle-ci est autour de -10°C. L'écart à la température de transition vitreuse ($T - T_g$) des éprouvettes RH50 à température ambiante est donc autour de 5°C. Pour les éprouvettes RH80 à température ambiante, il est autour de 35°C, pour les éprouvettes RH50 à une température de 60°C, il est autour de 40°C et pour l'éprouvette RH50 à une température de 80°C, il est autour de 60°C. Pour mieux apprécier l'écart à la température transition vitreuse pour chacune des conditions thermo-hygrométriques, la figure 4.66 montre l'évolution de la T_g en fonction de la teneur en humidité en parallèle des points correspondants à chacune des conditions thermo-hygrométriques.



(a) Champ d'énergie dissipée par cycle, point chaud et rupture ($\sigma_a=29\text{MPa}$).

(b) Régimes observés (les marqueurs décrivent les régimes).



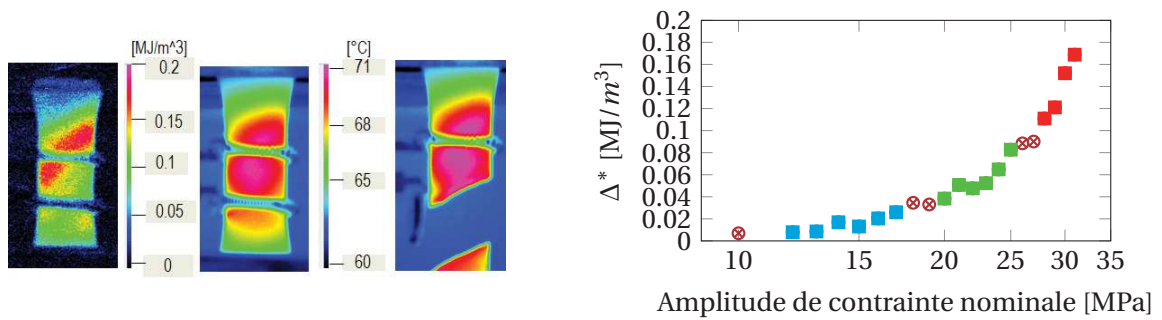
(c) Courbe de Wöhler en fonction de Δ^* .

FIGURE 4.63 – Identification du critère de fatigue à température ambiante et RH80. Éprouvettes Dogbone 45°, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$.

Nous pouvons voir ainsi que l'équivalence ($T - T_g$) semble expliquer les résultats observés en termes de fatigue puisque le seul cas qui est légèrement décalé (RH50 à température ambiante) est aussi le cas qui a un écart à la T_g différent (cf. Fig.4.65a). Par ailleurs, le critère de fatigue énergétique est raisonnablement unifié pour toutes les conditions thermo-hygrométriques considérées (cf. Fig.4.65b).

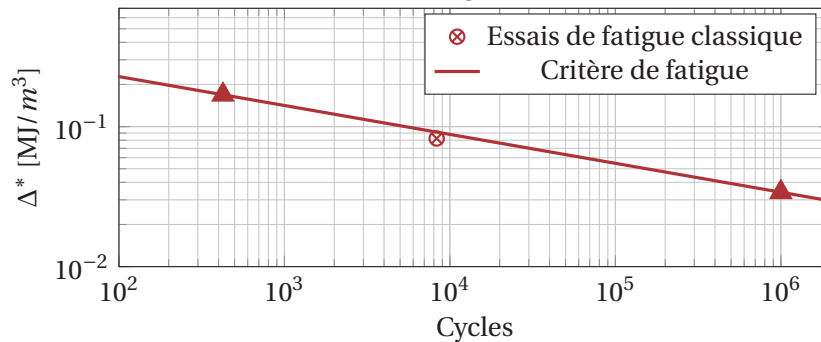
La figure 4.67a montre la comparaison de la mesure de l'énergie dissipée par cycle dans des conditions thermo-hygrométriques similaires, mais avec et sans la vitre. Cette figure montre que l'influence de la vitre est négligeable dans la mesure de l'énergie dissipée par cycle. La figure 4.67b montre la comparaison entre le cas de RH50 à température ambiante avec quelques paliers réalisés pour le cas RH50 à 80°C. Nous pouvons observer que l'augmentation de l'énergie dissipée n'est pas très importante (autour de 35%) même si la différence des écarts à la T_g des deux conditions est de l'ordre de 55°C.

