

Analyse sur éprouvettes de structures

Sommaire

5.1 Schéma de présentation des résultats	153
5.1.1 Rappel de la géométrie des éprouvettes	154
5.1.2 Données associées au comportement	154
5.1.3 Données associées à la ruine	155
5.2 Détermination du champ de couplage thermoélastique	155
5.3 Éprouvettes Wavy 1	156
5.3.1 Résultats des essais réalisés à température ambiante, R=0 et RH50.	158
5.3.2 Résultats des essais réalisés à température ambiante, R=0 et DAM.	165
5.3.3 Bilan sur les éprouvettes Wavy 1	171
5.4 Éprouvettes Wavy 2	173
5.4.1 Résultats des essais réalisés à température ambiante, R=0 et RH50.	173
5.4.2 Résultats des essais réalisés à température ambiante, R=0 et DAM.	179
5.4.3 Bilan sur les éprouvettes Wavy 2	183
5.5 Eprouvettes T-Bone 1A et 1B	186
5.5.1 Résultats des essais réalisés en traction cyclique à température ambiante, R=0 et RH50	186
5.5.2 Résultats des essais réalisés en flexion cyclique à température ambiante, R=0 et RH50	201
5.5.3 Bilan des éprouvettes T-Bone 1A et 1B	209
5.6 Bilan pour les éprouvettes de structure	214

5.1 Schéma de présentation des résultats

Comme dans le chapitre précédent, les résultats obtenus sur les éprouvettes de structure seront toujours séparés en deux parties, ceux associés au comportement et ceux associés à la ruine par fatigue.

5.1.1 Rappel de la géométrie des éprouvettes

Une présentation approfondie de la géométrie et de l'injection des éprouvettes de structure est disponible dans le chapitre 3. La figure 5.1 rappelle la géométrie et la position du seuil d'injection des éprouvettes de structure utilisées.

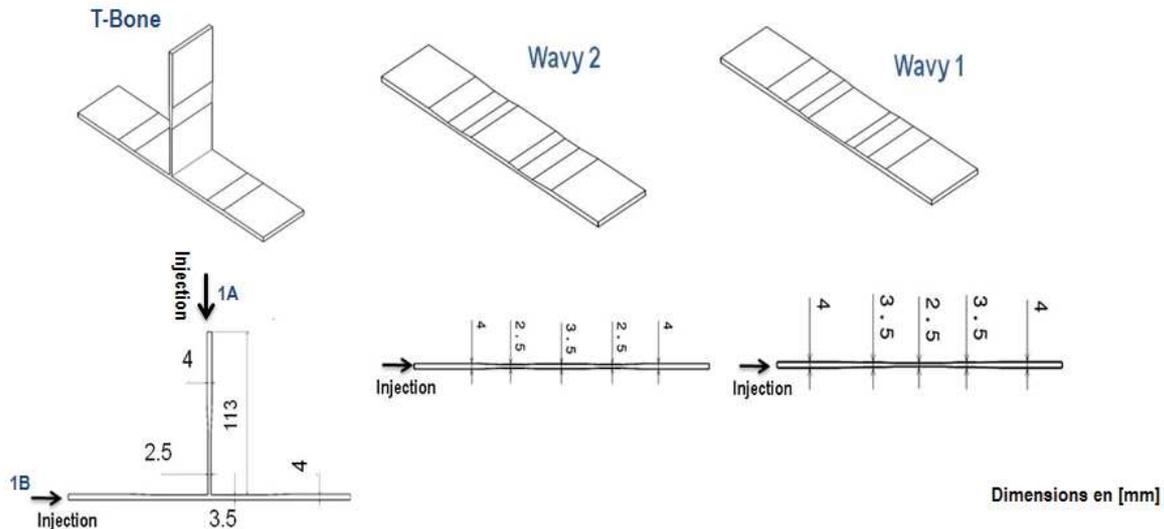


FIGURE 5.1 – Rappel des géométries et de la façon d’injecter les éprouvettes de structure (pour les T-Bone, l’injection se fait soit par l’emplacement 1A, soit par l’emplacement 1B).

5.1.2 Données associées au comportement

La façon de présenter les données pour les éprouvettes de structure sera similaire à celle utilisée pour les éprouvettes Dogbone. Chaque éprouvette de structure sera présentée séparément. Les données associées au comportement peuvent être mécaniques ou thermiques.

- **Données mécaniques**

Pour le cas des éprouvettes de structure, l’aire de la boucle d’hystérèse (notée h), le module sécant (noté E_s) et la déformation résiduelle (notée ε_r) seront présentés d’une façon similaire à celle des éprouvettes Dogbone. Il faut remarquer qu’étant donné la complexité de ce type d’éprouvettes, ces données mécaniques seront purement des moyennes. Nous parlerons plutôt de l’aire de la boucle d’hystérèse moyenne locale (h_{ml}) et du module sécant local apparent E_{sla} , car la contrainte est moyennée sur une section hétérogène en terme d’orientation de fibre et la déformation est mesurée de façon moyenne avec l’extensomètre. Nous montrerons aussi la cartographie de déformation obtenue grâce aux mesures de stéréo-corrélation d’images.

- **Données thermiques**

L’énergie dissipée par cycle (noté Δ^*) est la donnée thermique principale étudiée. Celle-ci sera présentée en fonction de l’amplitude d’effort¹ F_a (courbe d’auto-échauffement). Pour les éprouvettes de structure, Δ^* sera toujours calculée selon une approche considérant un état transitoire, car le champ d’énergie dissipée par cycle sera toujours hétérogène.

¹Définie comme l’effort maximum moins l’effort minimum divisé par 2.

5.1.3 Données associées à la ruine

Pour le cas des éprouvettes de structure, les courbes de Wöhler en fonction de Δ^* seront aussi présentées en retenant l'analyse locale évoquée pour le cas des éprouvettes Dogbone, c'est-à-dire, l'énergie dissipée par cycle, calculée au niveau de la zone de rupture (point chaud). Le choix des régimes dans la courbe présentant l'énergie dissipée par cycle en fonction du chargement et les points utilisés pour l'identification du critère de fatigue seront toujours spécifiés. Finalement, les faciès de rupture seront présentés dans le but d'étudier les différents modes de rupture observés et leur relation avec la zone d'initiation déduite des mesures thermiques (point chaud).

5.2 Détermination du champ de couplage thermoélastique

Comme les éprouvettes de structure présentent des états d'orientation complexes mais également des gradients mécaniques engendrés par des accidents géométriques, il est important de proposer des analyses permettant d'étudier ces hétérogénéités. Le champ d'énergie dissipée par cycle obtenu à l'aide de la méthode décrite dans le chapitre 4 est le premier protocole d'analyse permettant de mesurer les hétérogénéités des éprouvettes, celui-ci donne une idée de la dissipation locale. Le deuxième protocole d'analyse est la mesure du champ de déplacement obtenu par stéréo-corrélation d'images (dispositif expérimental présenté dans le chapitre 3). Celui-ci donne accès à la déformation surfacique locale. Pour enrichir la compréhension des hétérogénéités nous proposons également un protocole d'analyse permettant d'estimer le champ de contraintes. Celui-ci est basé sur l'estimation du champ de couplage thermoélastique, lequel est directement proportionnel à la variation de la trace du tenseur des contraintes. La figure 5.2a illustre la variation de température d'un échantillon (moyennée sur sa zone utile par exemple) soumis à un effort sinusoïdal. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 2, la composante oscillatoire du signal de température décrit le couplage thermoélastique. Pour mesurer le couplage thermoélastique il faut donc déterminer la température maximale (correspondant à l'effort minimal) et la température minimale (correspondant à l'effort maximal) de chaque cycle de chargement. Cependant, si la fréquence d'acquisition de la caméra infrarouge est moins importante que la fréquence de chargement, il n'est pas possible d'avoir accès au couplage thermoélastique pour chaque cycle de chargement. Par contre, si nous considérons que la fréquence de chargement est plus importante que la fréquence d'acquisition de la caméra et dans le cas où le rapport entre les deux n'est pas un nombre entier, nous pouvons obtenir le couplage thermoélastique sur plusieurs cycles par effet stroboscopique. La figure 5.2b illustre le signal de température mesuré avec une fréquence d'acquisition de 0.7 images par seconde (soit une image toutes les 1.43s) par rapport à une fréquence de chargement de 1Hz. Nous pouvons observer que le couplage thermoélastique peut être déterminé sur environ 9 cycles de chargement. Pour estimer le champ de couplage thermoélastique, il faut donc déterminer les images correspondants à la position d'effort minimal et maximal sur 9 cycles de chargement, tel qu'illustré sur la figure 5.2c. La différence entre les deux images donne accès au champ de couplage thermoélastique. Deux remarques importantes doivent être faites sur cette approche :

- les images utilisées pour obtenir le champ de couplage thermoélastique ne sont pas rigoureusement dans la même configuration mécanique, donc il y aura toujours une

erreur liée aux positions différentes des points matériels entre les images. Mais, si les déplacements sont suffisamment faibles vis-à-vis des gradients décrits sur la zone d'étude, cette erreur peut être négligée. Les déplacements varient en fonction des éprouvettes et des niveaux de chargement mécanique (pouvant arriver à environ 3mm) ;

- la moyenne temporelle cyclique de la température est en général différente de zéro, ceci est illustrée sur la figure 5.2 par le fait que la moyenne temporelle cyclique de la température est croissante. Ceci entraîne une erreur supplémentaire due au fait que les images utilisées pour l'estimation du champ de couplage thermoélastique ont une composante liée à l'augmentation moyenne de la température. Pour limiter cette erreur dans la suite, le champ de couplage thermoélastique sera calculé lorsque la moyenne temporelle cyclique de la température arrive à un état stabilisé (cf. §2.1.3).

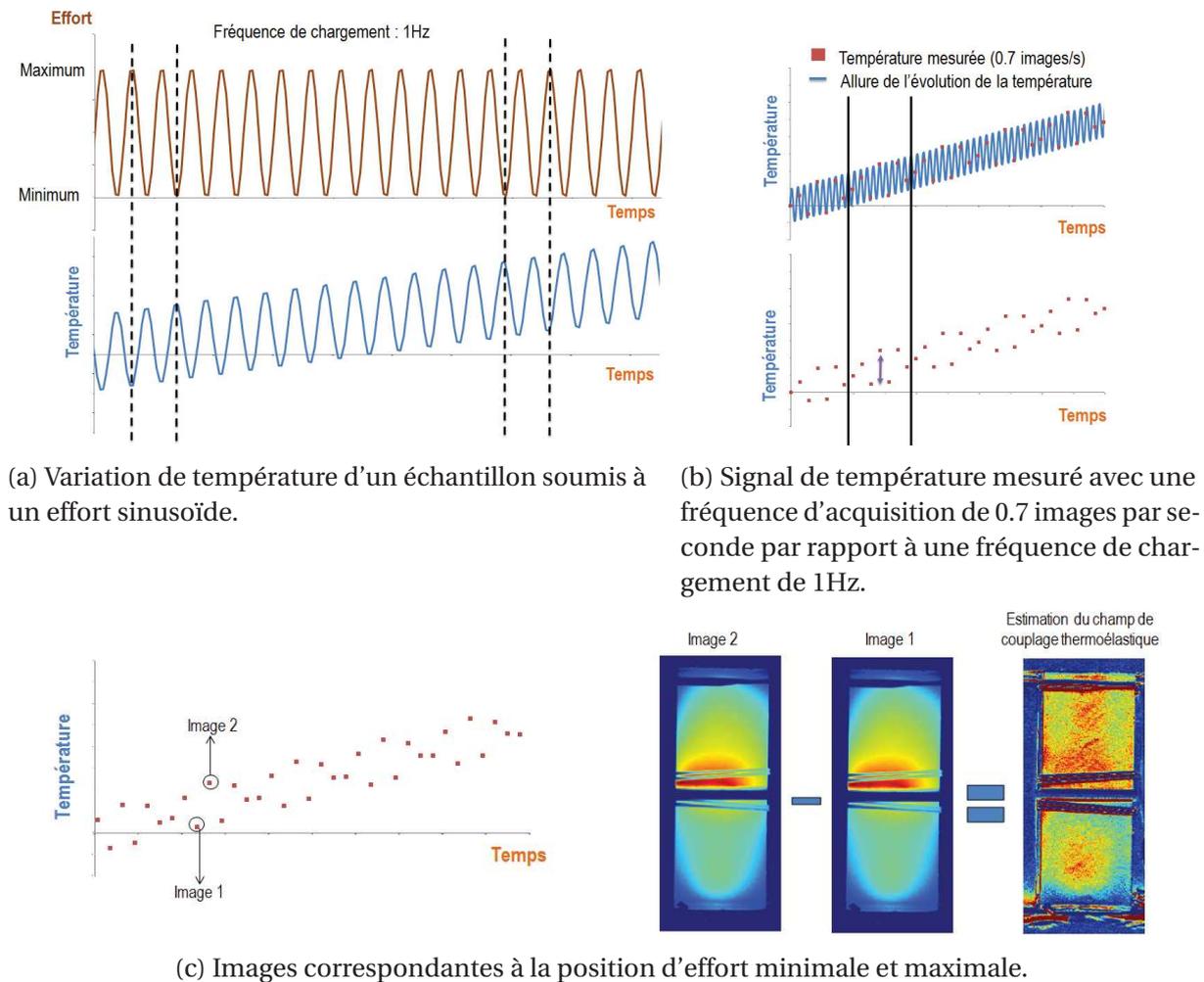


FIGURE 5.2 – Estimation du champ de couplage thermoélastique. Illustration sur des éprouvettes TBone 1B.

5.3 Éprouvettes Wavy 1

La caractéristique principale de ces éprouvettes est une réduction suivie d'une augmentation de l'épaisseur dans leur zone utile. Il y a donc deux zones considérées comme critiques en termes

de gradients mécaniques : la première est la zone où l'épaisseur finit de diminuer par rapport à l'injection de l'éprouvette, appelée **zone convergente** (parce que l'écoulement est convergent à cet endroit lors de l'injection) et la deuxième est la zone où l'épaisseur commence à augmenter par rapport à l'injection de l'éprouvette, appelée **zone divergente** (parce que l'écoulement est divergent à cet endroit lors de l'injection). La localisation de ces zones est illustrée sur la figure 5.3.

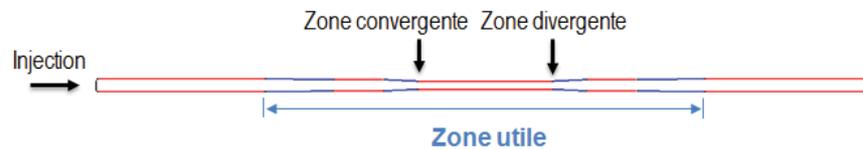


FIGURE 5.3 – Localisation de la zone convergente et de la zone divergente des éprouvettes Wavy 1 (la zone utile est celle qui n'est pas prise dans les mors).

Au niveau de la zone divergente, nous constatons un défaut surfacique de « givrage » visible comme une ligne blanche dans la largeur de l'éprouvette (visible sur les deux faces de l'éprouvette), telle que montrée dans la figure 5.4. Ce défaut apparaît systématiquement sur toutes les éprouvettes Wavy 1 utilisées au cours de la thèse. Pour étudier l'épaisseur affecté par ce défaut, des mesures MEB ont été réalisées au niveau de cette ligne blanche. La figure 5.5 montre, sur le côté gauche, les fibres au niveau de l'épaisseur (2.5mm) et, sur le côté droit, un zoom sur les premiers $300\mu\text{m}$ d'épaisseur. Nous pouvons observer que les micro-craquelures (givrage) apparaissent sur environ $100\mu\text{m}$ de profondeur à partir du bord de l'éprouvette. Si nous prenons en compte les deux côtés de l'éprouvette, le défaut apparaît sur $200\mu\text{m}$ au niveau de l'épaisseur ($100\mu\text{m}$ de chaque côté de l'éprouvette), ce qui représente 8% de l'épaisseur totale de l'éprouvette. Ce défaut non prévu lors de la conception, nous donne l'opportunité d'étudier l'influence des défauts de surface sur la fatigue de ces matériaux.

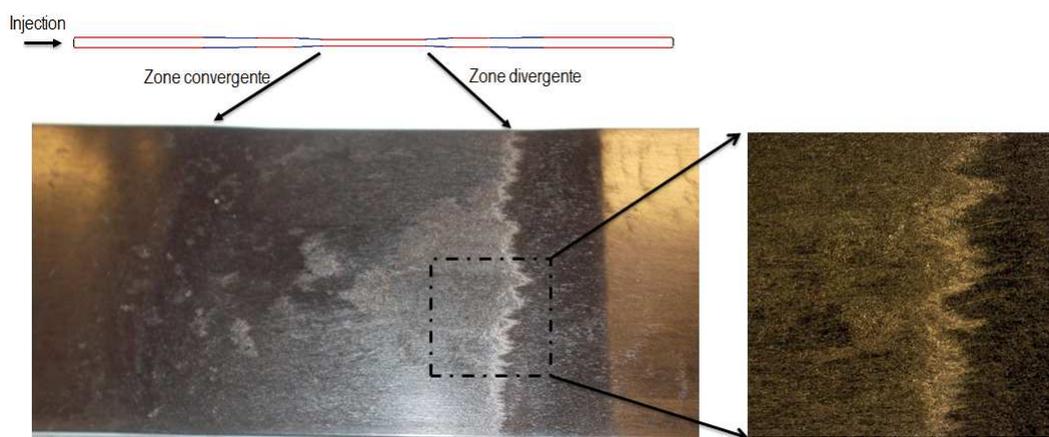


FIGURE 5.4 – Défaut de givrage au niveau de la zone divergente.

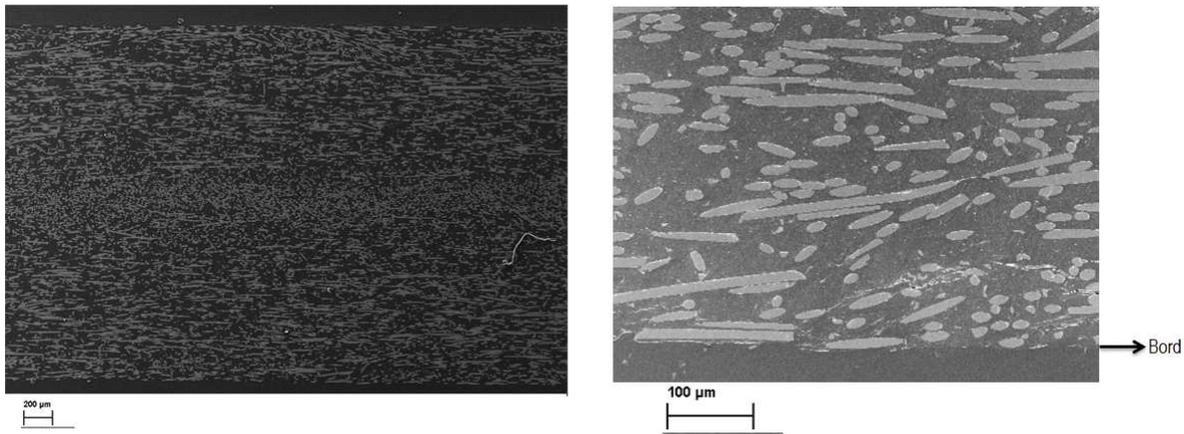


FIGURE 5.5 – Présence des micro-craquelures (givrage) sur les premiers 100µm de profondeur. Images tirées du rapport réalisé par Solvay *engineering plastics*.

5.3.1 Résultats des essais réalisés à température ambiante, R=0 et RH50.

La figure 5.6 montre le champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement et la localisation du point chaud (zone d'initiation) quelques cycles avant la rupture. Cette figure est une vue globale (thermique) du comportement en fatigue de l'éprouvette car le champ d'énergie dissipée par cycle (Fig. A) est calculé au début du palier et le point chaud (Fig. B) est mesuré quelques cycles avant la rupture. Nous pouvons observer que le champ d'énergie dissipée par cycle est hétérogène au niveau de la zone d'épaisseur minimale de l'éprouvette, et symétrique par rapport à la largeur de l'éprouvette. Le point chaud apparaît au niveau de la zone divergente. Notons que celui-ci n'est pas localisé dans la zone où l'énergie dissipée par cycle est maximale. La figure 5.7 montre les évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale (h_{ml}), du module sécant local apparent (E_{sla}) et de la déformation résiduelle (ε_r) lors de chaque palier d'auto-échauffement considéré. Nous pouvons observer que h_{ml} et E_{sla} atteignent une valeur quasi-constante à partir du quatrième cycle, ce qui nous permet de dire (au moins de façon globale) que l'énergie dissipée par cycle est constante à partir du quatrième cycle. La méthode présentée dans le chapitre 4 pour l'obtention de l'énergie dissipée par cycle paraît donc applicable. Nous observons aussi que ε_r n'atteint pas une valeur constante, mais que la cinétique d'évolution est plus lente à partir du quatrième cycle. Ces données mécaniques ont été aussi étudiées pour des essais de fatigue classiques, tel que montré sur la figure 5.8, où nous pouvons observer que h_{ml} et E_{sla} sont quasi-constants pendant toute la durée de vie en fatigue lorsque celle-ci est de l'ordre de 10^4 cycles ou plus (comportement similaire aux éprouvettes Dogbone). L'énergie dissipée par cycle calculée au début de l'essai de fatigue peut donc être considérée comme représentative de l'ensemble de l'essai pour des durées de vie de l'ordre de 10^4 cycles ou plus (en supposant que localement celle-ci est constante jusqu'à l'initiation en fatigue). Pour le cas de ε_r , une évolution est constatée pour chaque niveau de durée de vie considéré, mais la cinétique d'évolution semble être moins marquée pour des durées de vie de l'ordre de 10^4 cycles ou plus.

La figure 5.9 montre la composante yy du champ de déformation surfacique (avec y la direction du chargement) pour un essai de fatigue classique. Les champs présentés correspondent à l'effort maximum cyclique au début de l'essai et l'effort maximum cyclique quelques cycles avant la

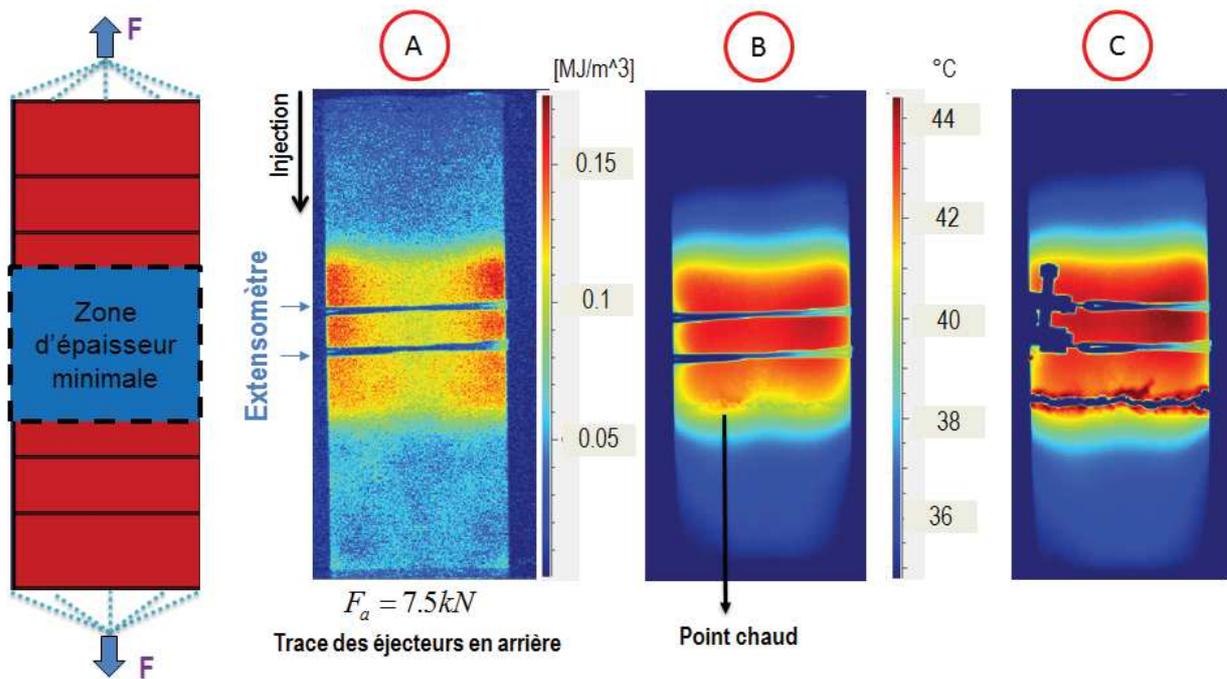


FIGURE 5.6 – A-champ d'énergie dissipée par cycle, B-localisation du point chaud quelques cycles avant la rupture et C- image thermique immédiatement après la rupture. Durée de vie 356 cycles. $R=0$, RH50 et $f=1\text{Hz}$.

rupture. Nous pouvons observer les fortes hétérogénéités du champ de déformation au début du palier en remarquant une concentration de la déformation dans la largeur au niveau de la zone divergente (corrélée avec la localisation du givrage). Par rapport au champ de déformation, quelques cycles avant la rupture, nous observons une très forte localisation de la déformation sur le côté droit de la zone divergente. La figure 5.10 montre le champ de couplage thermoélastique pour trois niveaux d'amplitude d'effort. Nous pouvons observer que le couplage thermoélastique est maximum au niveau de la zone convergente et nous constatons une ligne au niveau de la zone divergente où le couplage thermoélastique est plus important par rapport à son voisinage. La localisation de cette ligne semble être corrélée à la concentration de la déformation. Cependant, les gradients observés au niveau de cette zone apparaissent dans des distances de l'ordre de 2 ou 3mm. La technique adoptée pour l'estimation du couplage thermoélastique arrive donc à ses limites de précision. L'interprétation quantitative du champ de couplage thermoélastique dans cette zone s'avère difficile.