4.5. Chargements mécaniques simples pour différentes conditions thermo-hygrométriques (température et teneur en humidité)



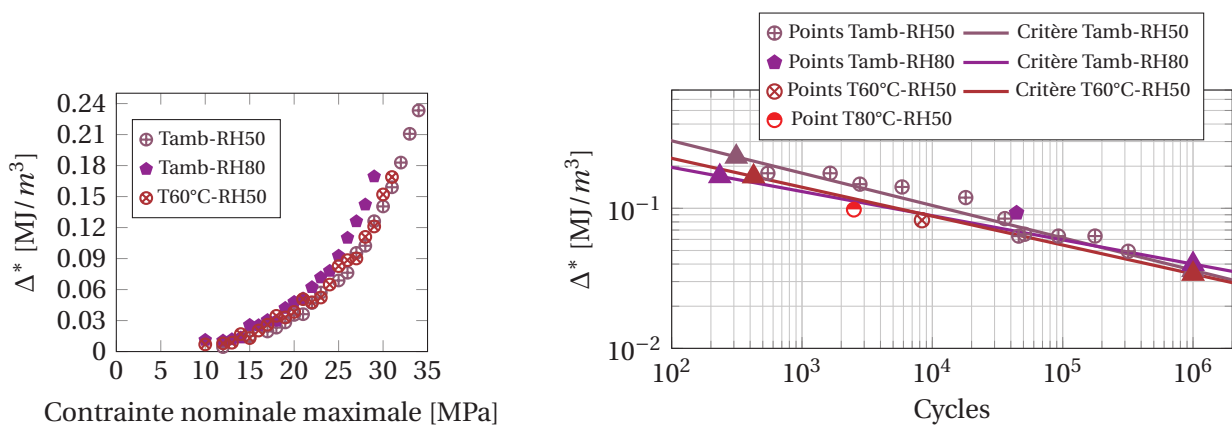
(a) Champ d'énergie dissipée par cycle, point chaud et rupture ($\sigma_a=31\text{MPa}$).

(b) Régimes observés (les marqueurs décrivent les régimes).



(c) RH50.

FIGURE 4.64 – Identification du critère de fatigue à 60°C et RH50. Éprouvettes Dogbone 45°, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$.



(a) Comparaisons des courbes d'auto-échauffement de toutes les conditions thermo-hygrométriques considérées.

(b) Critères de fatigue et points de fatigue de chacune des conditions.

FIGURE 4.65 – Courbes d'auto-échauffement et critère de fatigue de toutes les conditions thermo hygrométriques considérées. Dogbone 45°, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$.

4.5.3 Bilan

Les observations les plus importantes sur les chargements mécaniques simples pour différents couples thermo-hygrométriques sont :

- Les points de fatigue sont proches du critère de fatigue pour chacune des conditions

thermo-hygrométriques étudiées ;

- le critère de fatigue semble être unifié pour les conditions thermo-hygrométriques étudiées. L'ensemble de ces conditions correspondent à un écart $T - T_g > 0$.