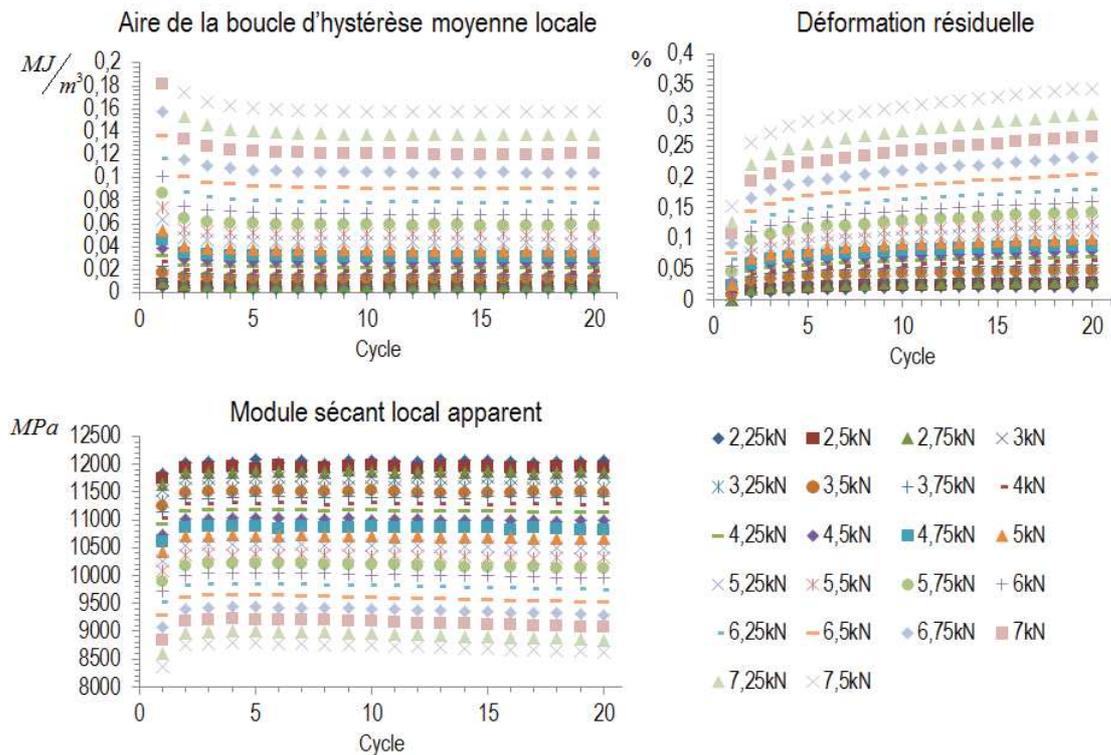


FIGURE 5.7 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour chaque palier d'un essai d'auto-échauffement (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

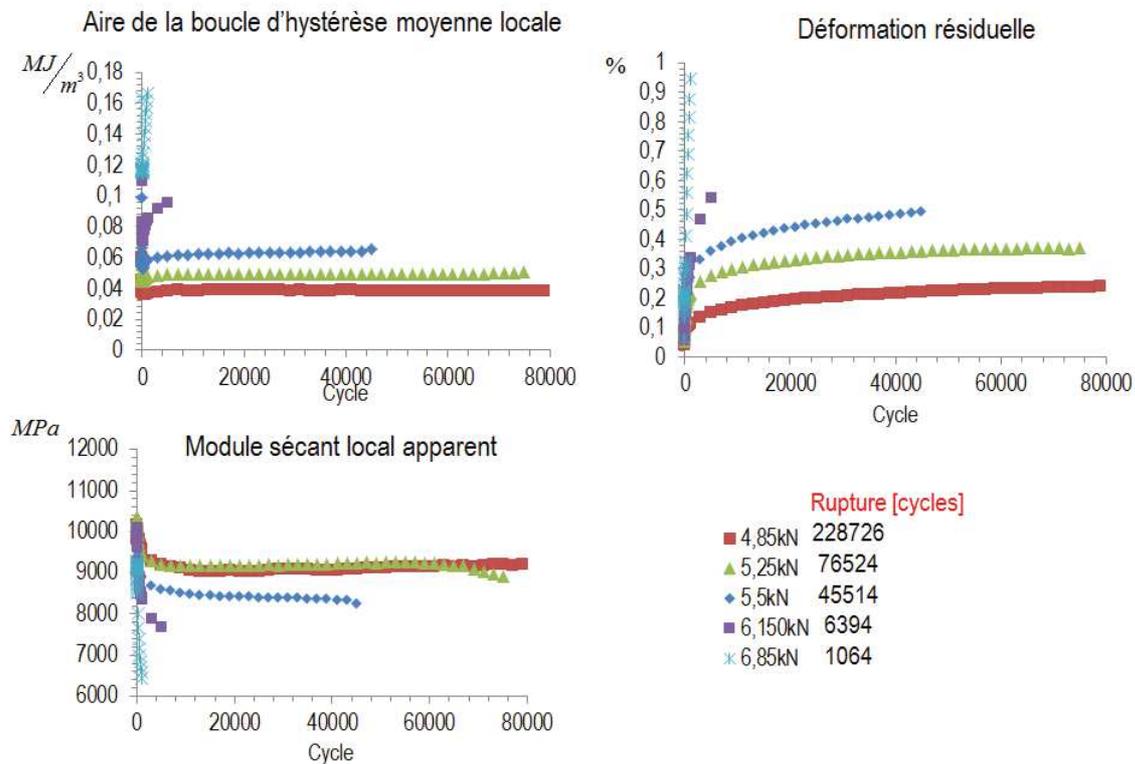


FIGURE 5.8 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour des essais de fatigue classiques (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.11 présente l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone où la dissipation est maximale et au niveau de la zone de rupture pour tous les niveaux d'amplitude d'effort considérés lors d'un essai d'auto-échauffement. Par rapport à la zone de rupture, la zone ayant la dissipation la plus importante a une énergie dissipée par cycle au maximum 30% supérieure. Cette figure nous permet de vérifier que la différence de dissipation entre les zones considérées est observée pour tous les niveaux d'amplitude d'effort étudiés.

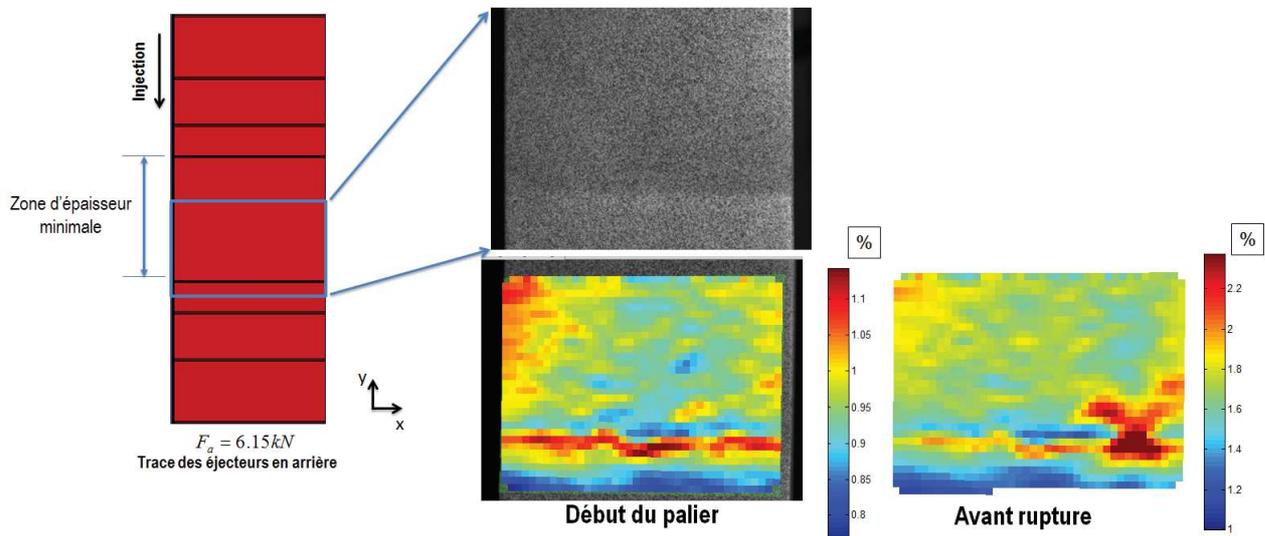


FIGURE 5.9 – Composante yy du champ de déformation surfacique (avec y la direction du chargement) pour un essai de fatigue classique. Durée de vie 4393 cycles. $R=0$, $RH50$, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

La localisation du point chaud a été étudiée pour plusieurs niveaux de durée de vie. La figure 5.12 montre le champ d'énergie dissipée par cycle et le point chaud pour deux cas de durée de vie. Nous observons que le point chaud apparaît toujours quelque part dans la largeur au niveau de la zone divergente (aucune zone privilégiée dans la largeur de la zone divergente n'a été observée). Il faut remarquer que le temps entre l'apparition du point chaud et la rupture est toujours négligeable par rapport à la durée de vie de l'éprouvette ($< 1\%$ de la durée de vie). Nous supposons donc que la phase de propagation de la fissure est très rapide. La figure 5.13 montre que le point chaud est bien corrélé à la zone de localisation de la déformation quelques cycles avant la rupture, ce qui permet de justifier que le point chaud est la signature thermique d'un endommagement local. Nous rappelons que le champ de température est mesuré sur la face opposée de l'éprouvette par rapport à celle où le champ de déformation est mesurée.

La figure 5.14a montre qu'il y a une très bonne répétabilité de la mesure de l'énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue. Il n'est donc pas nécessaire de mesurer systématiquement le point chaud pour la mise en place du critère de fatigue. La figure 5.14b montre les régimes observés sur le graphique présentant l'énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud en fonction de l'amplitude d'effort en spécifiant la transition entre le premier et le deuxième régime. Finalement, la figure 5.14c montre le critère de fatigue et les essais de fatigue classique réalisés. Nous constatons une bonne corrélation entre les deux.

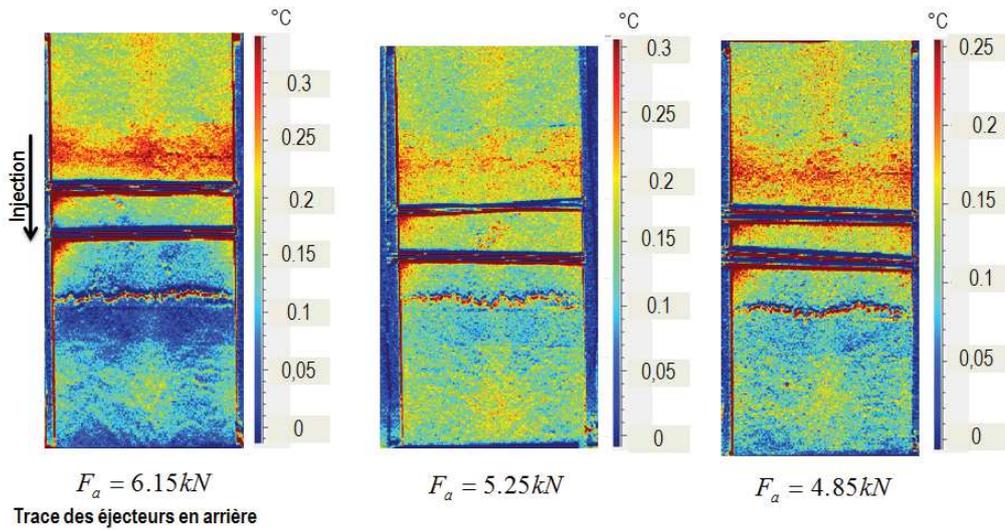
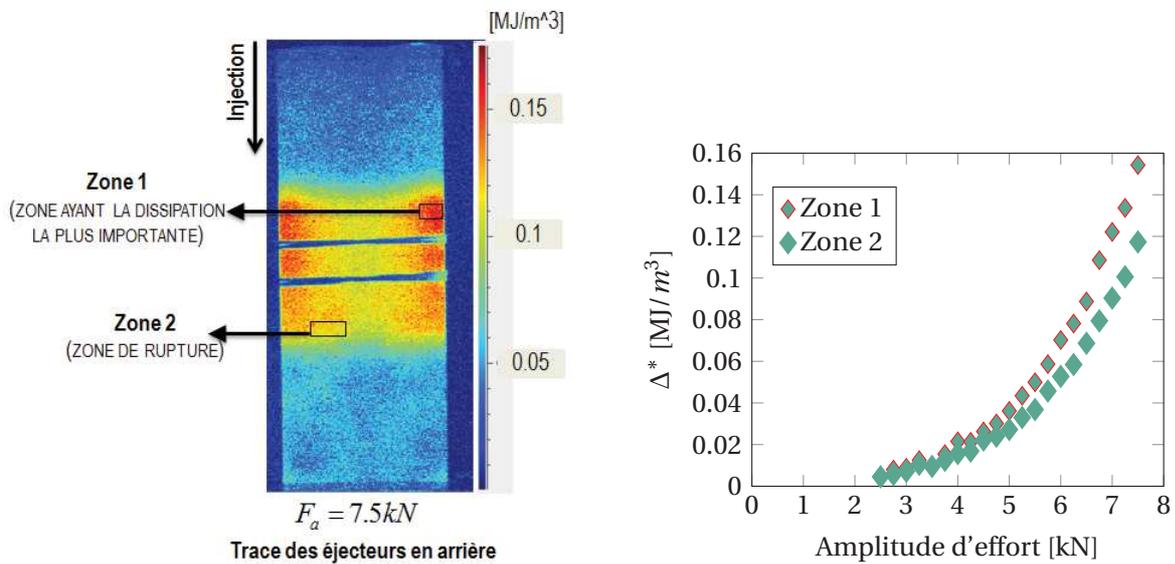


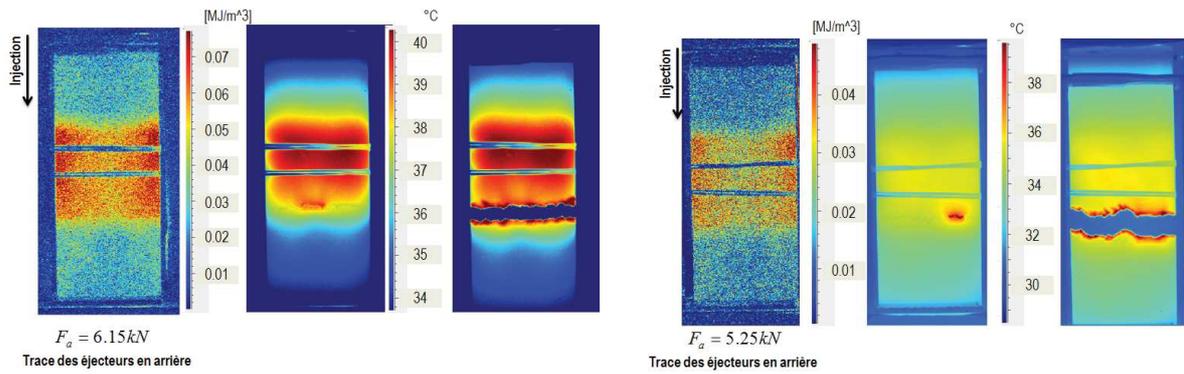
FIGURE 5.10 – Champ de couplage thermoélastique pour trois niveaux d’amplitude d’effort. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.



(a) Champ d’énergie dissipée par cycle du dernier palier de chargement.

(b) Comparaison entre les zones.

FIGURE 5.11 – Énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone ayant la dissipation la plus importante et au niveau de la zone de rupture lors d’un essai d’auto-échauffement. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.



(a) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud. Durée de vie : 6394 cycles.

(b) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud. Durée de vie : 76524 cycles.

FIGURE 5.12 – Localisation du point chaud pour deux cas de durée de vie. $R=0$, $RH50$, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

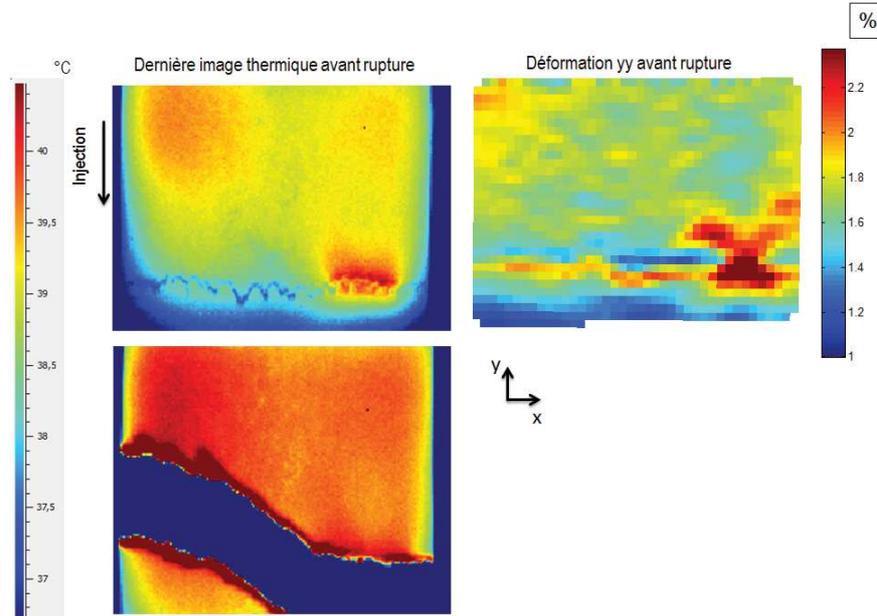
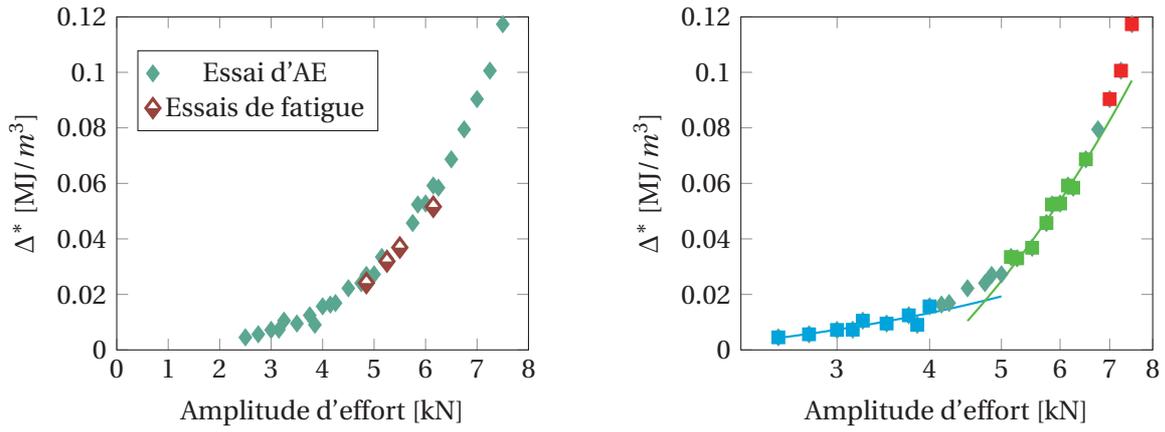
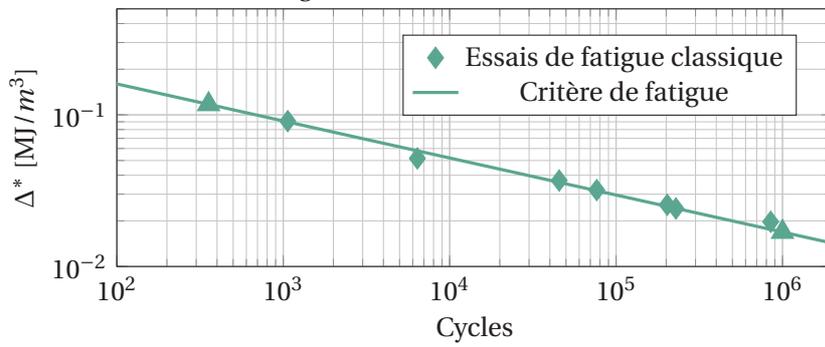


FIGURE 5.13 – Corrélation entre le point chaud et la localisation de la déformation quelques cycles avant rupture. Durée de vie 4393 cycles. $R=0$, $RH50$, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.



(a) Répétabilité de la mesure de l'énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue.

(b) Régimes observés pour l'identification du critère de fatigue.



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

FIGURE 5.14 – Identification et validation du critère de fatigue. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

5.3.2 Résultats des essais réalisés à température ambiante, R=0 et DAM.

La figure 5.15 montre le champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement (Fig. A) et la localisation du point chaud (zone d'initiation) quelques cycles avant la rupture (Fig. B). Cette figure est une vue globale (thermique) du comportement en fatigue de l'éprouvette. Par rapport au cas RH50, nous pouvons remarquer que le champ d'énergie dissipée par cycle reste hétérogène au niveau de la zone d'épaisseur minimale de l'éprouvette, mais celui-ci n'est plus symétrique par rapport à la largeur de l'éprouvette. Le point chaud apparaît toujours au niveau de la zone divergente et n'est pas localisé à la zone où l'énergie dissipée par cycle est maximale. La figure 5.16 montre les évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale (h_{ml}), du module sécant local apparent (E_{sla}) et de la déformation résiduelle (ε_r) lors de chaque palier d'un essai auto-échauffement. Nous constatons un comportement similaire à celui du cas RH50 puisque h_{ml} et E_{sla} atteignent des valeurs quasi-constantes à partir du quatrième cycle. Le comportement de ε_r est aussi similaire à celui du cas RH50. La figure 5.17 montre l'évolution des données mécaniques pour les essais de fatigue classique où nous pouvons observer que le comportement reste similaire à celui du cas RH50, c'est-à-dire que h_{ml} et E_{sla} sont quasi-constants pendant toute la durée de vie en fatigue lorsque celle-ci est de l'ordre de 10^4 cycles ou plus.

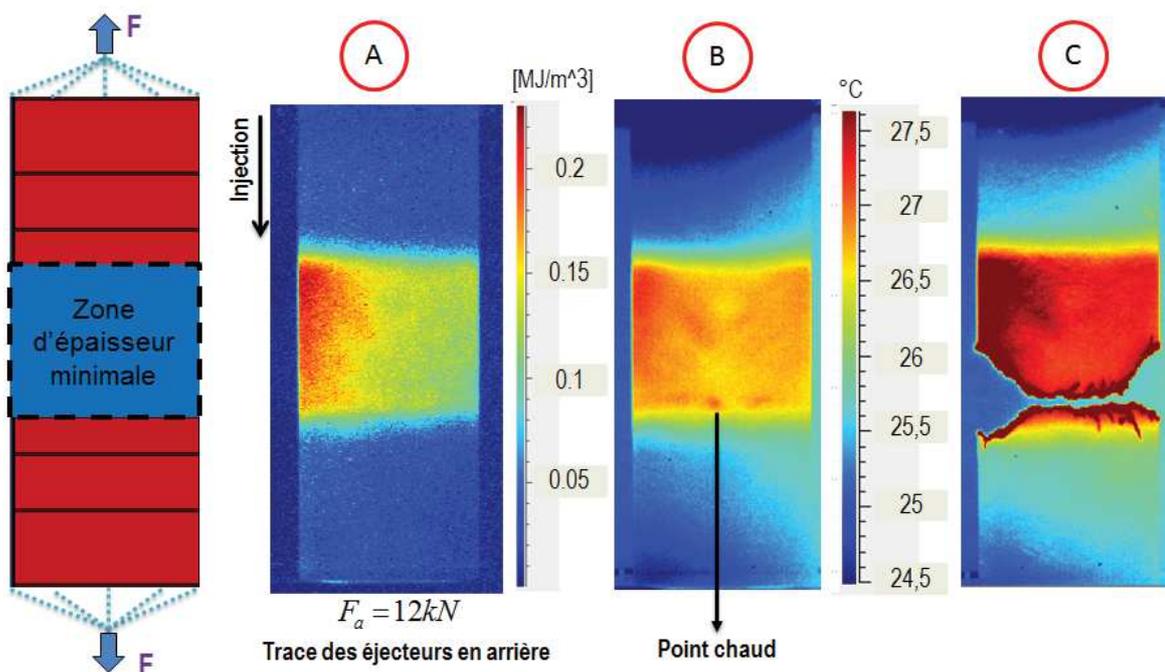


FIGURE 5.15 – A-champ d'énergie dissipée par cycle, B-localisation du point chaud quelques cycles avant la rupture et C- image thermique immédiatement après la rupture. Durée de vie 46 cycles. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.18 montre la composante yy du champ de déformation surfacique (avec y la direction du chargement) pour un essai de traction monotone. Le champ présenté correspond à l'instant immédiatement avant la rupture. Nous pouvons observer les fortes hétérogénéités du champ de déformation en remarquant que la dissymétrie constatée pour le champ d'énergie dissipée par cycle paraît être corrélée au champ de déformation. De façon similaire au cas RH50, une

concentration de la déformation dans la largeur au niveau de la zone divergente est observée. La figure 5.19 montre le champ de couplage thermoélastique pour trois niveaux d'amplitude d'effort. Nous pouvons observer que le couplage thermoélastique est maximum au niveau de la zone convergente dans la partie gauche (dans la même zone où l'énergie dissipée par cycle est maximale). La ligne au niveau de la zone divergente (localisation de la ligne de givrage) où le couplage thermoélastique est plus important par rapport à son voisinage est également détectée.

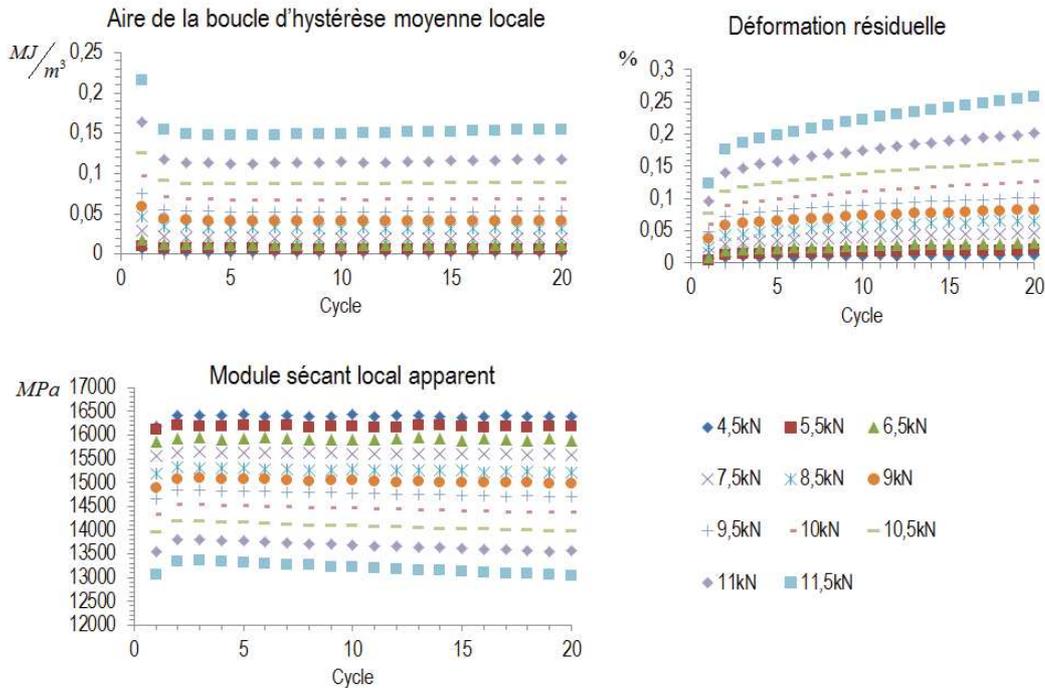


FIGURE 5.16 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour chaque palier d'un essai d'auto-échauffement (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.20 présente l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone où la dissipation est maximale et au niveau de la zone de rupture pour tous les niveaux d'amplitude d'effort considérés lors d'un essai d'auto-échauffement. Par rapport à la zone de rupture, la zone ayant la dissipation la plus importante a une énergie dissipée par cycle au maximum 60% supérieure. Cette figure nous permet de vérifier que la différence de dissipation entre les zones considérées est observée pour tous les niveaux d'amplitude d'effort étudiés. Comme pour le cas RH50, la localisation du point chaud a été étudiée pour plusieurs niveaux de durée de vie. La figure 5.21 montre le champ d'énergie dissipée par cycle et le point chaud pour deux cas de durée de vie. Nous observons que le point chaud apparaît toujours quelque part dans la largeur au niveau de la zone divergente. Le temps d'apparition du point chaud est toujours négligeable par rapport à la durée de vie de l'éprouvette (< 1% de la durée de vie), donc la phase de propagation de la fissure est supposée très rapide.

Pour le cas des éprouvettes Wavy 1 DAM, il n'y a pas d'essais de fatigue avec mesure du champ de déformation. Mais l'essai de traction monotone mené jusqu'à la rupture donne quelques idées sur la corrélation entre le point chaud (fissuration en traction monotone) et la concentration de la déformation au niveau de la zone divergente. La figure 5.22 montre le point chaud observé

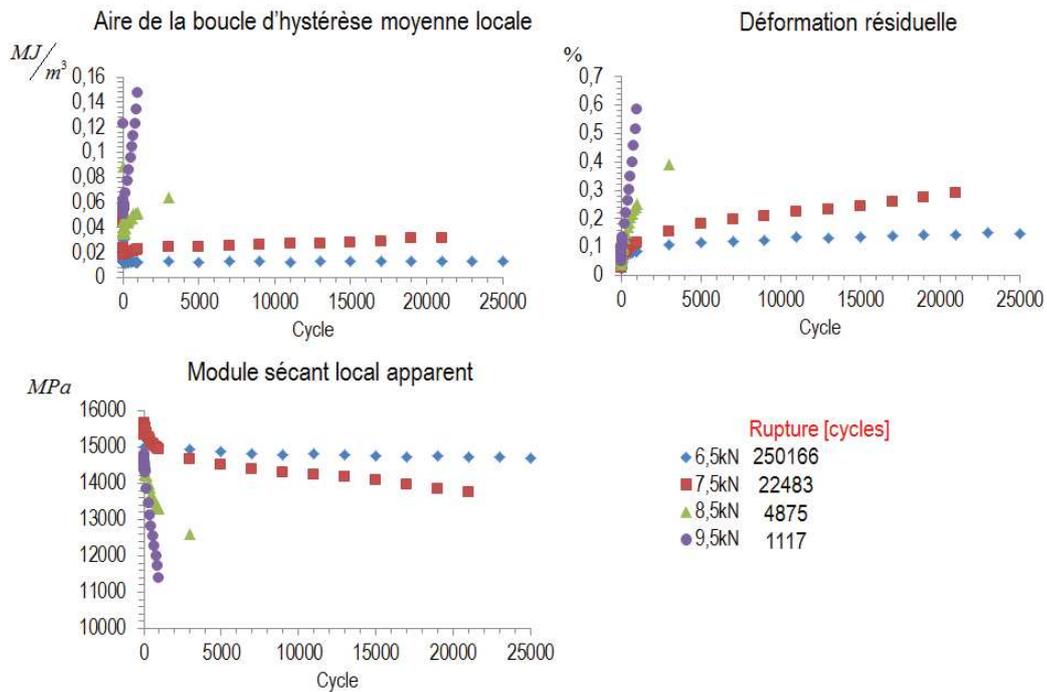


FIGURE 5.17 – Évolutions de l’aire de la boucle d’hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour des essais de fatigue classique (présentées en fonction de l’amplitude d’effort). $R=0$, DAM et $f=1\text{Hz}$.

immédiatement avant la rupture lors d’un essai de traction monotone. Nous observons que celui-ci apparaît au même endroit par rapport à un essai de fatigue. Les évolutions de la température et de la déformation au niveau du point chaud sont aussi présentées. Nous observons que la partie linéaire de la variation de température est corrélée à la partie linéaire de l’évolution de la déformation et qu’une augmentation brutale de la température quelques secondes avant la rupture est constatée.