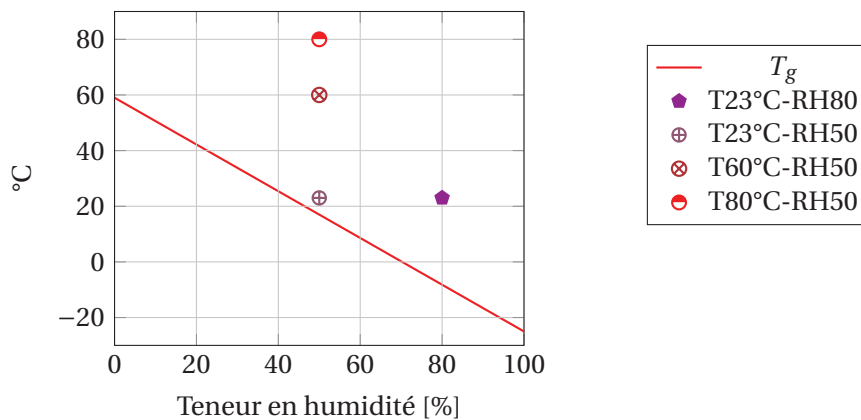
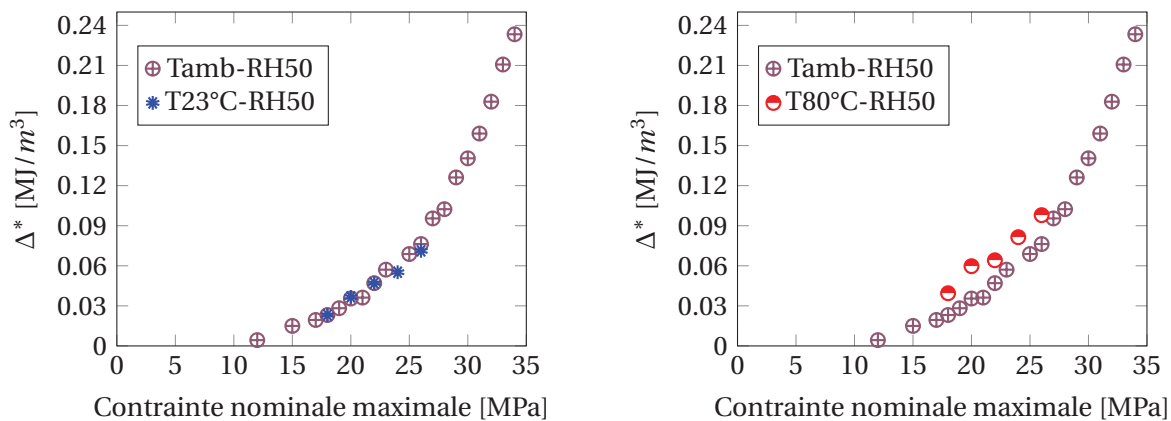


FIGURE 4.66 – Conditions thermo-hygrométriques considérées par rapport à la T_g .



(a) Comparaison du calcul de l'énergie dissipée par cycle dans des conditions thermo-hygrométriques similaires avec et sans la vitre.

(b) Comparaison entre le cas de RH50 à température ambiante et celui de RH50 à 80°C.

FIGURE 4.67 – Influence de la vitre dans le calcul de l'énergie dissipée par cycle et comparaison avec le cas de RH50 à 80°C. Éprouvettes Dogbone 45°, $f=1\text{Hz}$ et $R=0$.

4.6 Bilan pour les éprouvettes simples

L'ensemble des résultats montrés sur les éprouvettes simples nous permet de comparer les influences des différents facteurs en termes de microstructure, rapport de charge, histoire de chargement et conditions thermo-hygrométriques par rapport au critère de fatigue énergétique utilisé. Ainsi, nous pouvons tirer les conclusions suivantes.

1- Tout d'abord, en ce qui concerne le comportement thermomécanique des éprouvettes :

- il y a une bonne correspondance entre l'énergie dissipée par cycle et l'aire de la boucle d'hystérèse. Ceci a été constaté pour les éprouvettes Dogbone pour toutes les orientations à $R=0$

et $R=-1$. La correspondance a également été vérifiée pour les éprouvettes ayant une histoire de chargement.