La figure 5.23a montre qu’il y a une bonne répétabilité de l’énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud entre l’essai d’auto-échauffement et les essais de fatigue, comme pour le cas RH50. La figure 5.23b montre les régimes observés dans le graphique présentant l’énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud en fonction de l’amplitude d’effort en spécifiant la transition entre le premier et le deuxième régime. Finalement, la figure 5.23c montre le critère de fatigue et les essais de fatigue classiques réalisés. Nous constatons une bonne corrélation entre les deux.

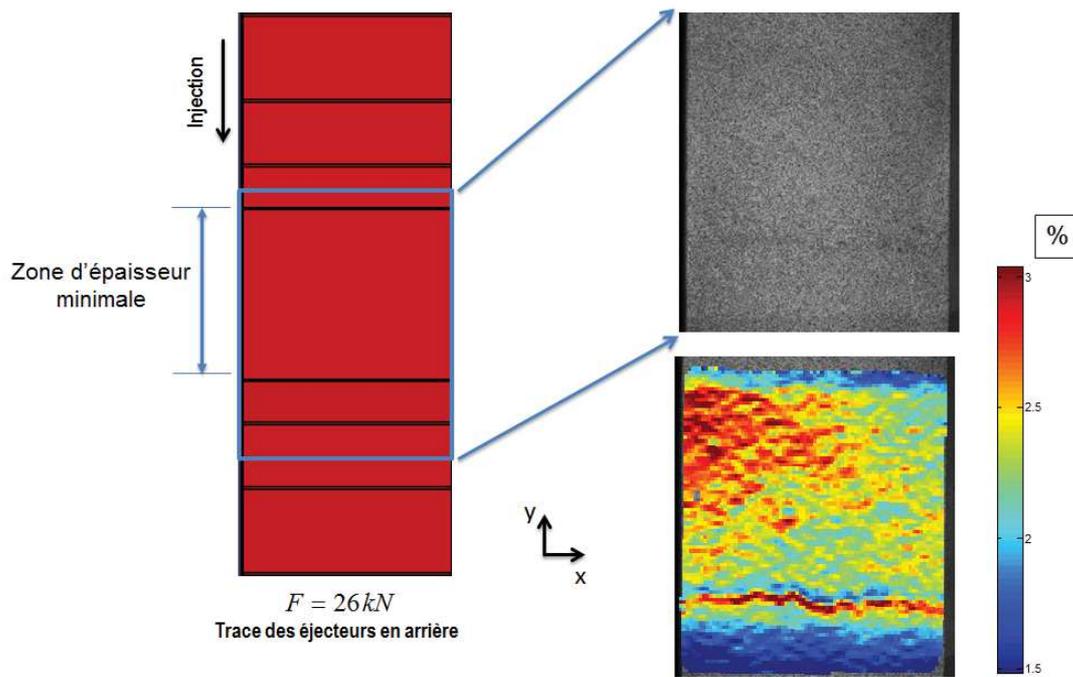


FIGURE 5.18 – Composante yy du champ de déformation surfacique (avec y la direction du chargement) pour un essai de traction monotone. Vitesse de chargement : 6kN/min. Effort à la rupture : 26.15kN.

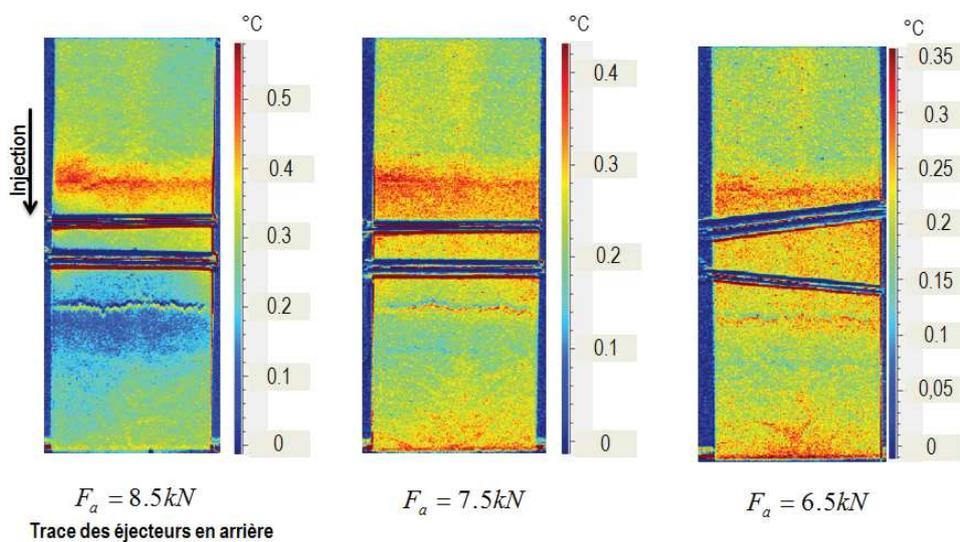
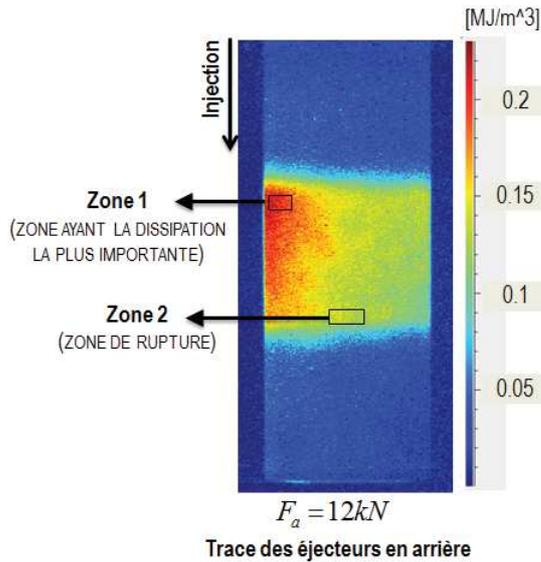
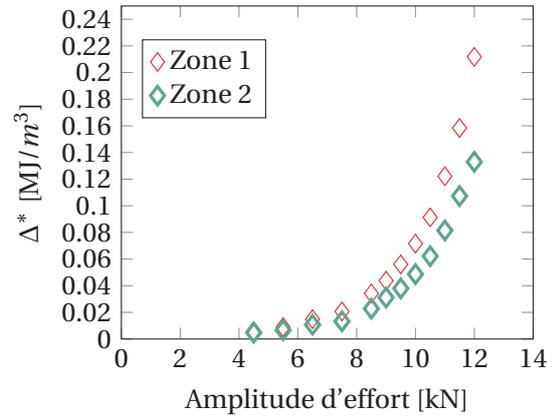


FIGURE 5.19 – Champ de couplage thermoélastique pour trois niveaux d'amplitude d'effort. $R=0$, RH50, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

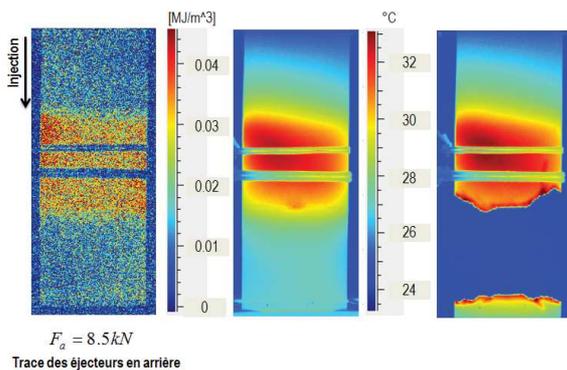


(a) Champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier de chargement.

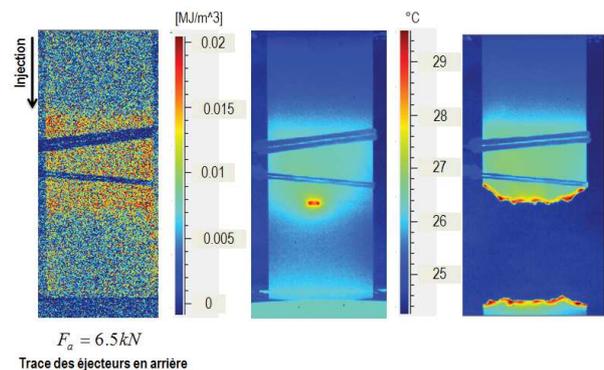


(b) Comparaison entre les zones.

FIGURE 5.20 – Énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone ayant la dissipation la plus importante et au niveau de la zone de rupture lors d'un essai d'auto-échauffement. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.



(a) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud. Durée de vie : 4875 cycles.



(b) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud. Durée de vie : 250166 cycles.

FIGURE 5.21 – Localisation du point chaud pour deux cas de durée de vie. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

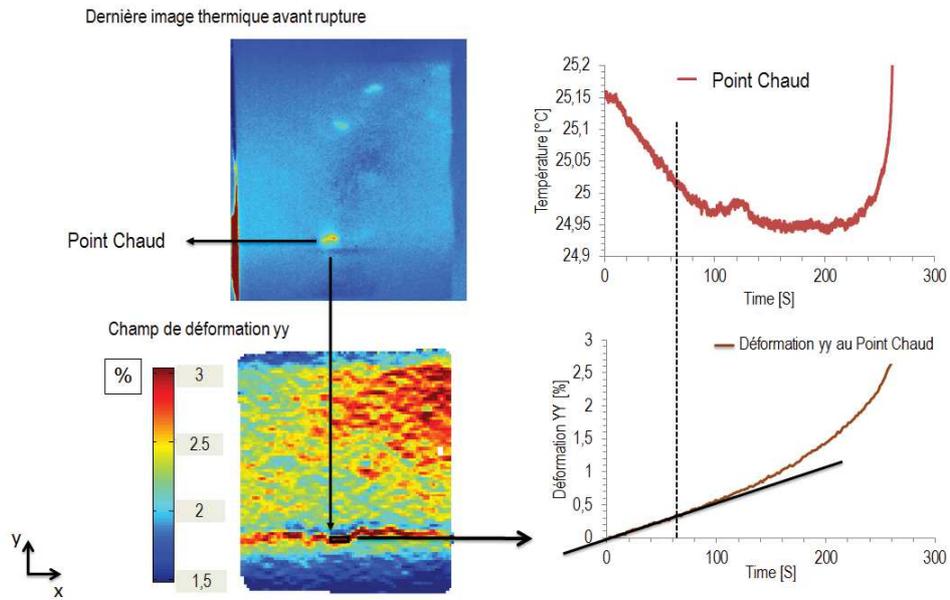
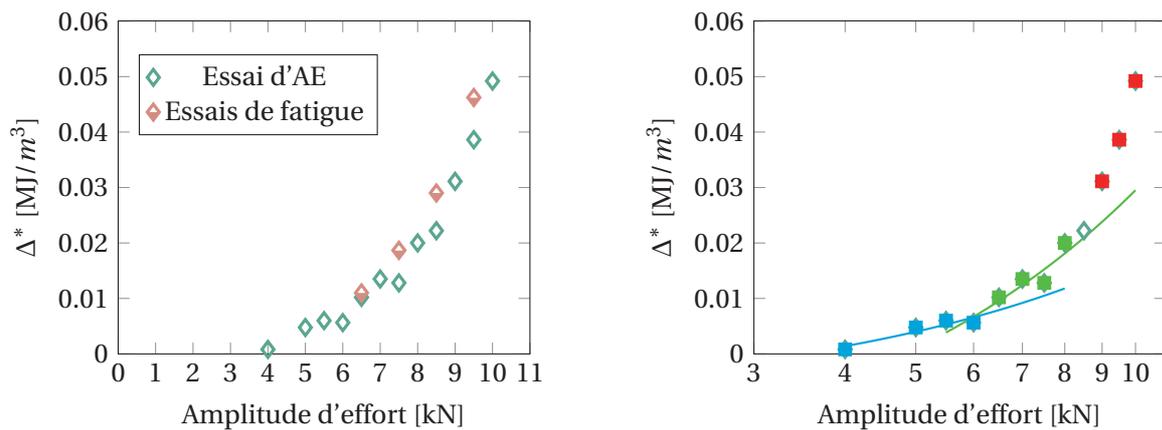
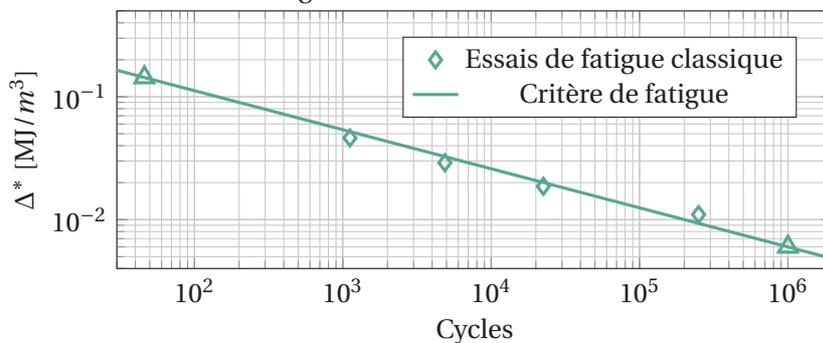


FIGURE 5.22 – Corrélation entre le point chaud et la localisation de la déformation au niveau de la zone divergente pour un essai de traction monotone.



(a) Répétabilité de la mesure de l'énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue.

(b) Régimes observés pour l'identification du critère de fatigue.



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

FIGURE 5.23 – Identification et validation du critère de fatigue. $R=0$, $RH50$, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

5.3.3 Bilan sur les éprouvettes Wavy 1

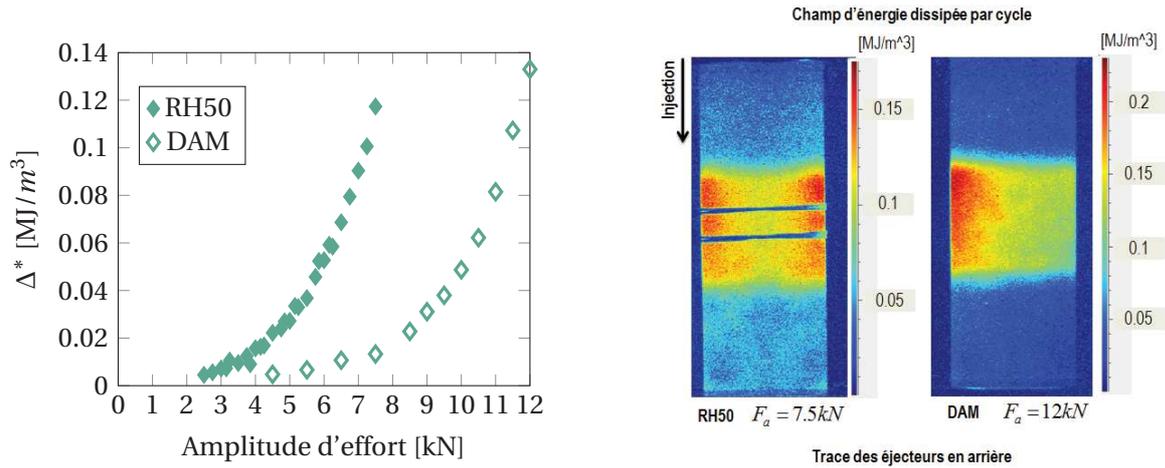
Résultats et comparaison entre les teneurs en humidité (RH50 et DAM)

La figure 5.24 montre la comparaison en terme d'énergie dissipée par cycle, de champ d'énergie dissipée par cycle et de critère de fatigue dans les cas de teneur en humidité étudiés pour les éprouvettes Wavy 1. Les conclusions de cette comparaison sont :

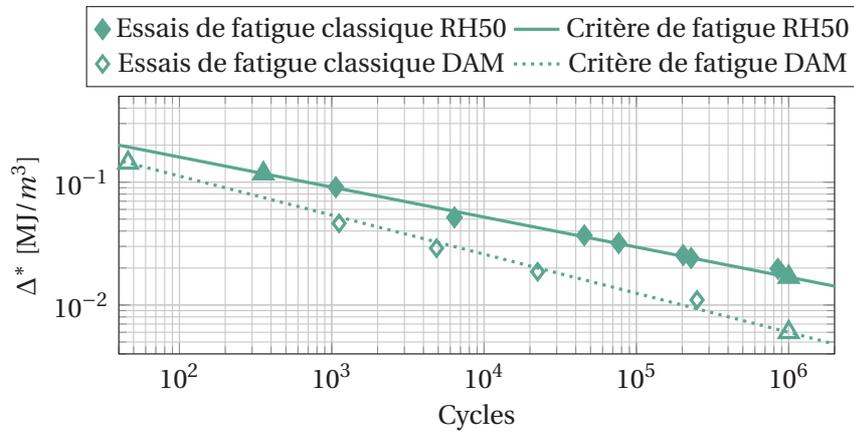
- l'allure du champ d'énergie dissipée par cycle est différente pour chaque cas de teneur en humidité considérée. Celui-ci est symétrique par rapport à la largeur de l'éprouvette pour le cas RH50 et non symétrique pour le cas DAM. Le fait qu'il ne soit pas symétrique est étonnant parce que la microstructure prédite (cf. Fig.3.9) est bien symétrique par rapport à la largeur de l'éprouvette. Cette différence peut être due à des contraintes résiduelles présentes dans l'éprouvette sèche, lesquelles sont relaxées lorsque l'éprouvette absorbe de l'eau ;
- la rupture apparaît au niveau de la zone divergente pour les deux cas de teneur en humidité. Ici, ce résultat peut être expliqué par le défaut de surface observé (givrage) localisée à cet endroit ;
- la zone ayant la dissipation la plus importante n'est pas la zone de rupture pour les deux cas de teneur en humidité. Ce résultat peut être dû à la variation d'orientation locale. En effet, nous avons observé au chapitre 4 que les éprouvettes ayant une orientation à 45° présentent une dissipation plus importante pour la même durée de vie que les éprouvettes ayant une orientation à 0° ou 90°. Ce résultat peut également être expliqué par une sensibilité au défaut de surface observé ;
- les prédictions du critère de fatigue sont très bonnes pour chaque cas de teneur en humidité ;
- les critères de fatigue identifiés pour chaque cas de teneur en humidité ne sont pas unifiés (écart entre les critères pouvant dépasser une décade pour le même niveau de Δ^*).

Comparaison entre les éprouvettes Wavy 1 RH50 et les éprouvettes Dogbone 0° RH50

La figure 5.25 montre la comparaison des courbes de fatigue en fonction de Δ^* entre les éprouvettes Wavy 1 et Dogbone 0° pour une teneur en humidité RH50. Nous pouvons observer que les critères de fatigue sont proches (moins d'une demi-décade pour le même niveau de Δ^*). Ceci est une première vérification que le critère de fatigue identifié sur des éprouvettes simples est valide pour des éprouvettes plus complexes (même avec la présence du défaut surfacique). Notons que la microstructure prédite des éprouvettes Wavy 1 (cf. Fig.3.9) est majoritairement orientée à 0° au niveau de la peau.



(a) Énergie dissipée par cycle calculée au niveau du point chaud pour chaque cas de teneur en humidité. (b) Champ d'énergie dissipée par cycle pour chaque teneur en humidité considérée.



(c) Comparaison des courbes de fatigue en fonction de Δ^* pour chaque cas de teneur en humidité.

FIGURE 5.24 – Comparaison des résultats en fonction de la teneur en humidité. R=0, f=1Hz et température ambiante.

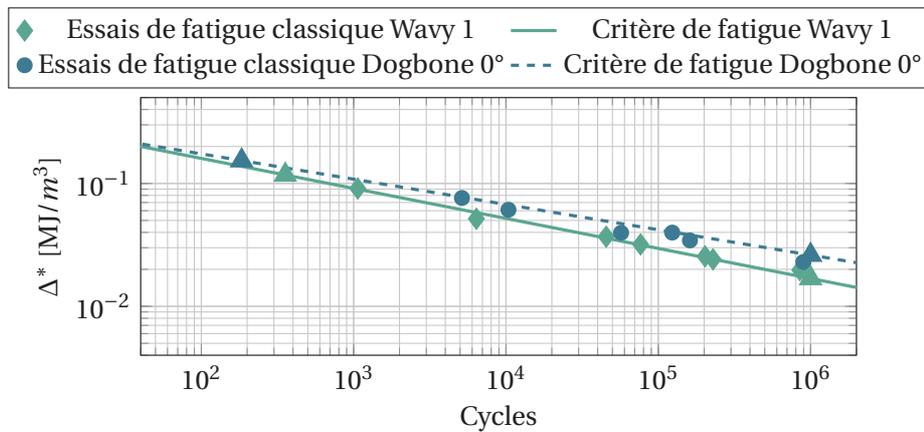


FIGURE 5.25 – Comparaison des courbes de fatigue en fonction de Δ^* entre les éprouvettes Wavy 1 et les éprouvettes Dogbone 0°. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

5.4 Éprouvettes Wavy 2

La caractéristique principale de ces éprouvettes est une réduction suivie d'une augmentation de l'épaisseur répétées deux fois dans leur zone utile (ce qui donne deux zones séparées ayant une épaisseur minimale). Il y a donc quatre zones considérées critiques en termes de gradients mécaniques : les deux premières sont les zones où l'épaisseur finit de diminuer par rapport à l'injection de l'éprouvette, appelées **première et deuxième zone convergente** et les autres sont les zones où l'épaisseur commence à augmenter par rapport à l'injection de l'éprouvette appelées **première et deuxième zone divergente**. La localisation de ces zones est illustrée sur la figure 5.26. De façon similaire aux éprouvettes Wavy 1, nous avons systématiquement observé de défauts de givrage au niveau des zones divergentes.

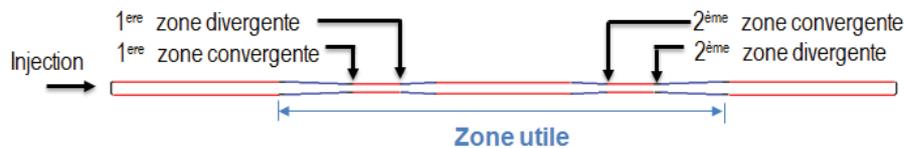


FIGURE 5.26 – Localisation des zones convergentes et des zones divergentes des éprouvettes Wavy 2 (la zone utile est celle qui n'est pas prise dans les mors).

5.4.1 Résultats des essais réalisés à température ambiante, R=0 et RH50.

La figure 5.27 montre le champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement (Fig. A) et la localisation du point chaud (zone d'initiation) quelques cycles avant la rupture (Fig. B). Cette figure est une vue globale (thermique) du comportement en fatigue de l'éprouvette car le champ d'énergie dissipée par cycle est calculé au début du palier et le point chaud est mesuré quelques cycles avant la rupture. Nous pouvons observer que le champ d'énergie dissipée par cycle est hétérogène au niveau des zones d'épaisseur minimale de l'éprouvette, et symétrique par rapport à la largeur de l'éprouvette. Le point chaud apparaît au niveau de la première zone convergente. Notons que celui-ci n'est pas localisé dans la zone où l'énergie dissipée par cycle est maximale. La figure 5.28 montre les évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale (h_{ml}), du module sécant local apparent (E_{sla}) et de la déformation résiduelle (ε_r) lors de chaque palier d'auto-échauffement considéré (extensomètre mis en place au niveau de la première zone d'épaisseur minimale, tel que montré sur la figure 5.27A). Nous pouvons observer que h_{ml} et E_{sla} atteignent une valeur quasi-constante à partir du quatrième cycle, ce qui nous permet de dire (au moins de façon globale) que l'énergie dissipée par cycle est constante à partir du quatrième cycle. Le choix de la méthode présentée dans le chapitre 4 pour l'obtention de l'énergie dissipée par cycle paraît donc justifié. Nous observons aussi que ε_r n'atteint pas une valeur constante, mais la cinétique d'évolution est plus lente à partir du quatrième cycle. Ces données mécaniques ont également été étudiées pour des essais de fatigue classiques, tels que montrés sur la figure 5.29, où nous pouvons observer que h_{ml} et E_{sla} sont quasi-constants pendant toute la durée de vie en fatigue lorsque celle-ci est de l'ordre de 10^4 cycles ou plus. Ces observations sont similaires à celles réalisées sur les éprouvettes Wavy 1.

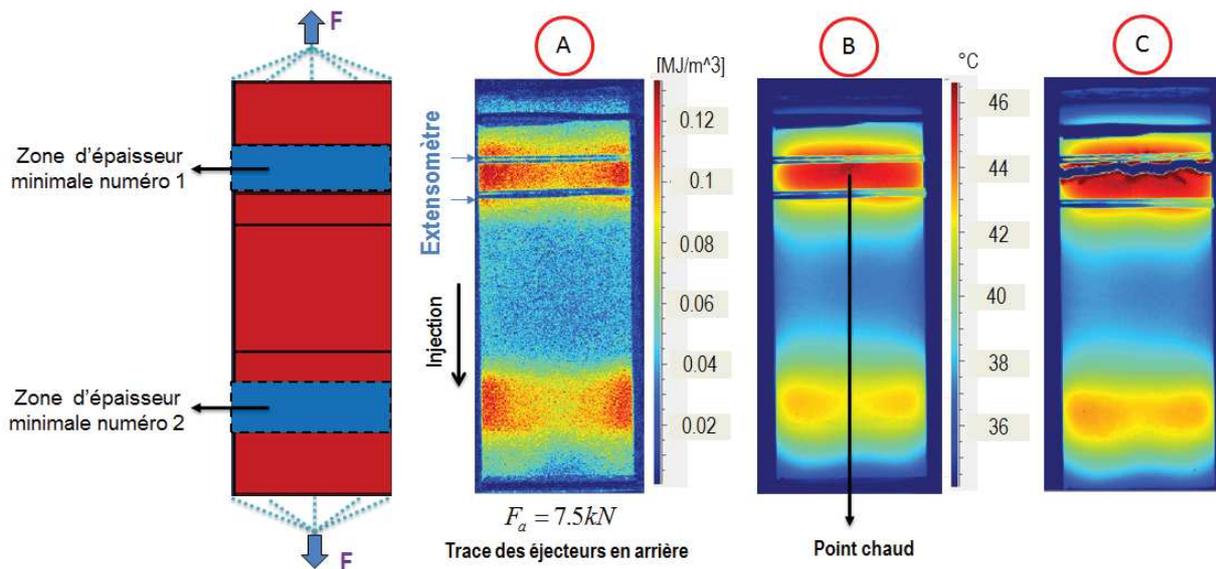


FIGURE 5.27 – A-champ d'énergie dissipée par cycle, B-localisation du point chaud quelques cycles avant la rupture et C- image thermique immédiatement après la rupture. Durée de vie 884 cycles. $R=0$, RH50, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

La figure 5.30 montre la composante $y y$ du champ de déformation surfacique (avec y la direction du chargement) pour un essai de fatigue classique au niveau de la première zone d'épaisseur minimale. Les champs présentés correspondent à l'effort maximum cyclique au début de l'essai et l'effort maximum cyclique quelques cycles avant la rupture. Nous pouvons observer les fortes hétérogénéités du champ de déformation au début du palier. Par rapport au champ de déformation quelques cycles avant la rupture, nous observons une forte localisation de la déformation au niveau de la première zone convergente approximativement au centre de celle-ci. La figure 5.31 montre le champ de couplage thermoélastique pour trois niveaux d'amplitude d'effort. L'extensomètre a été placé soit sur la première zone d'épaisseur minimale, soit sur la deuxième, dans le but de mieux apprécier le champ de couplage thermoélastique sur chacune des zones d'épaisseur minimale. Nous pouvons observer que le couplage thermoélastique est maximum au niveau des zones convergentes et nous constatons des lignes au niveau des zones divergentes où le couplage thermoélastique est plus important par rapport à son voisinage. Ces lignes sont similaires à celles trouvées pour les éprouvettes Wavy 1 (au niveau des zones où le givrage est observé).

La figure 5.32 présente l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone où la dissipation est maximale et au niveau de la zone de rupture pour tous les niveaux d'amplitude d'effort considérés lors d'un essai d'auto-échauffement. Par rapport à la zone de rupture, la zone ayant la dissipation la plus importante a une énergie dissipée par cycle au maximum 20% supérieure. Cette figure nous permet de vérifier que la différence de dissipation entre les zones considérées est observée pour tous les niveaux d'amplitude d'effort étudiés. La localisation du point chaud a été étudiée pour plusieurs niveaux de durée de vie. La figure 5.33 montre le champ d'énergie dissipée par cycle et le point chaud pour deux cas de durée de vie. Ceux-ci montrent que la rupture peut avoir lieu dans deux zones différentes, qui sont la première zone convergente

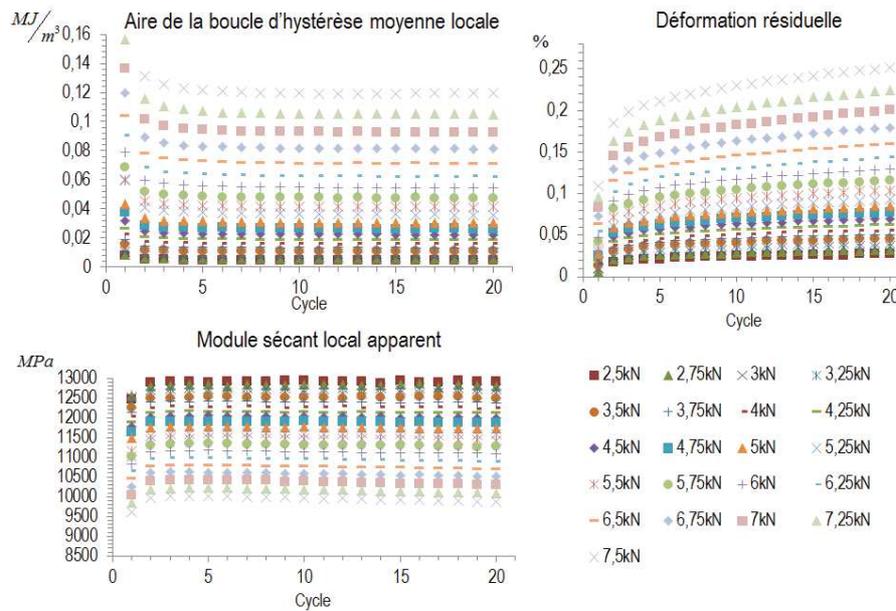


FIGURE 5.28 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour chaque palier d'un essai d'auto-échauffement (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). $R=0$, $RH50$, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

et la deuxième zone divergente. Le temps entre l'apparition du point chaud et la rupture de l'éprouvette est toujours négligeable par rapport à la durée de vie de l'éprouvette ($< 1\%$ de la durée de vie). Nous supposons donc que la phase de propagation de la fissure est très rapide. Pour mieux comprendre le fait que la rupture peut avoir lieu dans deux zones différentes, le point chaud a été mesuré pour plusieurs cas de durée de vie, tel que montré dans la figure 5.34. Nous observons que pour des faibles durées de vie (de l'ordre des milliers de cycles) la rupture a lieu au niveau de la première zone convergente et pour des durées de vie plus importantes, la rupture a lieu au niveau de la deuxième zone divergente (ligne de givrage). La boîte de protection utilisée s'est déplacée lors de la rupture pour le cas de l'éprouvette ayant une durée de vie de 100023 cycles, ce qui explique l'image tronquée obtenue. La figure 5.35 montre que le point chaud (pour des faibles durées de vie) est bien corrélé avec la zone de localisation de la déformation quelques cycles avant la rupture, ce qui permet de justifier que le point chaud est la signature thermique d'un endommagement local. Nous rappelons que le champ de température est mesuré sur la face opposée de l'éprouvette par rapport à celle où le champ de déformation est mesuré. La figure 5.36a montre qu'il y a une très bonne répétabilité de la mesure de l'énergie dissipée par cycle au niveau de la zone de rupture 1 (première zone convergente) et la zone de rupture 2 (deuxième zone divergente). Cette répétabilité est aussi constatée entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue. Il n'est donc pas nécessaire de mesurer systématiquement le point chaud pour la mise en place du critère de fatigue. La figure 5.36b montre les régimes observés dans le graphique présentant l'énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud (pour la zone de rupture 1) en fonction de l'amplitude d'effort en spécifiant la transition entre le premier et le deuxième régime. Finalement, la figure 5.36c montre le critère de fatigue et les essais de fatigue classiques réalisés. La zone de rupture est spécifiée pour chaque essai de fatigue. Nous constatons une bonne corrélation entre le critère de fatigue (identifiée avec l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone de rupture 1) et les essais de fatigue.

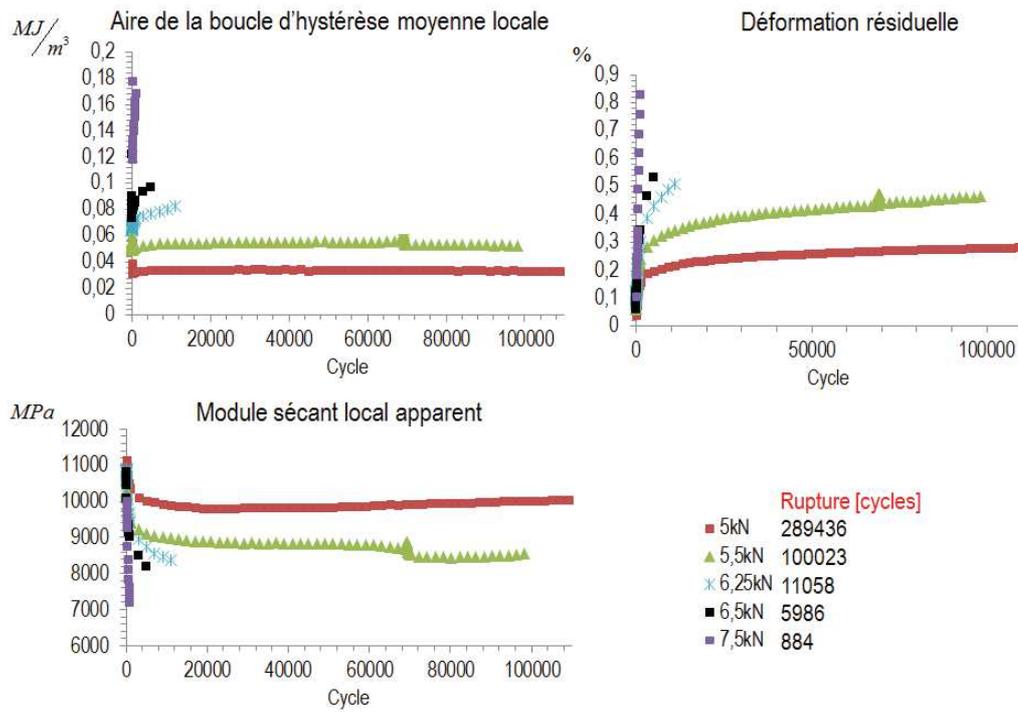


FIGURE 5.29 – Évolutions de l’aire de la boucle d’hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour des essais de fatigue classiques (présentées en fonction de l’amplitude d’effort). R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

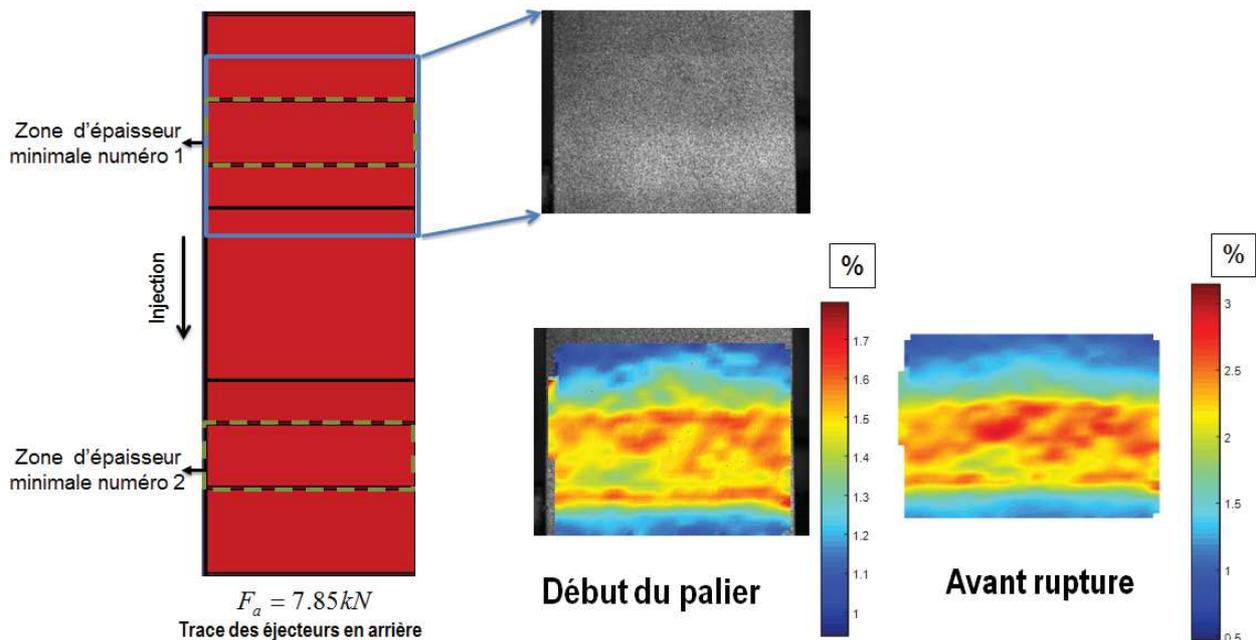


FIGURE 5.30 – Composante yy du champ de déformation surfacique (avec y la direction du chargement) pour un essai de fatigue classique. Durée de vie 382 cycles. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

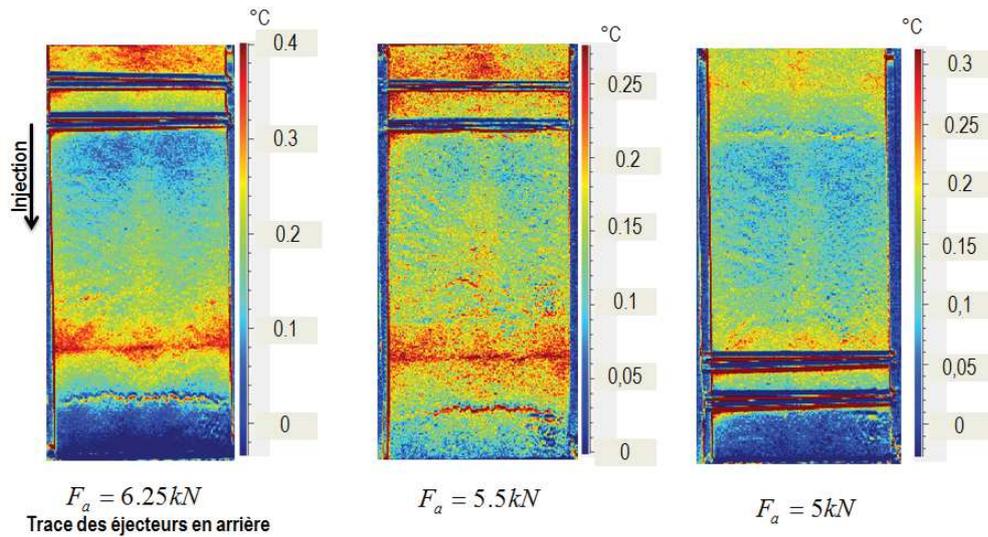
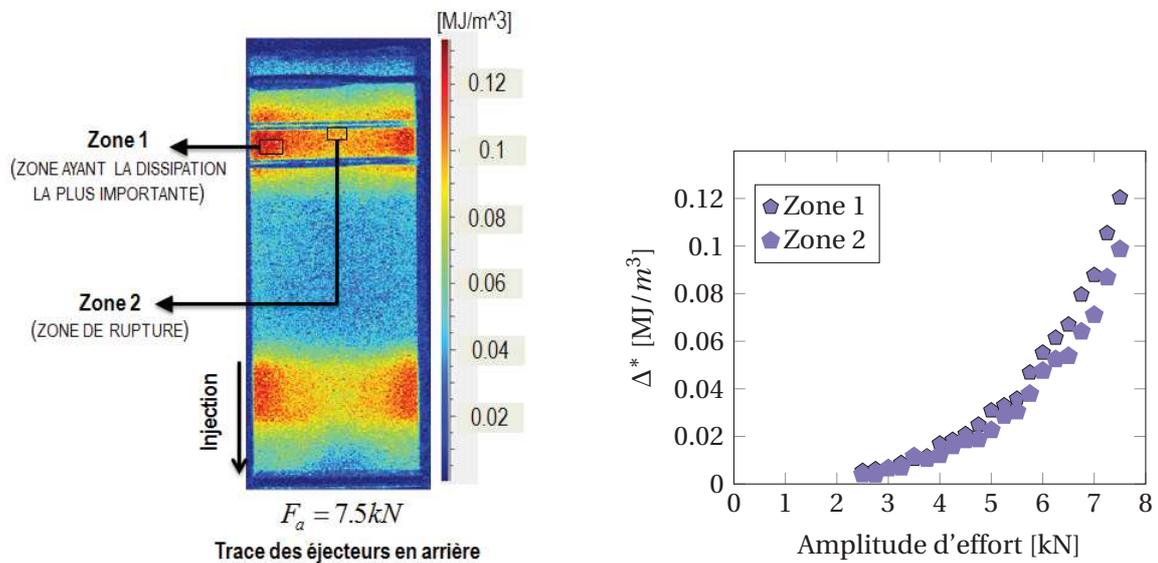


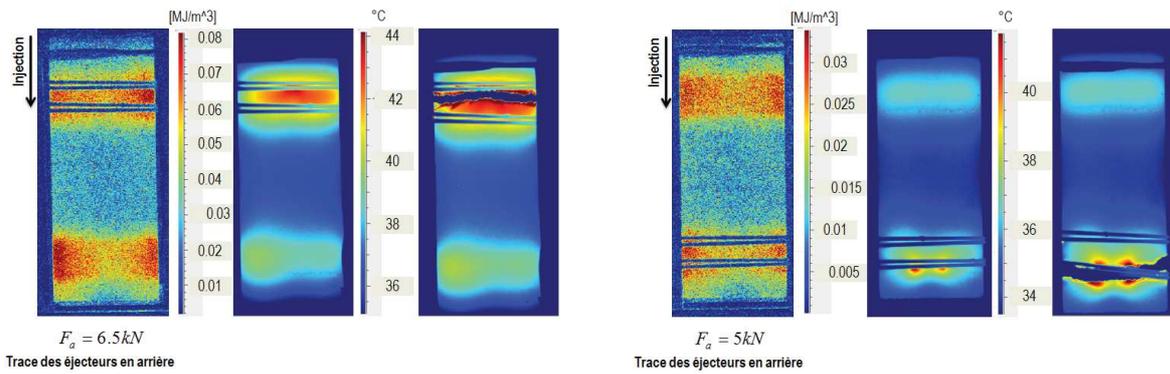
FIGURE 5.31 – Champ de couplage thermoélastique pour trois niveaux d'amplitude d'effort. $R=0$, RH50, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.



(a) Champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier de chargement.

(b) Comparaison entre les zones.

FIGURE 5.32 – Énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone ayant la dissipation la plus importante et au niveau de la zone de rupture lors d'un essai d'auto-échauffement. $R=0$, RH50, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.



(a) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud (rupture au niveau de la première zone convergente). Durée de vie : 5986 cycles.

(b) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud (rupture au niveau de la deuxième zone divergente). Durée de vie : 289436 cycles.

FIGURE 5.33 – Localisation du point chaud pour deux cas de durée de vie. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

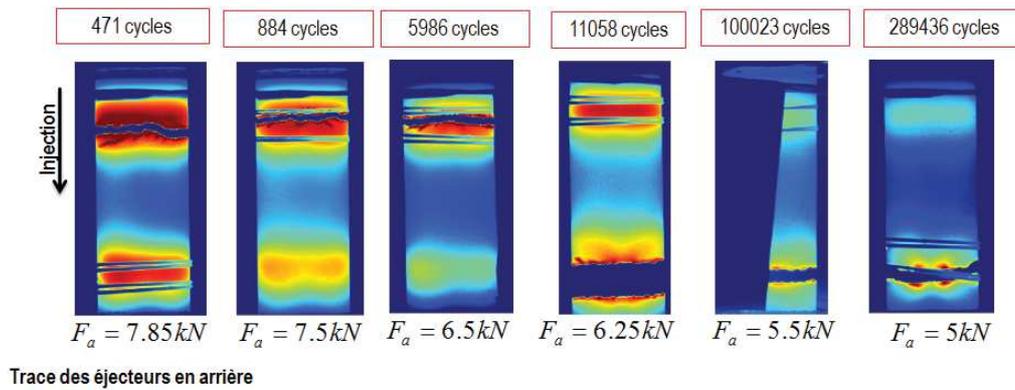


FIGURE 5.34 – Zone de rupture en fonction de la durée de vie. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

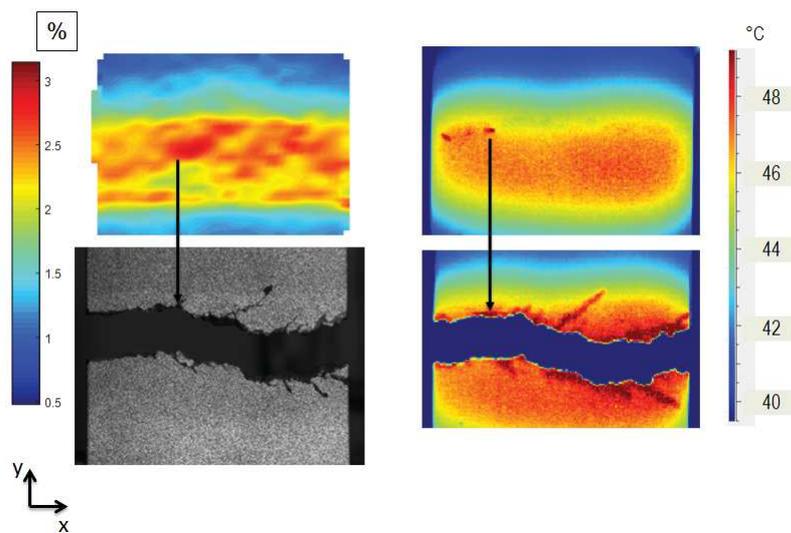
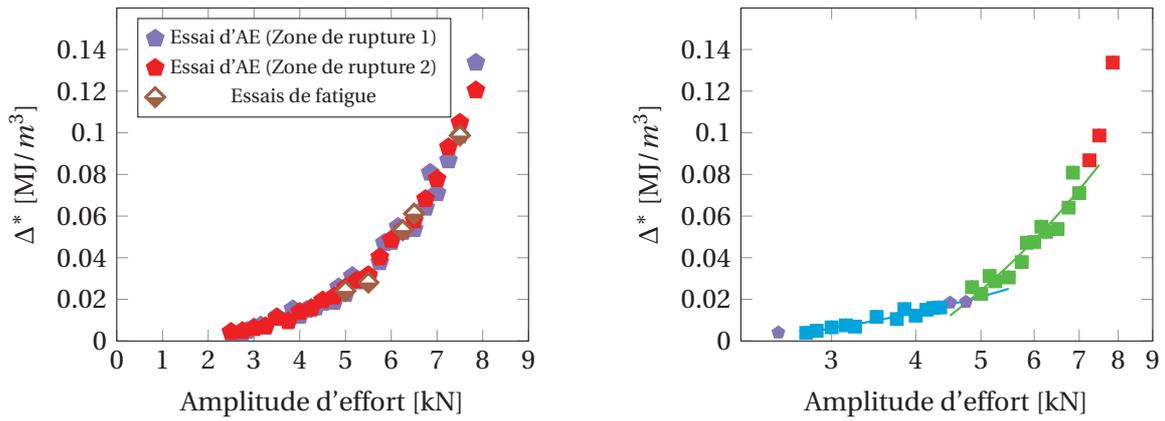
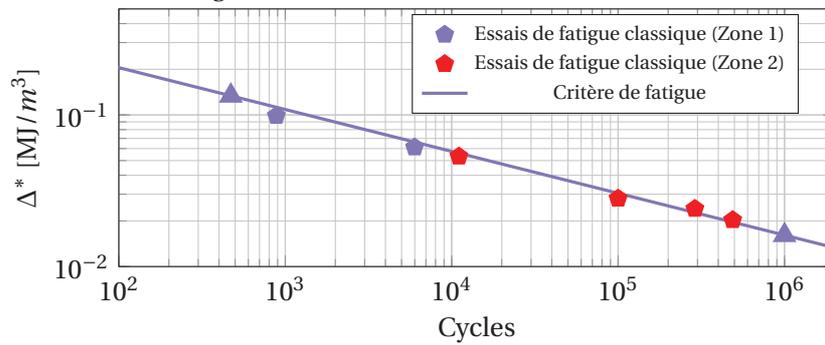


FIGURE 5.35 – Corrélation entre le point chaud et la localisation de la déformation quelques cycles avant rupture (la zone observée est montrée sur la figure 5.30). Durée de vie 382 cycles. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.



(a) Répétabilité de l'énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue.

(b) Régimes observés pour l'identification du critère de fatigue (zone de rupture 1).



(c) Courbe de Wöhler en fonction de Δ^* (en spécifiant la zone de rupture).

FIGURE 5.36 – Identification du critère de fatigue. R=0, RH50, f=1Hz et température ambiante.

5.4.2 Résultats des essais réalisés à température ambiante, R=0 et DAM.

La figure 5.37 montre le champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement et la localisation du point chaud (zone d'initiation) quelques cycles avant la rupture. Cette figure est une vue globale (thermique) du comportement en fatigue de l'éprouvette. Par rapport au cas RH50, nous pouvons remarquer que le champ d'énergie dissipée par cycle reste hétérogène au niveau des zones d'épaisseur minimale de l'éprouvette, mais celui-ci n'est plus symétrique par rapport à la largeur de l'éprouvette. Dans le cas présenté, nous constatons que le point chaud apparaît au niveau de la première zone convergente à l'endroit précis où l'énergie dissipée par cycle est maximale. La figure 5.38 montre les évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale (h_{ml}), du module sécant local apparent (E_{sla}) et de la déformation résiduelle (ϵ_r) lors de chaque palier d'un essai auto-échauffement. Nous constatons un comportement similaire à celui du cas RH50 puisque h_{ml} et E_{sla} atteignent une valeur quasi-constante à partir du quatrième cycle. Le comportement de ϵ_r est aussi similaire à celui du cas RH50. La figure 5.39 montre les évolutions des données mécaniques pour les essais de fatigue classiques où nous pouvons observer que le comportement reste similaire à celui du cas RH50, c'est-à-dire que h_{ml} et E_{sla} sont quasi-constants pendant toute la durée de vie en fatigue lorsque celle-ci est de l'ordre de 10^4 cycles ou plus.

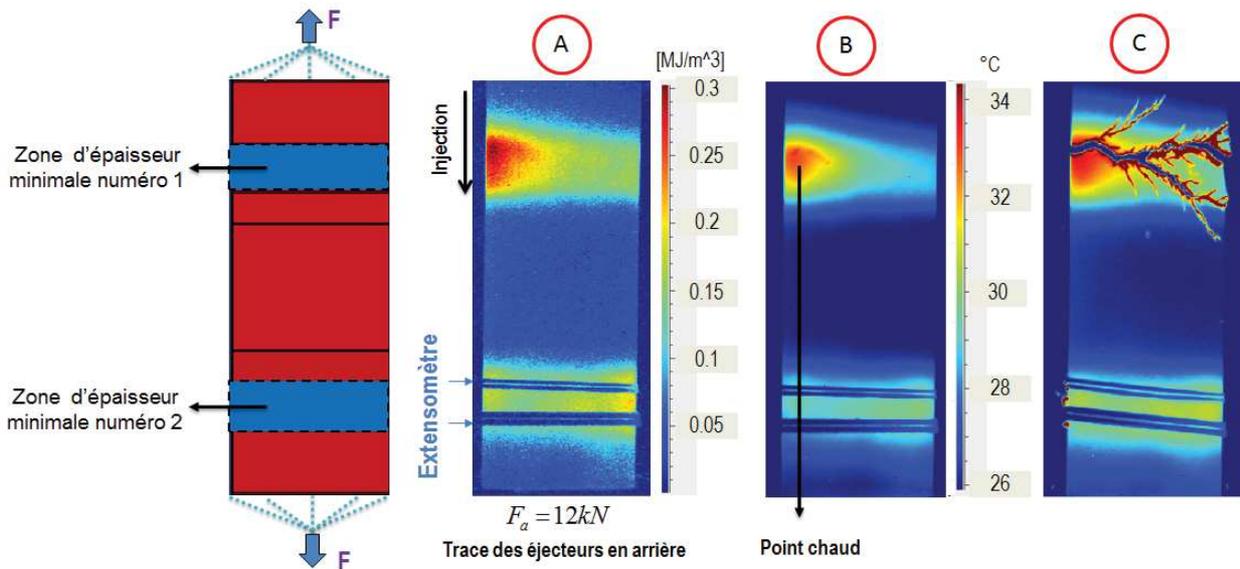


FIGURE 5.37 – A-champ d'énergie dissipée par cycle, B-localisation du point chaud quelques cycles avant la rupture et C- image thermique immédiatement après la rupture. Durée de vie 62 cycles. R=0, DAM, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.40 montre le champ de couplage thermoélastique pour deux niveaux d'amplitude d'effort. Nous pouvons observer que le couplage thermoélastique est maximum au niveau des zones convergentes. La ligne au niveau de la zone divergente où le couplage thermoélastique est plus important par rapport à son voisinage est également détectée.

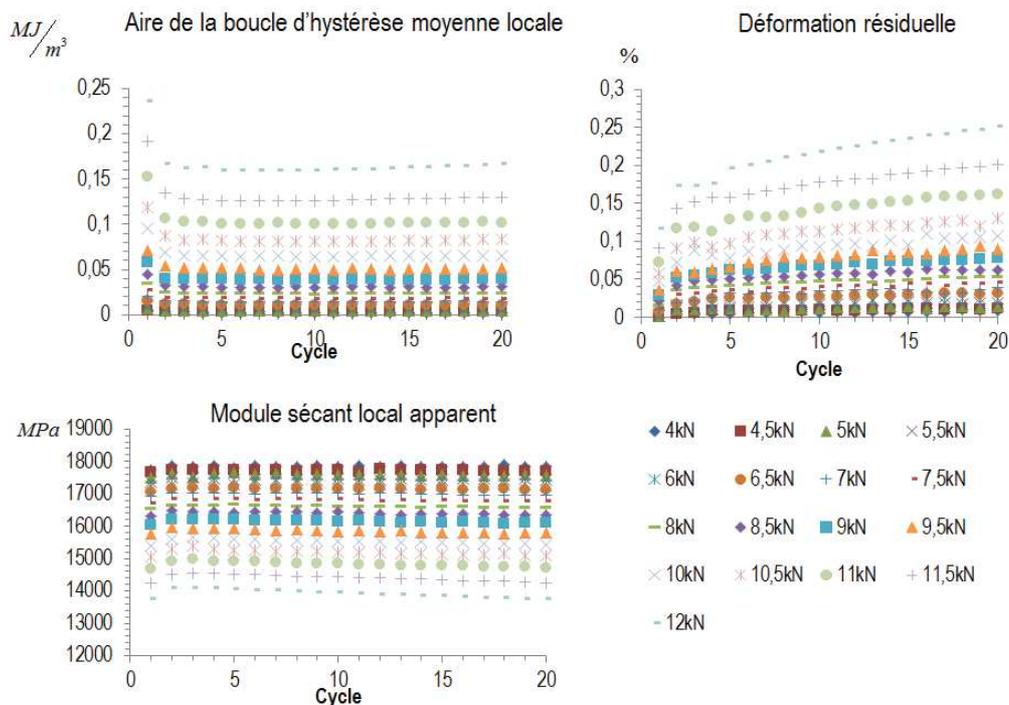


FIGURE 5.38 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour chaque palier d'un essai d'auto-échauffement (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). R=0, DAM, f=1Hz et température ambiante.