- si l'orientation des fibres est à 45° , il y a une composante de l'énergie dissipée liée au cisaillement qui n'est pas associée à la fatigue. La dissipation des éprouvettes Dogbone est proche de celle de leur couche la plus raide (peau ou cœur) pour le même niveau d'amplitude de contrainte nominale. Ceci montre que l'énergie dissipée par cycle mesurée sur les éprouvettes Dogbone est représentative de la couche qui pilote le comportement en fatigue.

- nous observons un classement logique de la dissipation vis-à-vis du module sécant pour ces essais pilotés en amplitude d'effort. Une perspective à court terme (non menée ici faute de temps), serait d'investiguer l'évolution du ratio entre énergie dissipée et énergie élastique « sécante ».

- l'évolution de la courbe d'auto-échauffement en fonction du conditionnement des éprouvettes reste très limitée pour les conditions testées (ici, $T - T_g > 0$).

2- Par rapport à la démarche de prédiction rapide des propriétés en fatigue :

L'identification du critère de fatigue peut être réalisée dans une journée d'essais. L'identification empirique mise en place de la limite d'endurance à 10^6 cycles semble valide pour les cas considérées. Même si le palier mené jusqu'à la rupture utilisé pour l'identification du critère présente une durée de vie très courte (de l'ordre des centaines de cycles), le critère est bien corrélé aux essais de fatigue ayant une durée de vie plus importante. Les variations de l'énergie dissipée par cycle au cours de la durée de vie sont négligeables vis-à-vis du critère de fatigue. Les chargements mécaniques complexes nous ont également permis de voir tout d'abord que l'évolution de l'énergie dissipée pendant un essai de fatigue à des durées de vie courtes est négligeable par rapport au critère de fatigue.

3- Le critère de fatigue utilisé est raisonnablement unifié lorsque :

- l'orientation des fibres est longitudinale ou transversale par rapport à la direction de chargement.

- le rapport de charge reste positif (cas $R=0, 0.1, 0.3$ testés) ;

- les conditions d'environnement (et de conditionnement ici) correspondent à un écart ($T - T_g > 0$). Les conditions en dessous de la T_g seront abordées dans le chapitre suivant sur les éprouvettes de structure.

4- Le critère de fatigue donne des résultats conservatifs (de 1/2 à 1 décade) lorsque :

- le rapport de charge est de -1 ;

- l'orientation moyenne est de 45° (éprouvettes Dogbone ou amincies) ;

- l'histoire du chargement est complexe (intégration de pauses, succession de blocs, enchaînement de fluage puis de fatigue) ;

Pour ces 3 cas, induisant respectivement de la compression, du cisaillement ou un paramètre

d'histoire (qui reste à déterminer), la relation entre l'énergie dissipée et la durée de vie en fatigue est différente. La compréhension de ces aspects, via des mesures microstructurales et l'analyse par un modèle de comportement *ad hoc*, constitue une perspective majeure de cette étude.

5- La localisation (occasionnelle ou systématique) de la rupture en dehors de la zone mesurée par extensométrie et/ou l'apparition de bandes de localisation de la dissipation, n'a pas permis une investigation poussée d'autres critères de ruine (chute de raideur ou plasticité cumulée).

6- L'histoire du chargement, observée pour des essais de fatigue interrompus, des enchaînements de blocs cycliques et des essais combinant une étape de fluage suivie d'un chargement cyclique, conduit à une modification de l'énergie dissipée et de la durée de vie. Les évolutions de l'énergie dissipée et de la durée de vie observées pour ces éprouvettes montrent clairement la même tendance et la dispersion entre éprouvettes est bien captée. Néanmoins, le critère identifié et validé pour des chargements cycliques simples sous-estime la durée de vie de 1/2 à 1 décade. Comme évoqué plus haut, le critère énergétique identifié pour un chargement cyclique mono-niveau est conservatif, au contraire d'une approche de type Miner. La différence constatée reste à expliquer car si l'évolution du module sécant explique correctement cette tendance (diminution du module sécant donc augmentation de l'énergie élastique pour ces essais pilotés en effort), les causes mécaniques (endommagement, visco-élasticité, plasticité) restent à identifier.