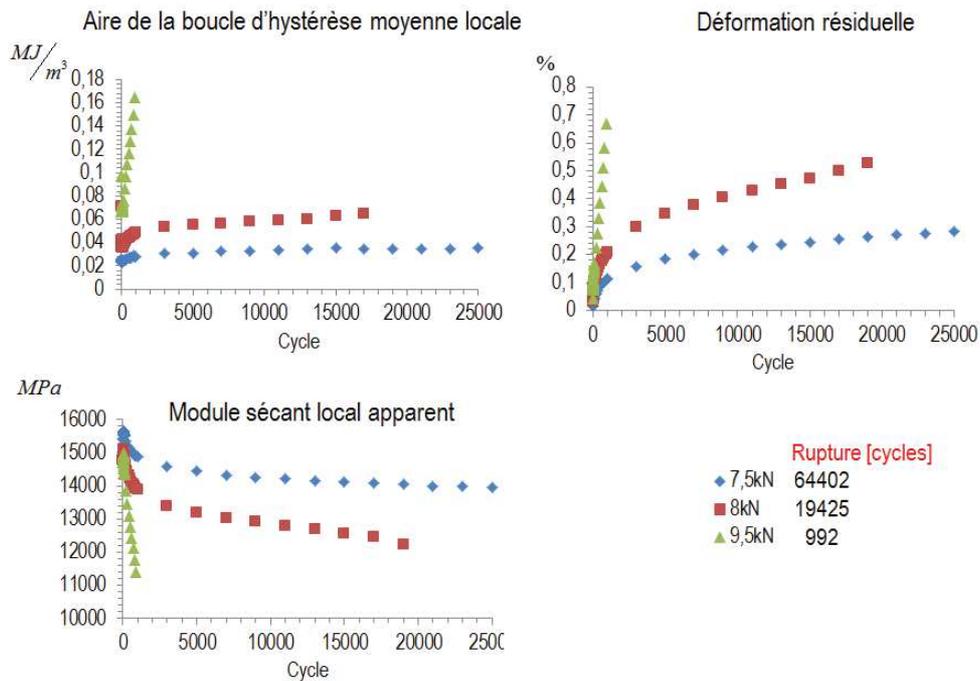


FIGURE 5.39 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour des essais de fatigue classiques (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). $R=0$, DAM, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

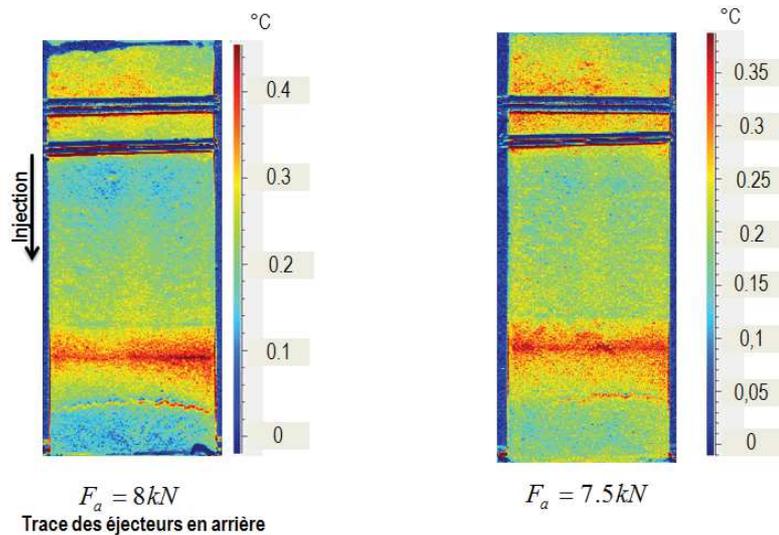
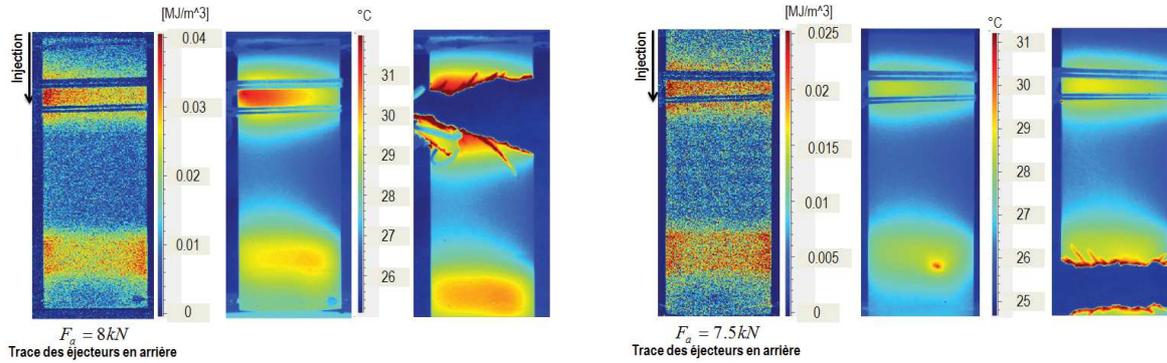


FIGURE 5.40 – Champ de couplage thermoélastique pour deux niveaux d'amplitude d'effort. $R=0$, DAM, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

La figure 5.41 montre le champ d'énergie dissipée par cycle et le point chaud pour deux cas de durée de vie. Nous observons le même comportement que pour le cas RH50, c'est-à-dire que la rupture peut avoir lieu dans deux zones différentes, qui sont la première zone convergente (zone où l'énergie dissipée par cycle est maximale) et la deuxième zone divergente (ligne de givrage). Le temps entre l'apparition du point chaud et la rupture de l'éprouvette est toujours négligeable par rapport à la durée de vie de l'éprouvette ($< 1\%$ de la durée de vie), nous supposons donc que la phase de propagation de la fissure est très rapide. Le point chaud a été mesuré pour plusieurs

cas de durée de vie, tel que montré dans la figure 5.42. Nous observons que pour des faibles durées de vie (de l'ordre de quelques milliers de cycles) la rupture a lieu au niveau de la première zone convergente et pour une durée de vie plus importante, la rupture semble avoir lieu au niveau de la deuxième zone divergente (zone de givrage).



(a) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud (rupture au niveau de la première zone convergente). Durée de vie : 19425 cycles.

(b) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud (rupture au niveau de la deuxième zone divergente). Durée de vie : 64402 cycles.

FIGURE 5.41 – Localisation du point chaud pour deux cas de durée de vie. R=0, DAM, f=1Hz et température ambiante.

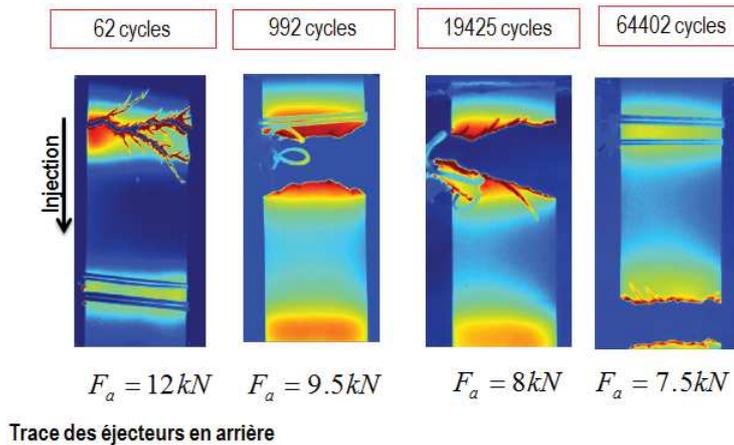
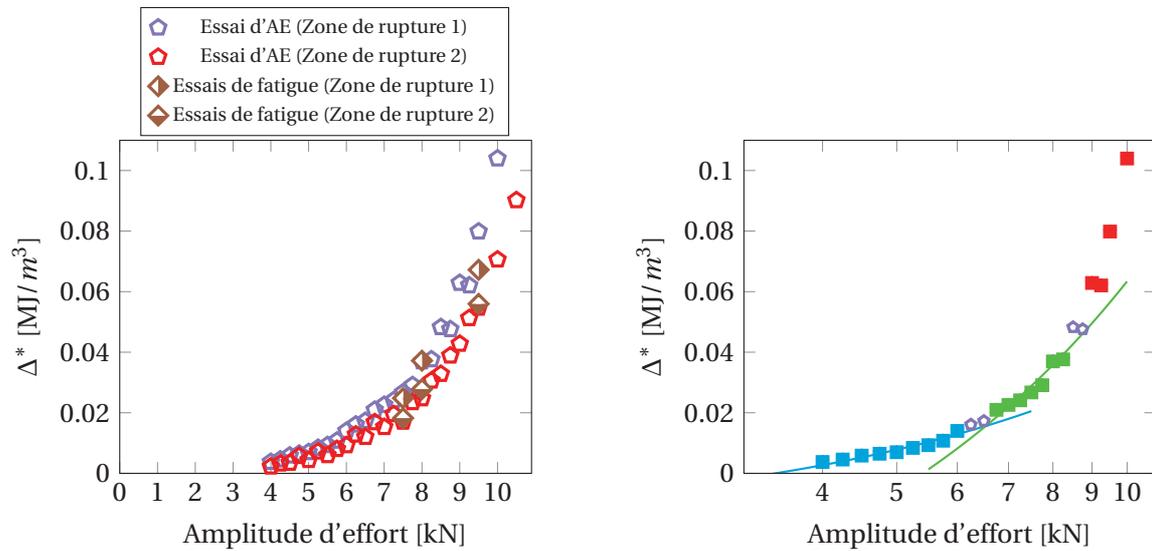


FIGURE 5.42 – Zone de rupture en fonction de la durée de vie. R=0, DAM, f=1Hz et température ambiante.

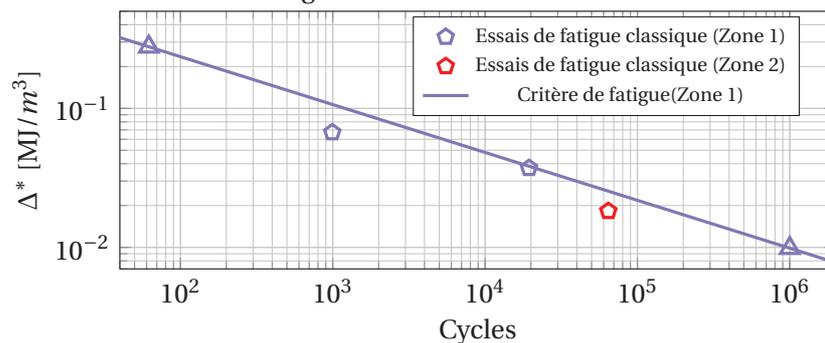
La figure 5.43a montre l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de chacune des zones de rupture pour les essais de fatigue et l'essai d'auto-échauffement. Nous constatons que pour la zone de rupture 1 (première zone convergente) l'énergie dissipée par cycle est toujours plus importante par rapport à la zone de rupture 2 (deuxième zone divergente). Les régimes de fatigue sont identifiés à partir de l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone de rupture 1, tel que montré dans la figure 5.43b, la transition entre le premier et le deuxième régime est aussi montrée. Finalement, la figure 5.43c montre le critère de fatigue et les essais de fatigue classiques réalisés, la zone de rupture est spécifiée pour chaque essai de fatigue. Nous constatons une bonne corrélation entre le critère de fatigue (identifiée avec l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone de rupture 1) et les essais de fatigue. Nous observons que la différence de

localisation des zones de rupture n'a pas d'influence remarquable vis-à-vis du critère de fatigue. Cependant, il faut réaliser plus d'essais de fatigue pour mieux évaluer la dispersion pour des longues durées de vie.



(a) Répétabilité de la mesure de l'énergie dissipée par cycle au niveau du point chaud entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue.

(b) Régimes observés pour l'identification du critère de fatigue (zone de rupture 1).



(c) Courbe de Wöhler en fonction de Δ^* (en spécifiant la zone de rupture).

FIGURE 5.43 – Identification et validation du critère de fatigue. R=0, DAM, f=1Hz et température ambiante.

5.4.3 Bilan sur les éprouvettes Wavy 2

Résultats et comparaison entre les teneurs en humidité (RH50 et DAM)

La figure 5.44 montre la comparaison en terme d'énergie dissipée par cycle, champ d'énergie dissipée par cycle et critère de fatigue des deux cas de teneur en humidité étudiées pour les éprouvettes Wavy 2. Les conclusions de cette comparaison sont :

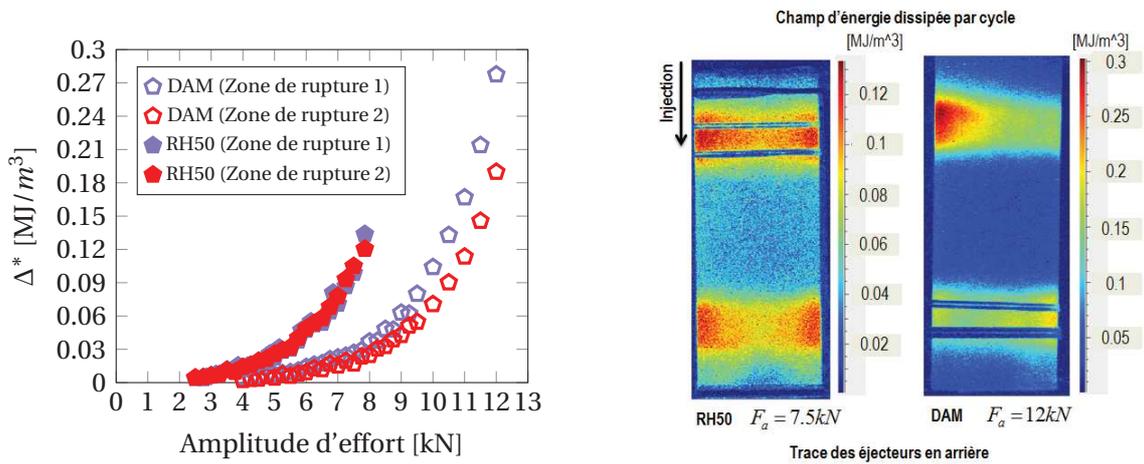
- l'allure du champ d'énergie dissipée par cycle est différente pour chaque cas de teneur en humidité considérée. Celui-ci est symétrique par rapport à la largeur de l'éprouvette pour le cas RH50 et non symétrique pour le cas DAM. Comme pour les éprouvettes Wavy 1, le fait qu'il ne soit pas symétrique est étonnant parce que la microstructure prédite (cf.

Fig.3.11) est bien symétrique par rapport à la largeur de l'éprouvette. Cette différence peut être due à des contraintes résiduelles présentes dans l'éprouvette sèche, lesquelles sont relaxées lorsque l'éprouvette absorbe de l'eau ;

- la zone de rupture dépend du niveau de sollicitation (ou bien de la durée de vie). Pour des chargements faibles, la rupture semble pilotée par la propagation d'un défaut surfacique présent à l'état initial (givrage). Pour des chargements importants, la rupture apparaît au niveau de la première zone convergente (zone sans givrage), la rupture semble donc pilotée par une plastification ou par l'action d'un défaut local ;
- la zone ayant la dissipation la plus importante n'est pas la zone de rupture pour les deux cas de teneur en humidité (sauf pour le cas DAM pour des faibles durées de vie). Comme pour les éprouvettes Wavy 1, cela peut être dû à la variation locale de l'orientation ;
- les prédictions du critère de fatigue sont très bonnes pour chaque cas de teneur en humidité. Le critère donne de bonnes prédictions, même pour des zones de rupture différentes, avec et sans défaut de surface (givrage) ;
- les critères de fatigue identifiés pour chaque cas de teneur en humidité ne sont pas unifiés (écart entre les critères pouvant dépasser une demi-décade pour le même niveau de Δ^*). Mais, ceux-ci sont plus proches que dans le cas des éprouvettes Wavy 1.

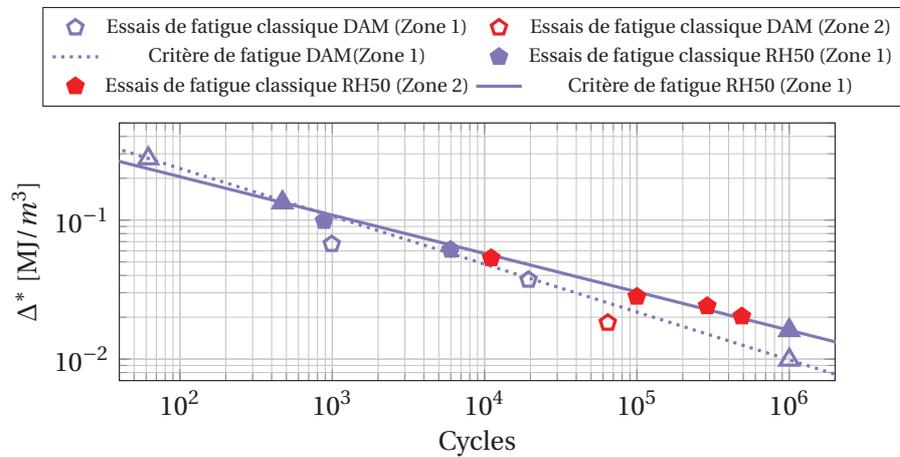
Comparaison entre les éprouvettes Wavy 2 RH50 et les éprouvettes Dogbone 0° RH50

La figure 5.45 montre la comparaison des courbes de fatigue en fonction de Δ^* entre les éprouvettes Wavy 2 (en spécifiant la zone de rupture) et l'éprouvette Dogbone 0° pour une teneur en humidité RH50. Nous pouvons observer que les critères de fatigue sont proches (moins d'une demi-décade pour le même niveau de Δ^*). Ceci est une deuxième vérification que le critère de fatigue identifié sur des éprouvettes simples est valide pour des éprouvettes plus complexes (même avec la présence du défaut surfacique). Notons que la microstructure prédite des éprouvettes Wavy 2 (cf. Fig.3.11) est majoritairement orientée à 0° au niveau de la peau.



(a) Énergie dissipée par cycle calculée au niveau de chacune des zones de rupture pour chaque cas de teneur en humidité.

(b) Champ d'énergie dissipée par cycle pour chaque teneur en humidité considérée.



(c) Comparaison des courbes de fatigue en fonction de Δ^* pour chaque cas de teneur en humidité.

FIGURE 5.44 – Comparaison des résultats en fonction de la teneur en humidité. R=0, f=1Hz et température ambiante.

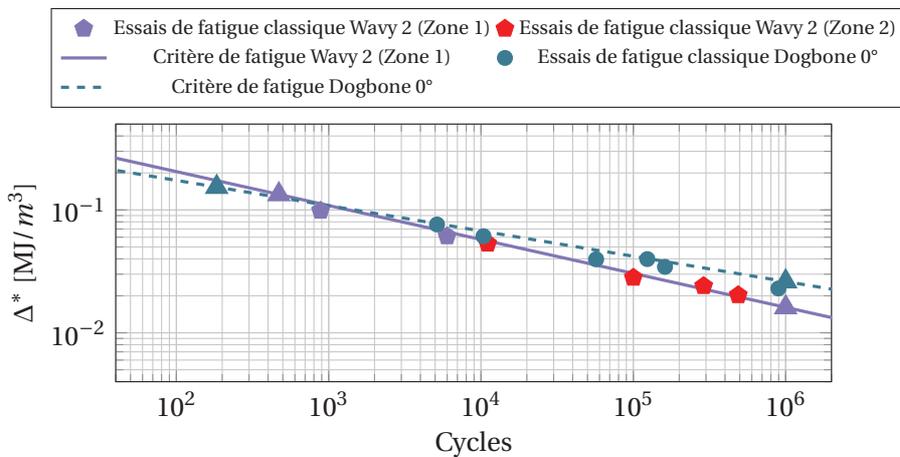


FIGURE 5.45 – Comparaison des courbes de fatigue en fonction de Δ^* entre les éprouvettes Wavy 2 et les éprouvettes Dogbone 0°. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

5.5 Éprouvettes T-Bone 1A et 1B

L'objectif de ces éprouvettes est de ressembler aux nervures des pièces réelles. Ces éprouvettes ont été conçues de façon à pouvoir être sollicitées en traction cyclique et en flexion cyclique (les conditions de chargement seront montrées par la suite). Cette section est consacrée à la présentation des résultats pour les deux façons d'injecter les éprouvettes. Les résultats des essais de traction seront d'abord présentés, puis ceux des essais de flexion. Une seule teneur en humidité a été étudiée (RH50). Il faut remarquer que, pour les éprouvettes T-Bone, nous n'observons pas des défauts de givrage.

5.5.1 Résultats des essais réalisés en traction cyclique à température ambiante, R=0 et RH50

Pour le cas des essais réalisés en traction, la zone considérée critique en termes de gradients mécaniques est la zone de jonction entre la tige et la semelle. Cette zone peut être observée du côté de la tige ou sur la face opposée à celle-ci. L'ensemble des résultats seront présentés en spécifiant le côté observé.

Éprouvettes T-Bone 1A

Pour les éprouvettes T-bone 1A, plusieurs points chauds sont observés quelques cycles avant la rupture. La figure 5.46 montre le champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement (Fig. A) et la localisation des points chauds quelques cycles avant la rupture (Fig. B, l'éprouvette est observée avec la tige devant). Cette figure est une vue globale (thermique) du comportement en fatigue de l'éprouvette, car le champ d'énergie dissipée par cycle est calculé au début du palier et les points chauds sont mesurés quelques cycles avant la rupture. Il faut remarquer que pour mieux observer les zones à côté de la tige, celle-ci a été découpée à mi-hauteur. Nous pouvons observer que le champ d'énergie dissipée par cycle est maximum au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle et au niveau de la zone où l'éprouvette est prise dans les mors. Il est important de remarquer que les zones de dissipation importante existent au voisinage des 2 mors, mais sont visibles ou non suivant la position de la boîte de confinement. Les points chauds observés apparaissent des deux côtés de la tige par rapport à la longueur de l'éprouvette dans les zones où l'énergie dissipée par cycle est maximale. Cette première figure pose une question qui sera abordée par la suite : est-ce que le fait d'observer deux points chauds est le signe d'un comportement en fatigue ayant plusieurs zones d'initiation ? La figure 5.47 montre les évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale (h_{ml}), du module sécant local apparent (E_{sla}) et de la déformation résiduelle (ϵ_r) lors de chaque palier d'auto-échauffement considéré. Nous pouvons observer que h_{ml} et E_{sla} atteignent une valeur quasi-constante à partir du quatrième cycle, ce qui nous permet de dire (au moins de façon globale) que l'énergie dissipée par cycle est constante à partir du quatrième cycle. Le choix de la méthode présentée dans le chapitre 4 pour l'obtention de l'énergie dissipée par cycle est justifiée. Dans le cas de ces éprouvettes les point chauds apparaissent dans la zone comprise entre les couteaux de l'extensomètre (dans la largeur). C'est pourquoi les données fournies par l'extensomètre sont plus représentatives du comportement local en fatigue que

pour les éprouvettes Wavy 1 et Wavy 2. Nous observons également que ε_r n'atteint pas une valeur constante, mais que la cinétique d'évolution est plus lente à partir du quatrième cycle.

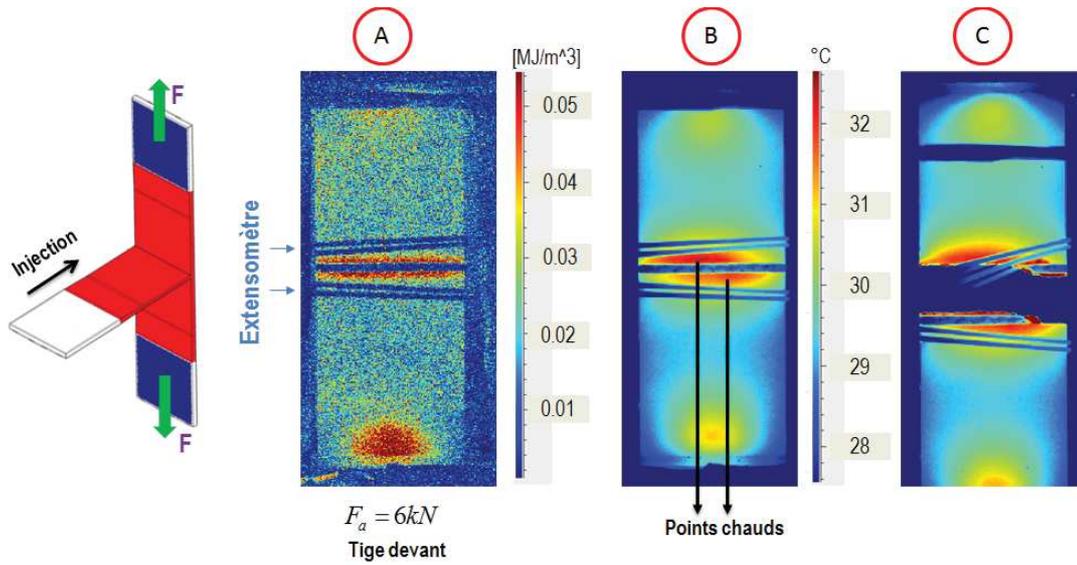


FIGURE 5.46 – A-champ d'énergie dissipée par cycle, B-localisation des points chauds quelques cycles avant la rupture et C- image thermique immédiatement après la rupture. Durée de vie 815 cycles. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

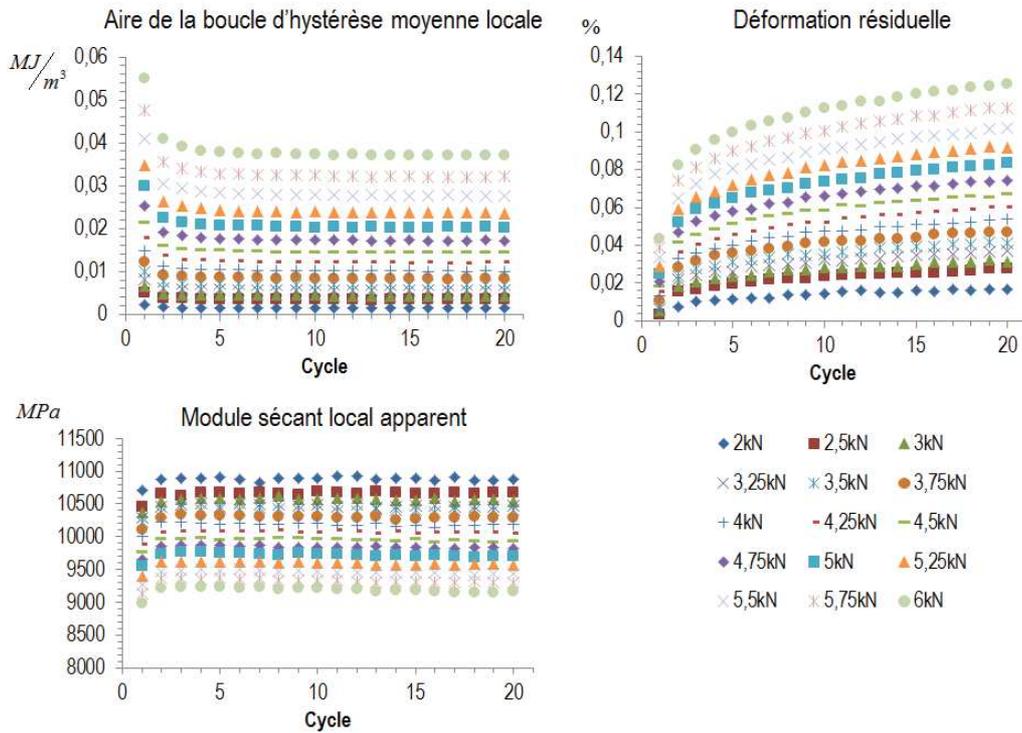


FIGURE 5.47 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour chaque palier d'un essai d'auto-échauffement (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

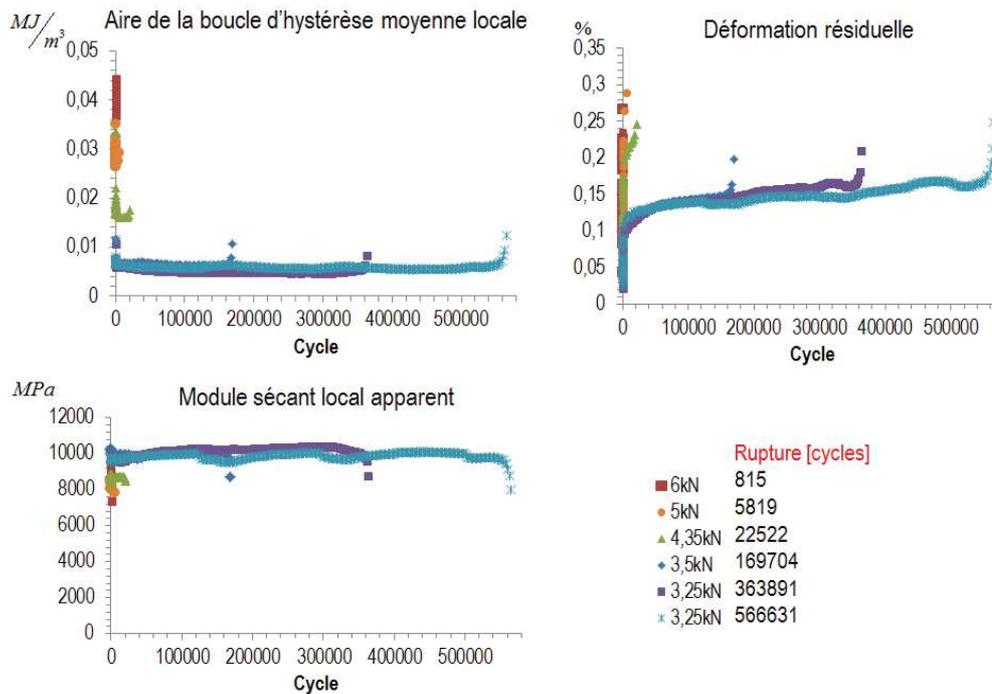


FIGURE 5.48 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour des essais de fatigue classiques (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

Les données mécaniques ont aussi été étudiées pour des essais de fatigue classiques, tel que montré sur la figure 5.48, où nous pouvons observer que h_{ml} et E_{sla} sont quasi-constants pendant la majorité de la durée de vie en fatigue lorsque celle-ci est de l'ordre de 10^4 cycles ou plus. L'énergie dissipée par cycle calculée au début de l'essai de fatigue peut donc être considérée comme représentative de l'ensemble de l'essai pour des durées de vie de l'ordre de quelques dizaines de milliers de cycles ou plus. Quelques cycles avant la rupture nous constatons une diminution remarquable de E_{sla} (ou une augmentation de h_{ml}), ce comportement est lié à la perte de raideur de l'éprouvette due à la fissuration par fatigue (constat qui sera montré par la suite). Puisque les points chauds apparaissent entre les couteaux de l'extensomètre, celui-ci est capable de capter la perte de raideur. Pour le cas de ϵ_r , une évolution est constatée pour chaque niveau de durée de vie considéré, mais la cinétique d'évolution semble être moins marquée pour des durées de vie de l'ordre de 10^4 cycles ou plus. En outre, la fissuration par fatigue est aussi visible sur l'évolution de ϵ_r . La figure 5.49 montre le champ de couplage thermoélastique pour deux niveaux d'amplitude d'effort. Nous pouvons observer que le couplage thermoélastique est maximum au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle (dans la même zone où l'énergie dissipée par cycle est maximale) et que celui-ci est symétrique par rapport à la tige. Ceci paraît logique car l'injection a lieu par la tige et l'écoulement est symétrique. La figure 3.16a montre ainsi que les prédictions du tenseur d'orientation sont symétriques. La figure 5.50 montre l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle lorsque la tige est devant ou derrière dans la zone observée lors d'essais d'auto-échauffement. Nous pouvons observer jusqu'à $F_a = 6kN$, que l'énergie dissipée par cycle est plus importante lorsque la tige est devant la zone observée. C'est pourquoi nous considérons que la zone critique en terme de fatigue se trouve du côté de la tige. L'ensemble des essais de fatigue ont donc été

observés avec la tige en face visible.

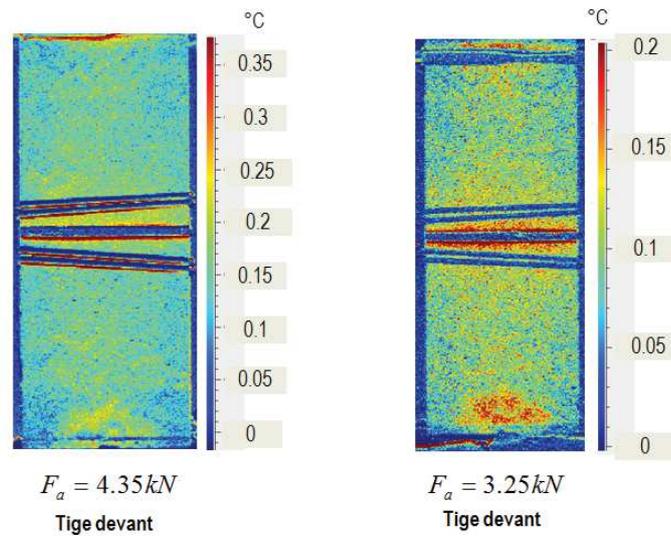


FIGURE 5.49 – Champ de couplage thermoélastique pour deux niveaux d’amplitude d’effort. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

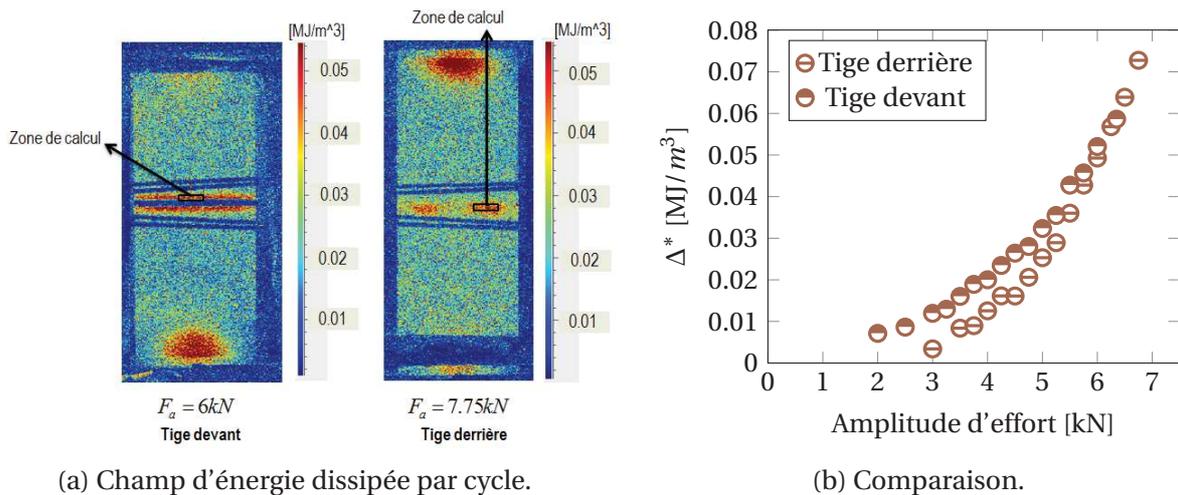
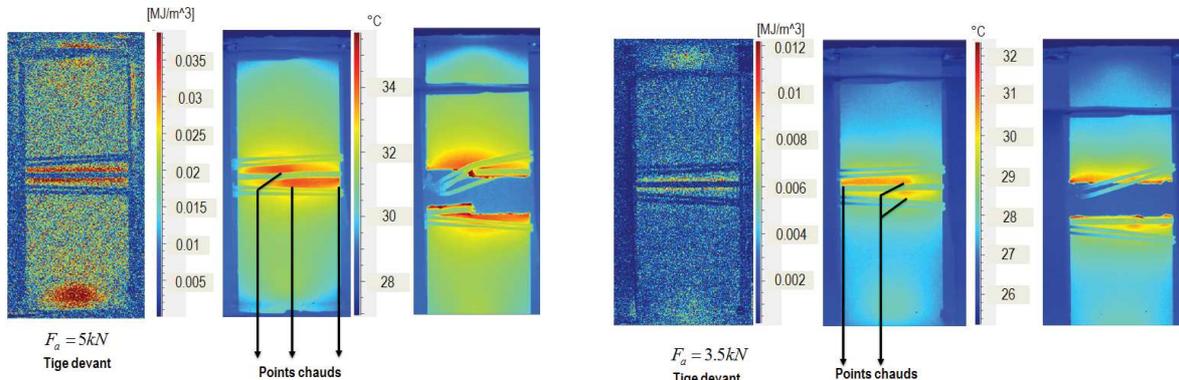


FIGURE 5.50 – Énergie dissipée par cycle mesurée au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle lorsque la tige est devant ou derrière la zone observée. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

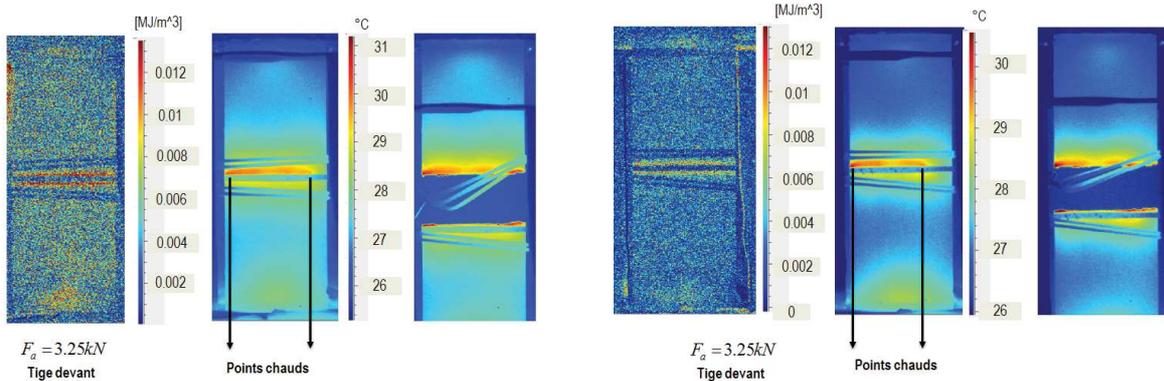
Les points chauds ont été étudiés pour plusieurs cas de durée de vie, tel que montré sur la figure 5.51. Nous constatons que l’apparition de deux ou trois points chauds quelques cycles avant la rupture est toujours observée (indépendamment de la durée de vie). Il ne semble pas y avoir un côté préférentiel par rapport à la tige où les points chauds apparaissent. Nous observons même quelques éprouvettes où ceux-ci apparaissent des deux côtés de la tige. Contrairement aux éprouvettes Wavy 1 et Wavy 2, nous avons observé que le temps entre l’apparition des points chauds et la rupture de l’éprouvette est plus long, ce qui pourrait être le signe d’une phase de propagation de fissure non négligeable. L’évolution des données mécaniques présentée sur la figure 5.48 montre que la perte de rigidité de l’éprouvette avant la rupture est constatée pendant un pourcentage de la durée de vie non négligeable (jusqu’à 10% de la durée de vie). Ceci pourrait

être un autre signe d'une phase de propagation de fissure non négligeable. Pour approfondir le scénario d'endommagement en fatigue (initiation, propagation et rupture) nous avons étudié l'évolution d'une variable supplémentaire pendant la durée de vie de l'éprouvette, à savoir le couplage thermoélastique.



(a) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation des points chauds. Durée de vie : 5819 cycles.

(b) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation des points chauds. Durée de vie : 169704 cycles.



(c) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation des points chauds. Durée de vie : 363891 cycles.

(d) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation des points chauds. Durée de vie : 566631 cycles.

FIGURE 5.51 – Localisation des points chauds pour quatre cas de durée de vie. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

Les figures 5.52 et 5.53 montrent l'évolution de la température moyennée dans trois zones comprises entre les points chauds observés pour un certain nombre de cycles avant la rupture. Cette évolution nous permet d'apprécier les changements du couplage thermoélastique (évolution de l'amplitude du signal de température) qui surviennent pendant la durée de vie de l'éprouvette. En dessous, nous montrons l'évolution du champ de couplage thermoélastique entre l'état initial et quelques cycles avant la rupture. Nous pouvons clairement observer que le couplage thermoélastique chute dans une zone bien précise un certain nombre de cycles avant la rupture et que cette zone s'élargit progressivement. Cette chute est associée à une fissuration. Nous pouvons remarquer que les points chauds observés quelques cycles avant la rupture semblent corrélés aux extrémités de la zone où le couplage thermoélastique a chuté à la fin de l'essai. Ces observations montrent qu'il y a une étape de propagation non négligeable pour ces éprouvettes. Le nombre de cycles de l'étape de propagation semble être corrélé au nombre de cycles durant

lesquels l'éprouvette présente une perte de raideur (cf. Fig. 5.48), c'est-à-dire, au maximum 10% de la durée de vie. Pour la mise en place du critère de fatigue, le calcul de l'énergie dissipée par cycle sera réalisé au niveau de la zone d'initiation.

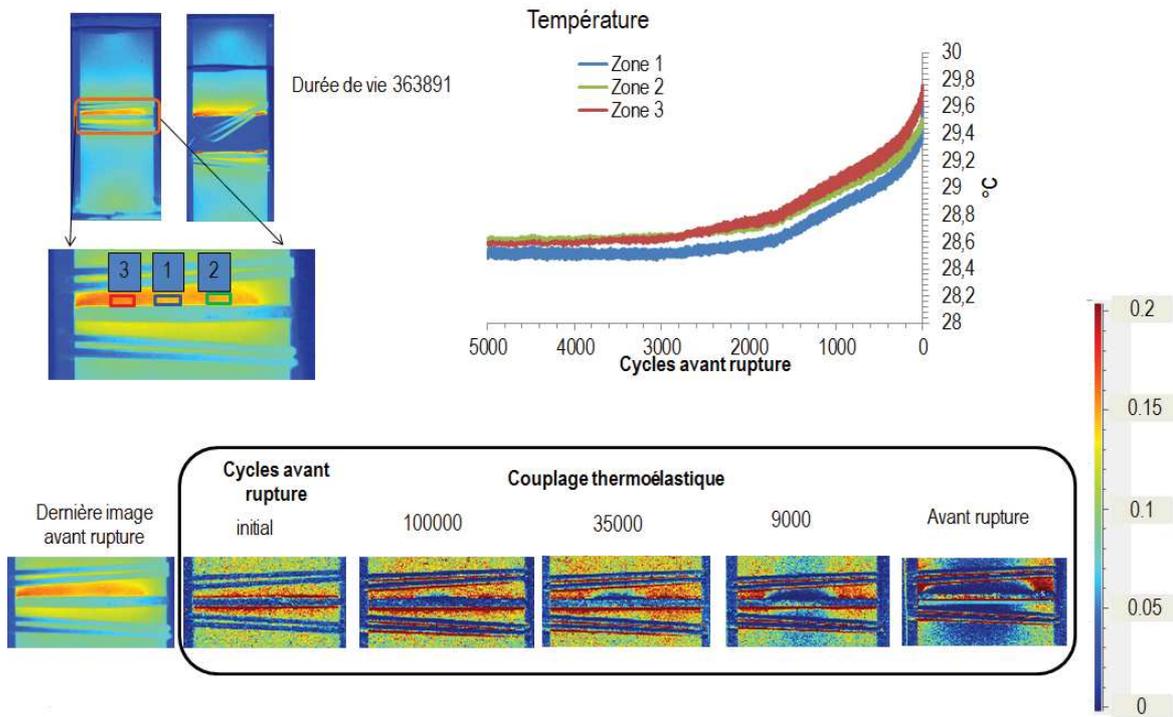


FIGURE 5.52 – Évolution du couplage thermoélastique lors d'un essai de fatigue. Durée de vie 363891 cycles.

La figure 5.54a montre qu'il y a une très bonne répétabilité de l'énergie dissipée par cycle au niveau de la zone d'initiation entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue. Il n'est donc pas nécessaire de mesurer systématiquement la zone d'initiation pour la mise en place du critère de fatigue. La figure 5.54b montre les régimes observés dans le graphique présentant l'énergie dissipée par cycle au niveau de la zone d'initiation en fonction de l'amplitude d'effort en spécifiant la transition entre le premier et le deuxième régime. Finalement, la figure 5.54c montre le critère de fatigue et les essais de fatigue classique réalisés. Nous constatons une bonne corrélation entre les deux.

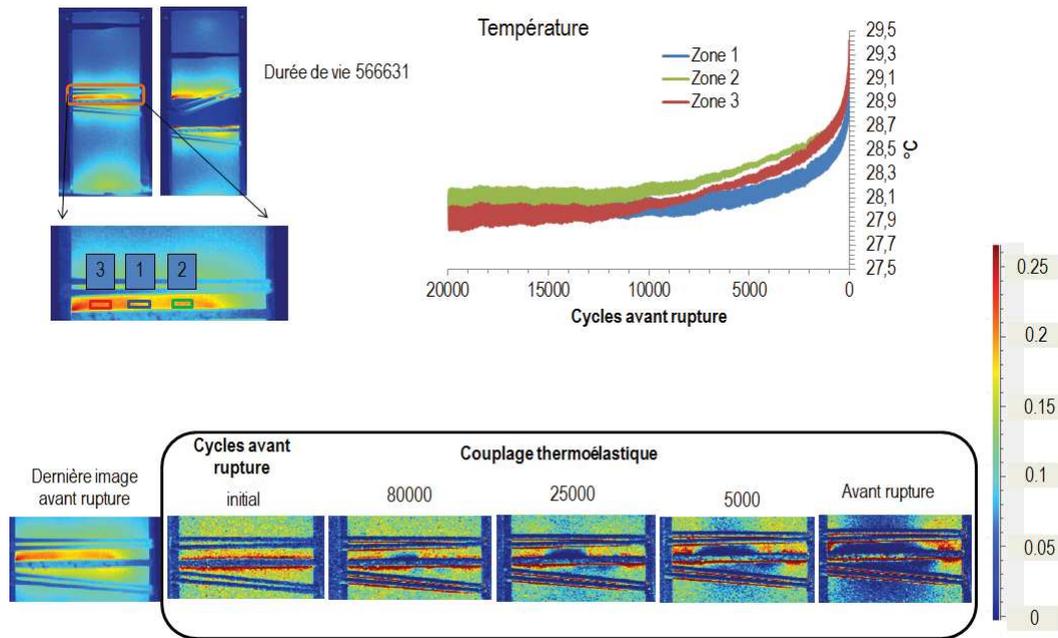
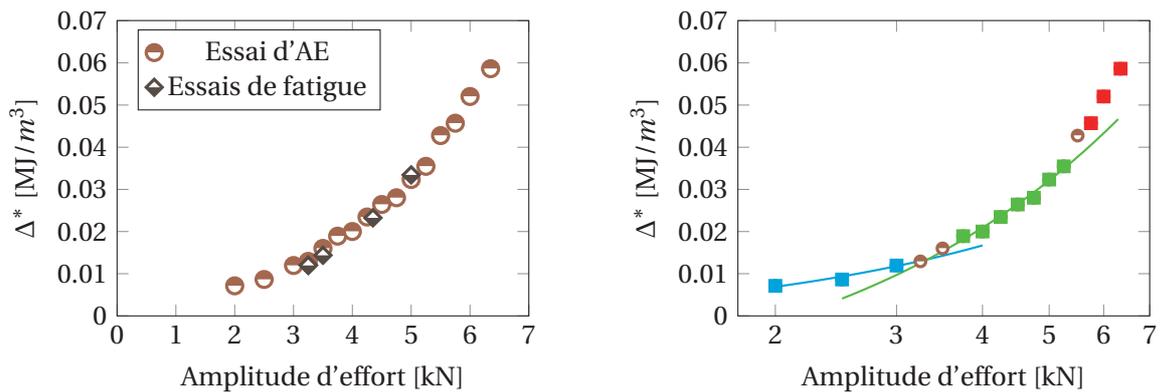
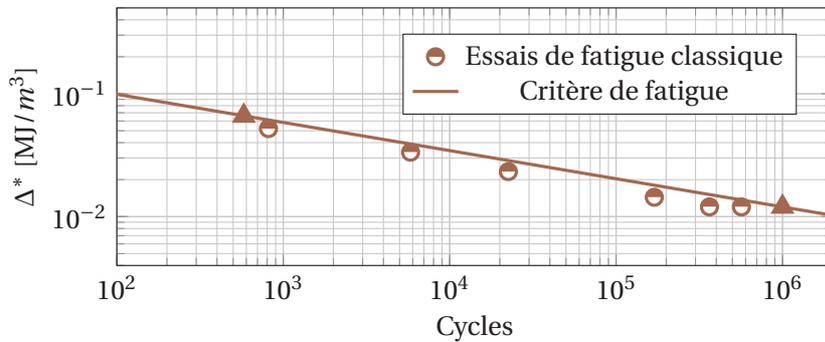


FIGURE 5.53 – Évolution du couplage thermoélastique lors d'un essai de fatigue. Durée de vie 566631 cycles.



(a) Répétabilité de la mesure de l'énergie dissipée par cycle au niveau de la zone d'initiation entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue.

(b) Régimes observés pour l'identification du critère de fatigue.



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

FIGURE 5.54 – Identification et validation du critère de fatigue. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

Éprouvettes T-Bone 1B

Pour ces éprouvettes, la rupture a toujours lieu dans la zone de jonction entre la tige et la semelle du côté opposé à la tige par rapport à l'injection. La figure 5.55 montre le champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement (Fig. A) et la localisation des points chauds quelques cycles avant la rupture (Fig. B, l'éprouvette est observée avec la tige devant). Cette figure est une vue globale (thermique) du comportement en fatigue de l'éprouvette, car le champ d'énergie dissipée par cycle est calculé au début du palier et les points chauds sont mesurés quelques cycles avant la rupture. Comme la rupture a toujours lieu du même côté de la tige, la caméra a été placée de façon à bien observer la zone de rupture de l'éprouvette sans avoir besoin de découper la tige. Nous pouvons observer que le champ d'énergie dissipée par cycle est maximum au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle. Deux points chauds sont observés au niveau de la zone où l'énergie dissipée par cycle est maximale. La question sur les zones d'initiation doit être également abordée pour ce cas d'éprouvettes. La figure 5.56 montre les évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale (h_{ml}), du module sécant local apparent (E_{sla}) et de la déformation résiduelle (ε_r) lors de chaque palier d'auto-échauffement. Les mêmes observations sont réalisées que pour les éprouvettes T-Bone 1A, h_{ml} et E_{sla} atteignent une valeur quasi-constante à partir du quatrième cycle, ce qui nous permet de dire que l'énergie dissipée par cycle est constante à partir du quatrième cycle. Le choix de la méthode présentée dans le chapitre 4 pour l'obtention de l'énergie dissipée par cycle est justifiée. Dans le cas de ces éprouvettes les points chauds apparaissent aussi dans la zone comprise entre les couteaux de l'extensomètre (dans la largeur), c'est pourquoi les données fournies par l'extensomètre sont plus représentatives du comportement local en fatigue par rapport aux éprouvettes Wavy 1 et Wavy 2. La figure 5.57 montre l'évolution des données mécaniques pour des essais de fatigue classiques. Un comportement similaire à celui des éprouvettes T-Bone 1A est constaté, h_{ml} et E_{sla} sont quasi-constants pendant la plupart de la durée de vie en fatigue lorsque celle-ci est de l'ordre de 10^4 cycles ou plus. L'énergie dissipée par cycle calculée au début de l'essai de fatigue peut donc être considérée comme représentative de l'ensemble de l'essai pour des durées de vie de l'ordre de quelques dizaines de milliers de cycles ou plus. Quelques cycles avant la rupture nous constatons une diminution remarquable de E_{sla} (ou une augmentation de h_{ml}). Ce comportement est lié à la perte de raideur de l'éprouvette due à la fissuration par fatigue (constat qui sera montré par la suite). Puisque les points chauds apparaissent entre les couteaux de l'extensomètre, celui-ci est capable de capter la perte de raideur. La fissuration par fatigue est également visible sur l'évolution de ε_r .

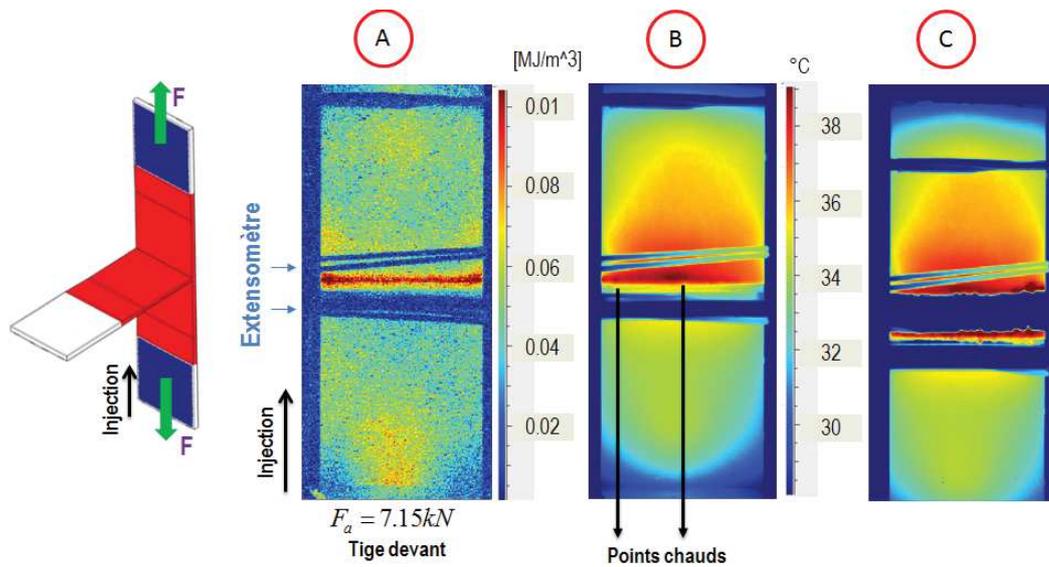


FIGURE 5.55 – A-champ d'énergie dissipée par cycle, B-localisation des points chauds quelques cycles avant la rupture et C- image thermique immédiatement après la rupture. Durée de vie 1338 cycles. R=0, RH50 et f=1Hz.

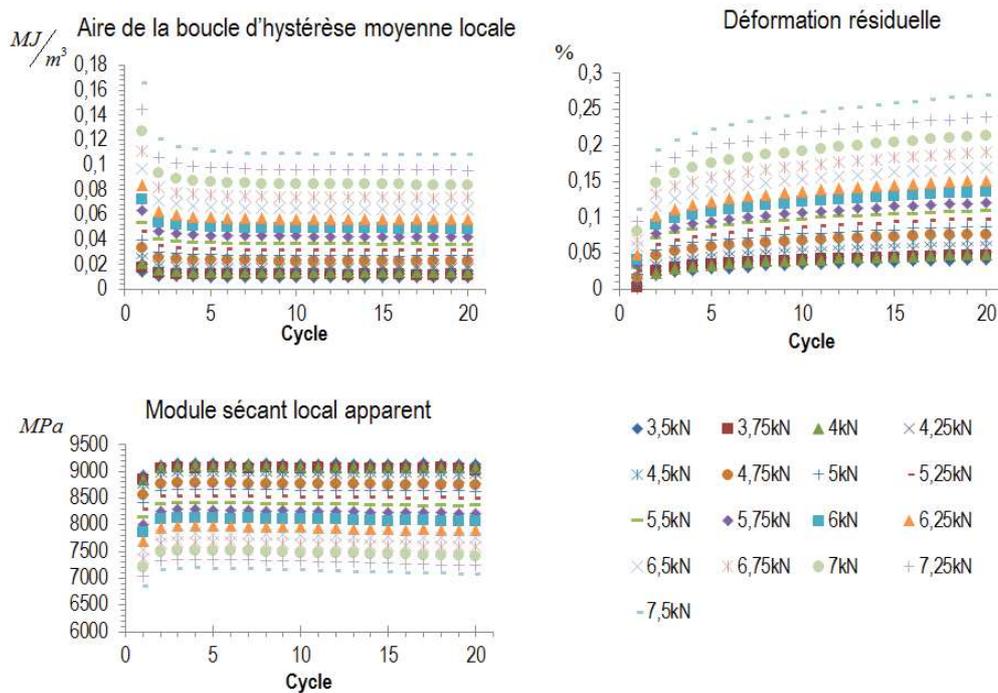


FIGURE 5.56 – Évolution de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour chaque palier d'un essai d'auto-échauffement (présentée en fonction de l'amplitude d'effort). RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

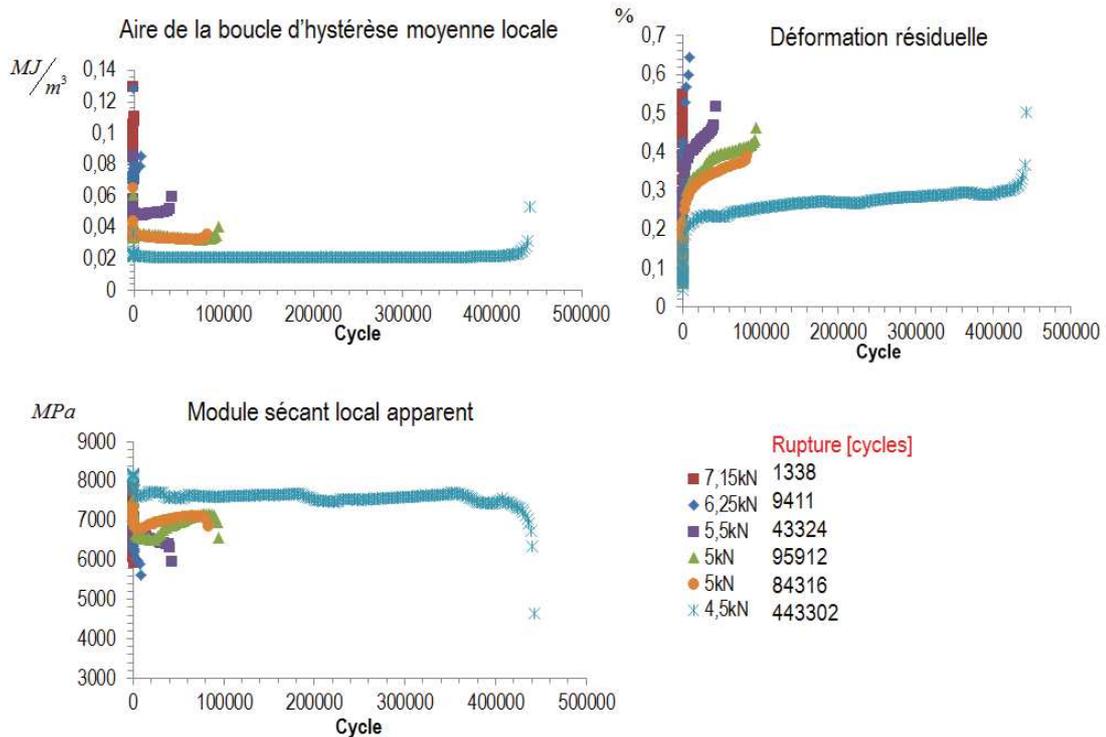


FIGURE 5.57 – Évolutions de l'aire de la boucle d'hystérèse moyenne locale, du module sécant local apparent et de la déformation résiduelle pour des essais de fatigue classique (présentées en fonction de l'amplitude d'effort). RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.58 montre la composante yy du champ de déformation surfacique (avec y la direction du chargement) pour un essai de fatigue classique. Le champ présenté correspond à l'effort maximum cyclique au début de l'essai (la tige a été partiellement découpée). Nous pouvons observer une concentration de la déformation au niveau de la zone où la tige et la semelle se joignent. En outre, la déformation est en moyenne plus importante du côté opposé à la tige par rapport à la direction de l'injection (en bas sur la figure 5.58). Ceci est un signe que l'orientation des fibres est différente de chaque côté de la tige. Nous remarquons aussi que la rupture par fatigue survient du côté de la tige le plus déformé en moyenne. La figure 5.59 montre le champ de couplage thermoélastique pour le même niveau d'amplitude d'effort lorsque la tige est devant ou derrière dans la zone observée. Nous pouvons clairement observer que l'allure du champ de couplage thermoélastique est très différente des deux cotées de la tige. Le couplage thermoélastique est en moyenne plus important du côté opposé à la tige par rapport à l'injection. Cette différence d'orientation est visible dans la prédiction du tenseur d'orientation montrée sur la figure 3.16b. Même si les comparaisons mesures-prédictions du tenseur d'orientation ne sont pas satisfaisantes, les prédictions montrent au moins qu'il y a une forte différence entre les deux côtés de la tige, ce qui est confirmé par les mesures du couplage thermoélastique.

La figure 5.60 montre l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle, du côté opposé par rapport à la direction d'injection. Les cas où la tige est devant ou derrière dans la zone observée lors d'essais d'auto-échauffement sont présentés. Nous observons que, jusqu'à $F_a = 5\text{kN}$, l'énergie dissipée par cycle est légèrement plus

importante lorsque la tige est visible dans la zone observée. Comme la différence en terme de dissipation n'est pas très importante, il faut chercher un autre critère pour définir le côté de l'éprouvette où la fissuration apparaît. Les points chauds ont été étudiés pour plusieurs cas de durée de vie, tel que montré sur la figure 5.61. A priori, nous ne connaissons pas le côté d'apparition des points chauds, c'est pourquoi nous les avons étudié lorsque la tige est en face avant ou arriéré. Nous avons constaté que lorsque la tige est derrière, il y a un point chaud qui apparaît pendant un temps très court quelques cycles avant la rupture de l'éprouvette, tel qu'illustré sur la figure 5.61a. Lorsque la tige est devant, nous constatons deux points chauds qui apparaissent un certain nombre de cycles avant la rupture, tel que montré sur les figures 5.61b, 5.61c et 5.61d. Nous avons observé que le temps d'apparition des points chauds est plus long lorsque la tige est devant. Nous considérons donc que la fissuration apparaît du côté de la tige. De la même façon que pour les éprouvettes T-Bone 1A, il faut approfondir la description du scénario d'endommagement pour bien comprendre pourquoi nous observons deux points chauds. L'évolution du champ de déformation et celle du champ de couplage thermoélastique pendant la durée de vie ont été étudiées pour ce cas d'éprouvettes.

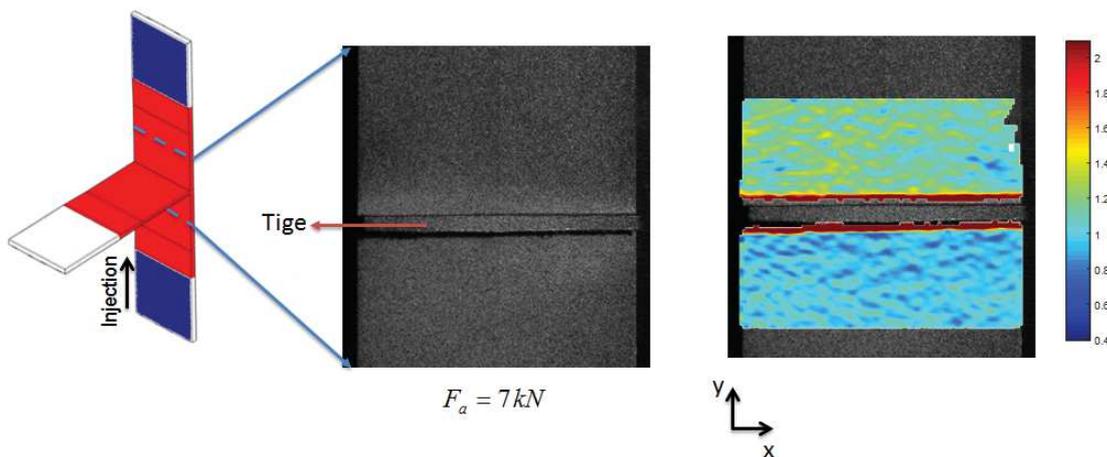


FIGURE 5.58 – Composante yy du champ de déformation surfacique (avec y la direction du chargement) pour un essai de fatigue classique. Durée de vie 1257 cycles. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.62 montre l'évolution du champ de déformation jusqu'à la rupture de l'essai de fatigue présenté sur la figure 5.58. Nous pouvons observer, tout d'abord, une chute locale de la déformation au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle approximativement au centre de l'éprouvette dans la largeur. Cette chute est le signe de l'apparition d'une fissure. Puis, la fissure commence à se propager jusqu'à atteindre sa taille critique quelques cycles avant la rupture. Ce constat est une première vérification que l'observation de deux points chauds est la signature thermique d'une fissure ayant propagé. La figure 5.63 montre la corrélation entre la fissure déjà propagée et le champ de température du côté opposé de l'éprouvette. Nous observons une zone ayant une température plus importante par rapport à son voisinage qui semble correspondre à la taille de la fissure.

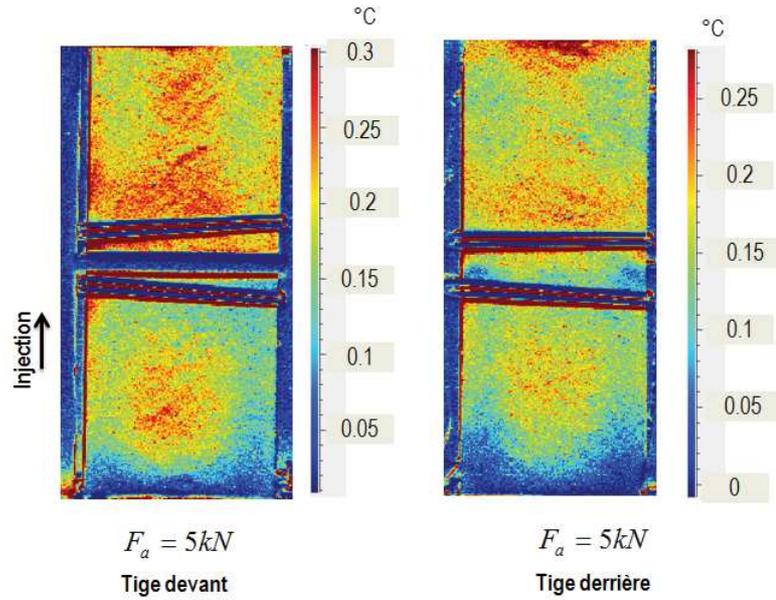


FIGURE 5.59 – Champ de couplage thermoélastique lorsque la tige est devant ou derrière dans la zone observée. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

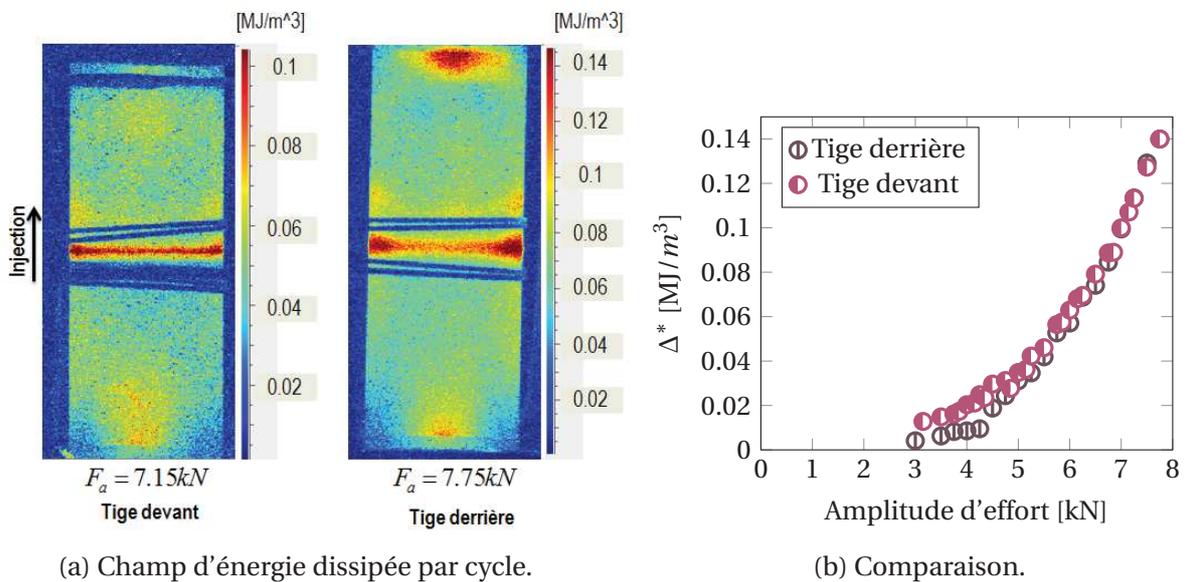
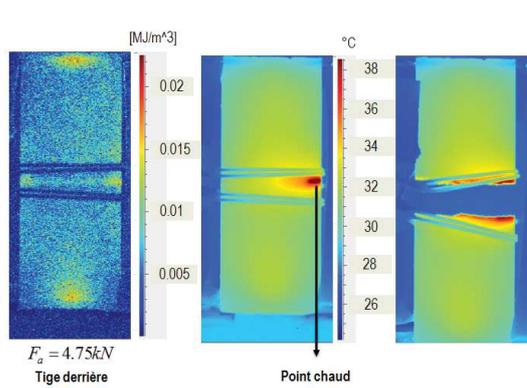
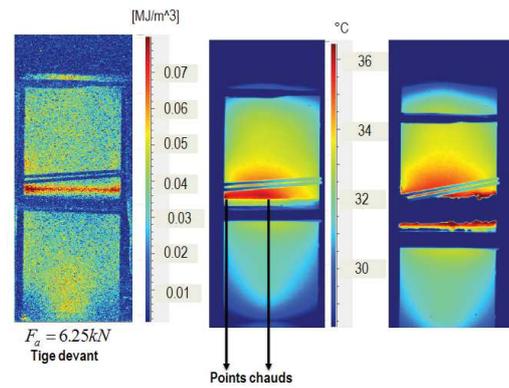


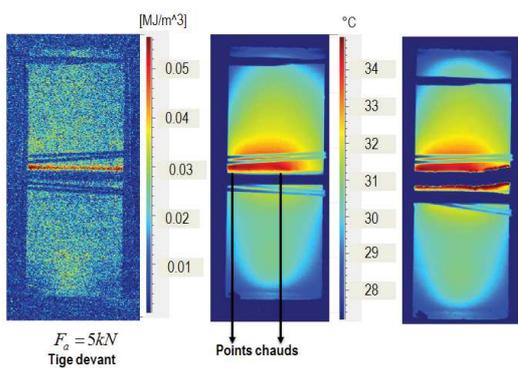
FIGURE 5.60 – Énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle lorsque la tige est devant ou derrière dans la zone observée. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.



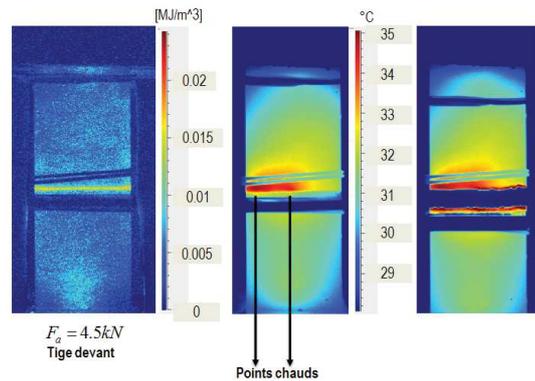
(a) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation du point chaud. Durée de vie : 225775 cycles.



(b) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation des points chauds. Durée de vie : 9411 cycles.



(c) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation des points chauds. Durée de vie : 95912 cycles.



(d) Champ d'énergie dissipée par cycle et localisation des points chauds. Durée de vie : 443302 cycles.

FIGURE 5.61 – Localisation des points chauds pour quatre cas de durée de vie. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

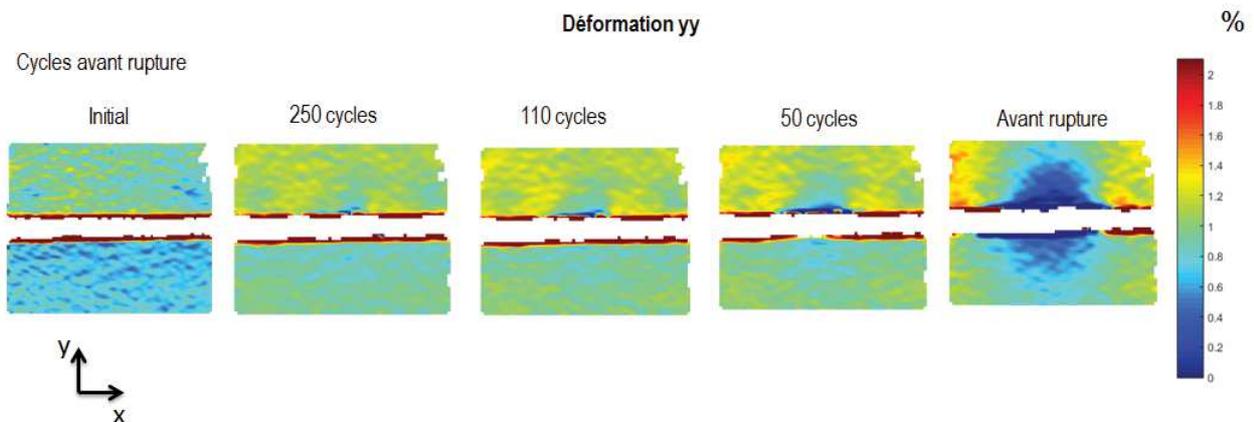


FIGURE 5.62 – Évolution du champ de déformation jusqu'à la rupture. Durée de vie 1257 cycles. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

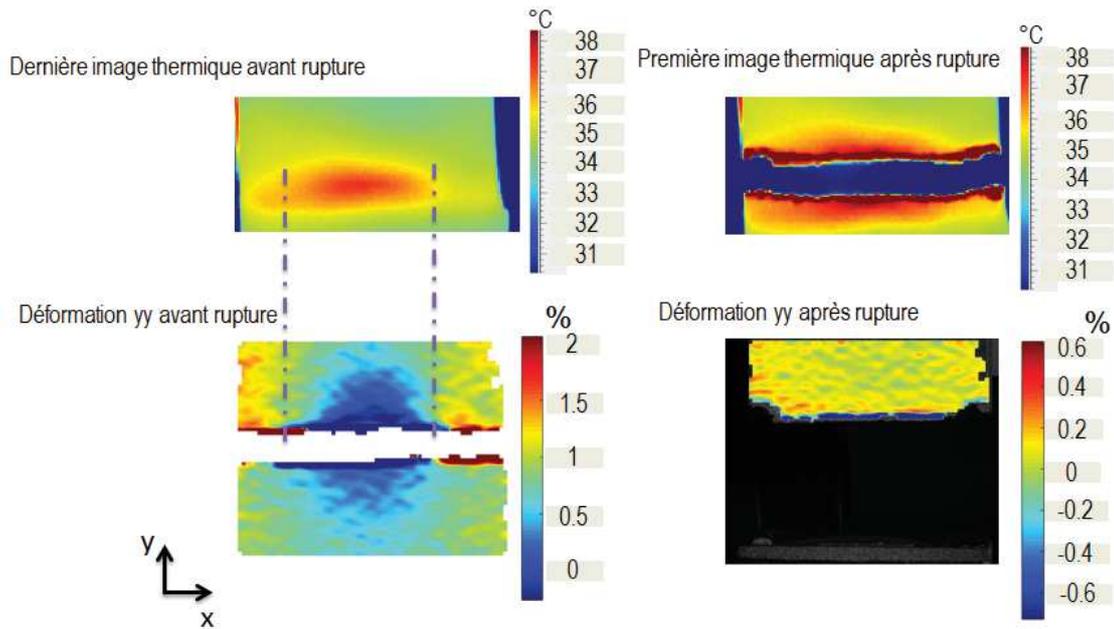


FIGURE 5.63 – Corrélation entre le champ de déformation quelques cycles avant la rupture et le champ de température. Durée de vie 1257 cycles. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

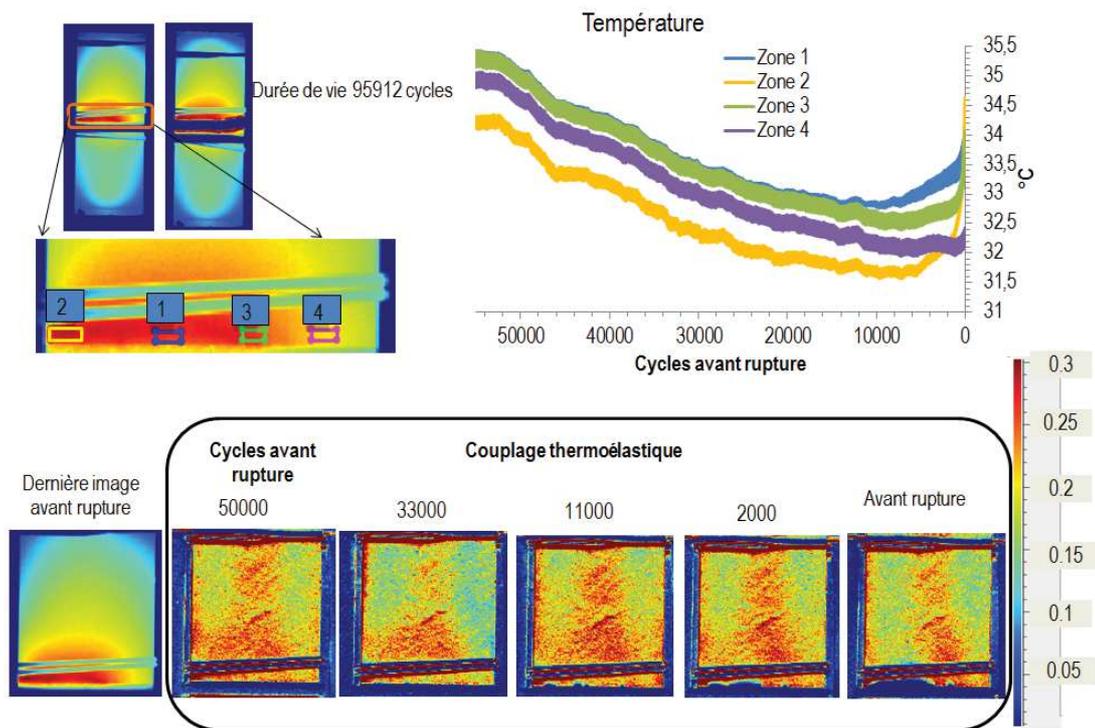


FIGURE 5.64 – Évolution du couplage thermoélastique lors d'un essai de fatigue. Durée de vie 95912 cycles.

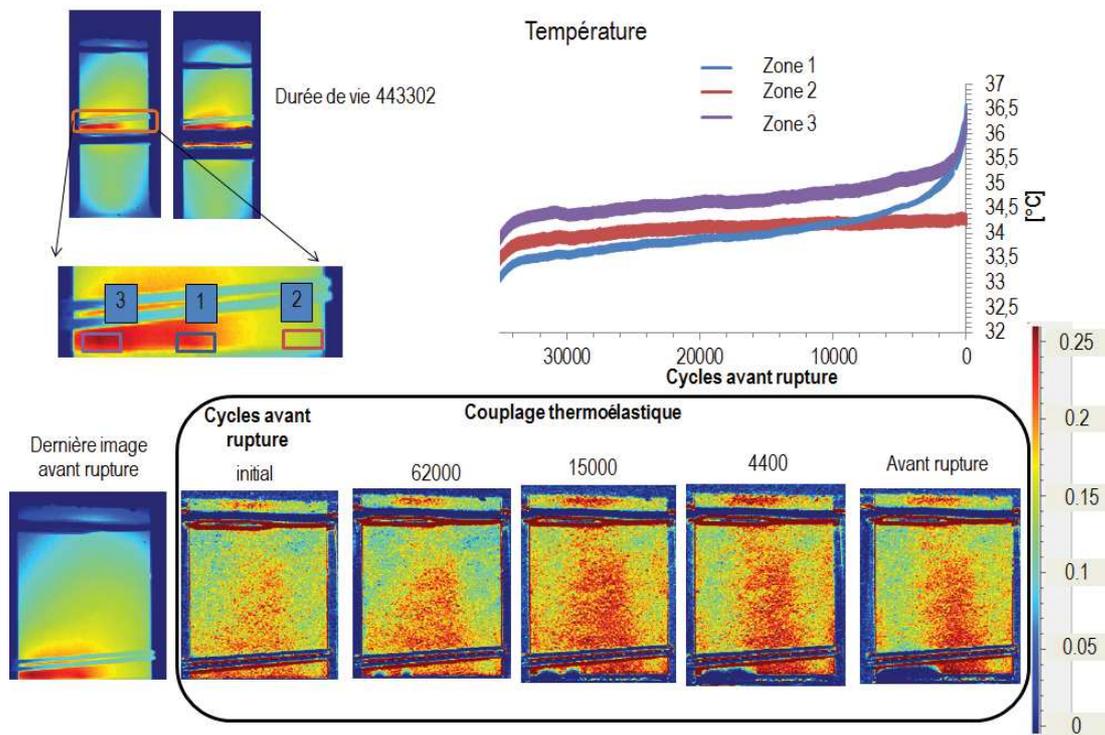
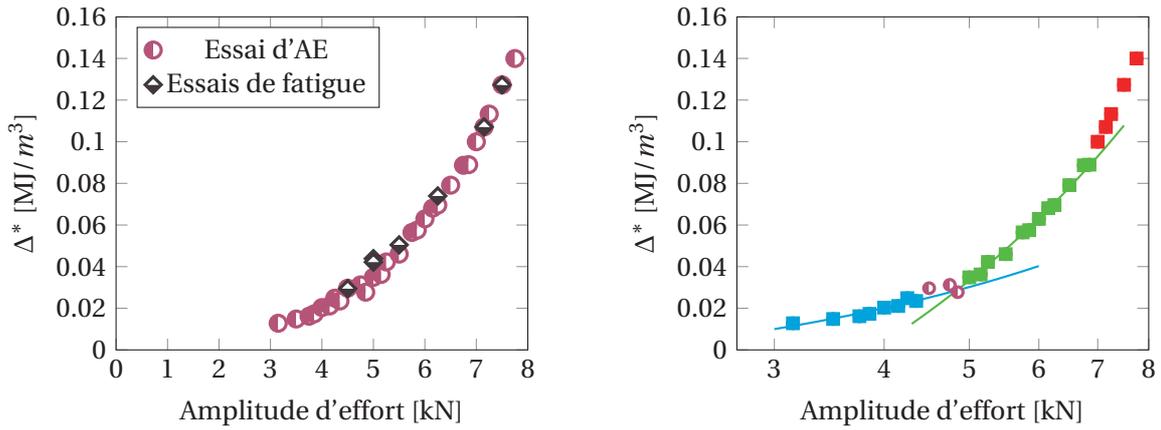


FIGURE 5.65 – Évolution du couplage thermoélastique lors d’un essai de fatigue. Durée de vie 443302 cycles.

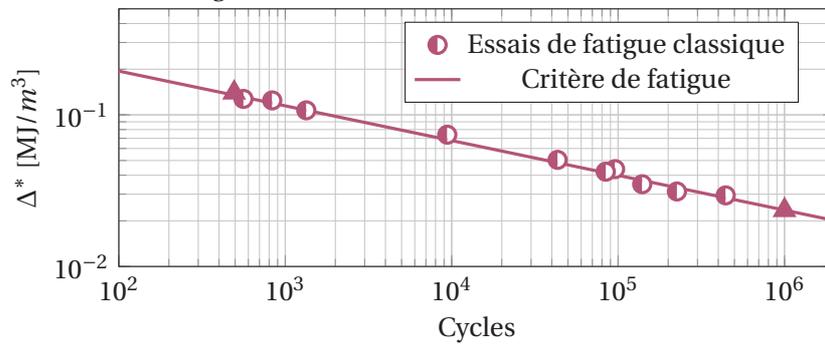
Les figures 5.64 et 5.65 montrent, dans la partie supérieure, l’évolution de la température moyenne sur quelques positions au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle, pour un certain nombre de cycles avant la rupture. Cette évolution nous permet d’apprécier les changements au niveau du couplage thermoélastique (évolution de l’amplitude du signal de température) qui surviennent pendant la durée de vie de l’éprouvette. Notons qu’il n’y a aucun changement remarquable pour les positions en dehors de la zone entre les points chauds (position 4 sur la figure 5.64 et position 2 sur la figure 5.65). Dans la partie inférieure des figures 5.64 et 5.65, nous montrons l’évolution du champ de couplage thermoélastique de l’état initial jusqu’à quelques cycles avant la rupture. Nous pouvons clairement observer que le couplage thermoélastique chute ponctuellement dans plusieurs zones, de plus, au fur et à mesure ces zones grandissent et coalescent jusqu’à devenir une zone continue où le couplage thermoélastique a complètement chuté. Nous pouvons remarquer que les points chauds observés quelques cycles avant la rupture semblent corrélés aux deux côtés de la zone où le couplage thermoélastique a chuté à la fin de l’essai. Ces observations montrent qu’il y a une étape d’initiation-multiple suivie d’une propagation. Le nombre de cycles de l’étape de propagation semble être corrélée au nombre de cycles pour lequel l’éprouvette présente une perte de raideur (cf. Fig. 5.57), c’est-à-dire, autour de 10% de la durée de vie. Pour la mise en place du critère de fatigue, le calcul de l’énergie dissipée par cycle sera réalisé au niveau de la zone où les initiations ont été observées. Celle-ci est une zone où l’énergie dissipée par cycle est assez homogène.

La figure 5.66a montre qu’il y a une très bonne répétabilité de la mesure de l’énergie dissipée par cycle au niveau des zones d’initiation entre l’essai d’auto-échauffement et les essais de fatigue. Il n’est donc pas nécessaire de mesurer systématiquement les zones d’initiation pour la mise



(a) Répétabilité de l'énergie dissipée par cycle au niveau des zones d'initiation entre l'essai d'auto-échauffement et les essais de fatigue.

(b) Régimes observés pour l'identification du critère de fatigue.



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

FIGURE 5.66 – Identification et validation du critère de fatigue. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

en place du critère de fatigue. La figure 5.66b montre les régimes observés dans le graphique présentant l'énergie dissipée par cycle au niveau des zones d'initiation en fonction de l'amplitude d'effort en spécifiant la transition entre le premier et le deuxième régime. Finalement, la figure 5.66c montre le critère de fatigue et les essais de fatigue classiques réalisés. Nous constatons une très bonne corrélation entre les deux.

5.5.2 Résultats des essais réalisés en flexion cyclique à température ambiante, R=0 et RH50

Pour solliciter les éprouvettes T-Bone 1A et 1B en flexion, un montage expérimental a été conçu dans le but d'utiliser la machine de traction dynamique INSTRON pour ce type de chargement. La figure 5.67 montre les composants du montage expérimental et les parties prises dans les mors de la machine. La raideur des éprouvettes dans cette configuration est beaucoup moins importante, par conséquent, il n'a pas été possible de contrôler les essais de flexion cyclique en effort. L'ensemble d'essais de fatigue en flexion cyclique ont été contrôlés en déplacement. Tous les essais ont été réalisés avec un rapport de charge R=0. Cela veut dire que le mors mobile est déplacé dans une seule direction entre la position d'équilibre et une valeur maximale. La figure

5.68 montre le dispositif expérimental des essais de flexion cyclique. Le sens du déplacement par rapport à la position d'équilibre est spécifié (la ligne pointillée correspond à la position d'équilibre). Avec les conditions de chargement considérées, la zone critique en terme de fatigue est la zone de jonction entre la tige et la semelle. Donc, la caméra infrarouge a été mise en place de façon à observer cette zone d'une seul côté de la tige. La figure 5.68 montre la localisation de la zone de jonction entre la tige et la semelle observée avec la caméra infrarouge. Il est important de noter que le mors qui prend la tige est le mors fixe.

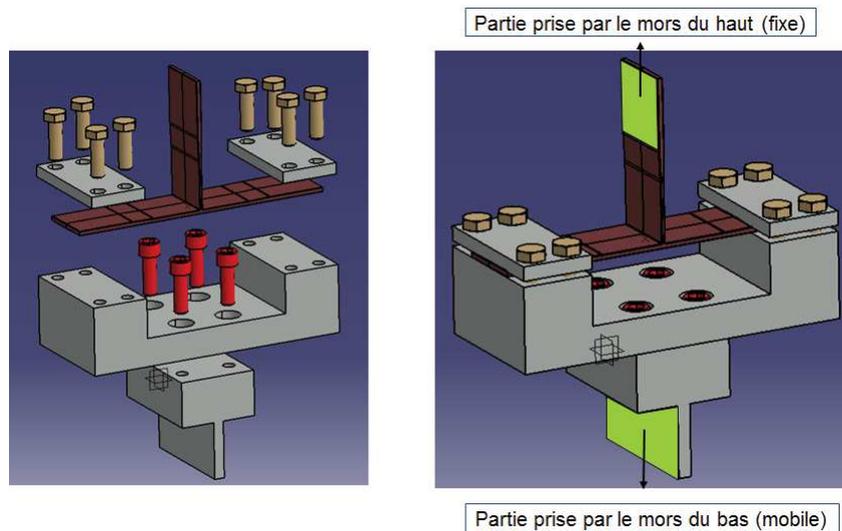


FIGURE 5.67 – Montage expérimental utilisé pour solliciter en flexion les éprouvettes T-Bone 1A et 1B.

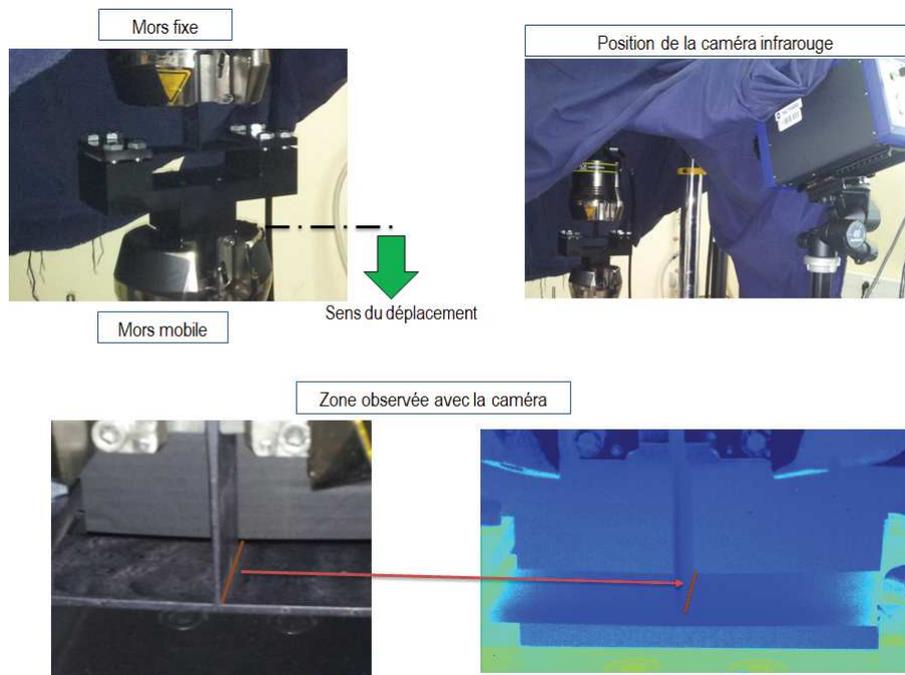


FIGURE 5.68 – Dispositif expérimental et zone observée avec la camera infrarouge lors des essais de flexion cyclique.

Éprouvettes T-Bone 1B

La figure 5.69 montre le champ d'énergie dissipée par cycle lors du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement. Nous observons le côté opposé à la tige par rapport à la direction d'injection car celle-ci est la zone critique en terme de fatigue. Il est clairement visible que la zone ayant la dissipation la plus importante est la zone de jonction entre la tige et la semelle. C'est également la zone d'initiation de fissures. Cette figure montre également l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone ayant la dissipation la plus importante pour tous les paliers considérés des trois essais d'auto-échauffement réalisés. Chaque palier correspond à une amplitude de déplacement. Nous pouvons voir une excellente répétabilité pour les trois essais présentés.

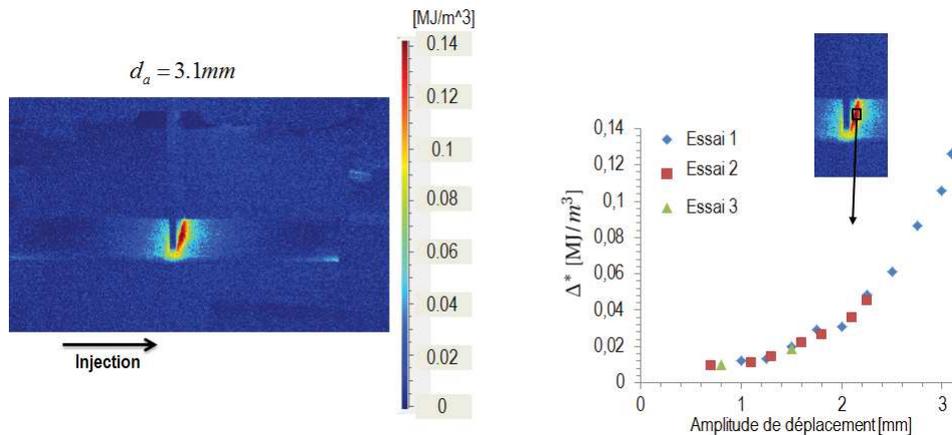


FIGURE 5.69 – Champ d'énergie dissipée par cycle lors du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement et énergie dissipée par cycle calculée dans la zone où la dissipation est maximale pour trois essais d'auto-échauffement. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

Comme les essais de flexion cyclique sont contrôlés en déplacement, il faut définir un critère pour déterminer le moment où l'initiation en fatigue a lieu. La figure 5.70 montre, d'une part, l'effort de réaction maximum cyclique lors d'un essai de fatigue. Nous observons que l'effort est quasi-constant jusqu'à environ 700 cycles. Ensuite, nous constatons une diminution progressive. D'autre part, la figure montre le suivi de la moyenne de température sur trois zones au niveau de la largeur de la zone de jonction entre la tige et la semelle. Nous observons que l'amplitude du signal de température (couplage thermoélastique) de la zone 1 commence avec une certaine valeur, laquelle est presque inchangée jusqu'à 500 cycles. Celle-ci commence alors à diminuer jusqu'à arriver à une valeur minimale autour de 700 cycles. Notons la corrélation entre la valeur minimale du couplage thermoélastique de la zone 1 et le point où l'effort de réaction commence à diminuer. Nous observons un comportement similaire en terme d'évolution du couplage thermoélastique pour les zones 2 et 3. La différence tient au moment où le couplage thermoélastique arrive à une valeur minimale qui se situe autour de 900 cycles. Pour mieux comprendre ces observations, le champ de couplage thermoélastique a été mesuré à plusieurs moments de l'essai. Il faut remarquer que, avec les conditions de chargement considérées, la zone de jonction entre la tige et la semelle présente le déplacement minimal entre la position de déplacement maximum imposée et la position d'équilibre. C'est pourquoi le champ de couplage thermoélastique sera plus précis au niveau de cette zone. Au fur et à mesure que nous nous éloignons de cette zone, le

champ de couplage thermoélastique sera de plus en plus perturbé par la différence entre les configurations mécaniques des points matériels.

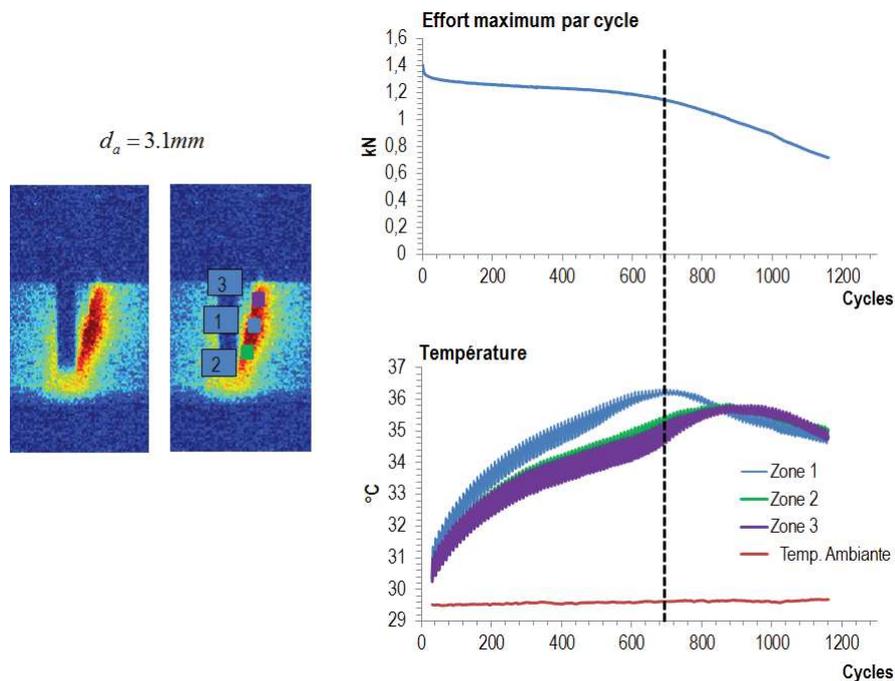


FIGURE 5.70 – Évolution de l’effort de réaction maximum cyclique et de la température au niveau de la zone ayant la dissipation la plus importante lors d’un essai de fatigue. $d_a = 3.1mm$, RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.71 montre le champ de couplage thermoélastique à plusieurs moments de l’essai de fatigue étudié. Nous observons qu’au début de l’essai, le couplage thermoélastique est constant au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle. Au fur et à mesure celui-ci commence à diminuer au niveau de la zone 1, jusqu’à chuter complètement autour de 700 cycles. Ceci montre que la fissuration en fatigue commence au niveau de la zone 1, et qu’elle se propage ensuite dans la largeur de l’éprouvette. C’est pourquoi nous observons que le couplage thermoélastique arrive à une valeur minimale de façon décalée dans le temps dans la largeur de l’éprouvette (cf. Fig.5.70). **Nous considérons que le moment d’initiation arrive lorsque le couplage thermoélastique chute complètement dans la zone d’initiation** (ce qui est corrélé avec le moment où l’effort maximum par cycle commence à diminuer). Dans ce cas, l’initiation se situe autour de 700 cycles.

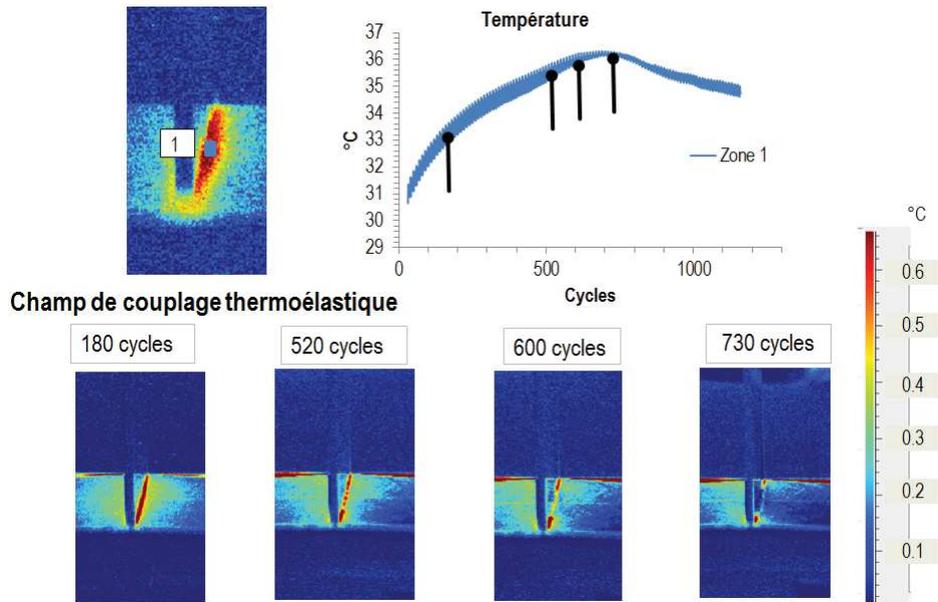


FIGURE 5.71 – Évolution du champ de couplage thermoélastique lors d'un essai de fatigue. $d_a = 3.1\text{ mm}$, RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

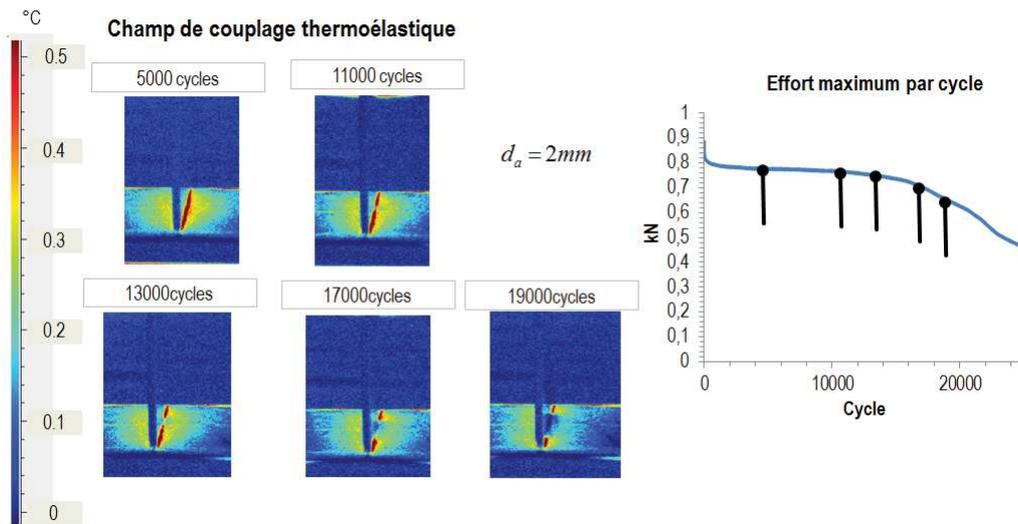


FIGURE 5.72 – Évolution du champ de couplage thermoélastique lors d'un essai de fatigue. $d_a = 2\text{ mm}$, RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

Le suivi du champ de couplage thermoélastique a également été réalisé pour les autres niveaux de chargement. La figure 5.72 montre le graphique de l'effort cyclique maximum et le champ de couplage thermoélastique pour cinq instants de l'essai. Les mêmes observations sont réalisées, c'est-à-dire que le moment où l'effort maximum cyclique commence à diminuer est corrélé au moment où le couplage thermoélastique chute complètement dans la zone d'initiation. Pour mieux détecter le moment de l'initiation en fatigue, l'évolution de la variation de température moyennée au niveau de la zone d'initiation est déterminée et présentée dans le même graphique que l'effort maximum cyclique, tel que montré sur la figure 5.73. Nous observons que l'initiation se situe autour de 15000 cycles. Le couplage thermoélastique n'a pas été systématiquement suivi pour tous les essais de fatigue. Cependant, avec le graphique de l'effort maximum cyclique le

moment de l'initiation est toujours détectable. Le critère de fatigue a donc été mis en place. La figure 5.74a montre les régimes observés dans le graphique présentant l'énergie dissipée par cycle au niveau de la zone d'initiation en fonction de l'amplitude de déplacement en spécifiant la transition entre le premier et le deuxième régime. La figure 5.74b montre le critère de fatigue et les essais de fatigue classique réalisés. Nous constatons une bonne corrélation entre les deux techniques de caractérisation. Pour un des essais de fatigue, l'initiation n'a pas été détectée (celui avec la flèche).

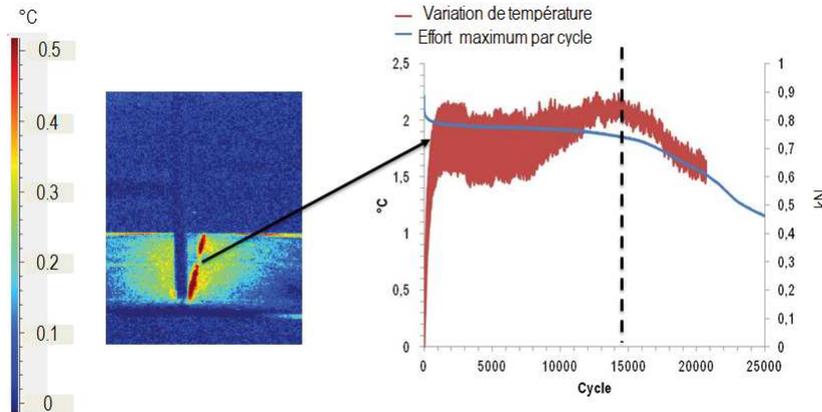
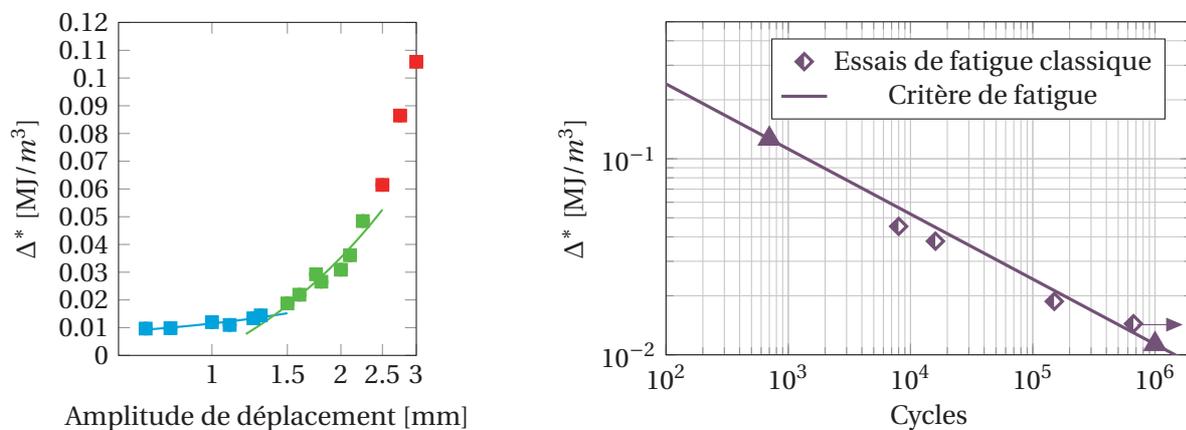


FIGURE 5.73 – Évolution de la variation de température moyennée au niveau de la zone d'initiation et effort maximal cyclique. $d_a = 2\text{ mm}$, RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.



(a) Régimes observés pour l'identification du critère de fatigue.

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

FIGURE 5.74 – Identification et validation du critère de fatigue. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

Éprouvettes T-Bone 1A

La figure 5.75 montre le champ d'énergie dissipée par cycle lors du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement. Comme ces éprouvettes sont injectées par la tige, il n'y a pas de côté préférentiel pour observer le champ d'énergie dissipée par cycle. Il est clairement visible que la zone ayant la dissipation la plus importante est la zone de jonction entre la tige et la semelle. Cette

figure montre également l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone ayant la dissipation la plus importante pour tous les paliers considérés des deux essais d'auto-échauffement réalisés. Chaque palier correspond à une amplitude de déplacement. Nous pouvons voir une excellente répétabilité pour les essais présentés.

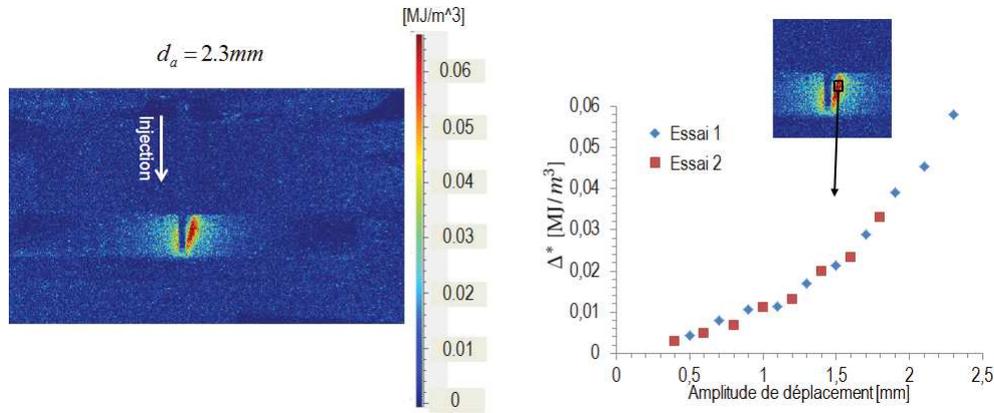


FIGURE 5.75 – Champ d'énergie dissipée par cycle du dernier palier d'un essai d'auto-échauffement et énergie dissipée par cycle calculée à la zone où la dissipation est maximale pour deux essais d'auto-échauffement. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

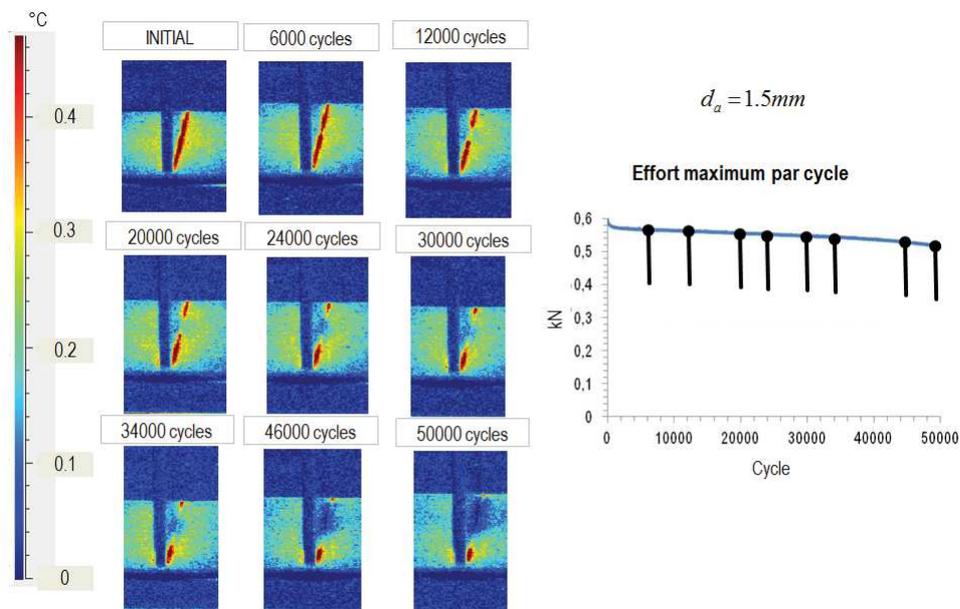


FIGURE 5.76 – Évolution du champ de couplage thermoélastique lors d'un essai de fatigue. $d_a = 1.5\text{mm}$, RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.76 montre l'effort de réaction maximum cyclique lors d'un essai de fatigue et l'évolution du champ de couplage thermoélastique pendant le déroulement de l'essai. Comme pour le cas des éprouvettes T-Bone 1B, nous observons l'initiation et la propagation de la fissure via le champ de couplage thermoélastique. Mais, nous n'observons pas de changements remarquables de l'effort maximum par cycle, même lorsque le couplage thermoélastique a complètement chuté dans la largeur au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle. Ce comportement pourrait être dû à une redistribution des contraintes au fur et à mesure que la fissuration

se propage. Ce comportement est observé pour tous les niveaux de durée de vie considérés. L'analyse des faciès de rupture serait également précieuse (non réalisée ici faute de temps).

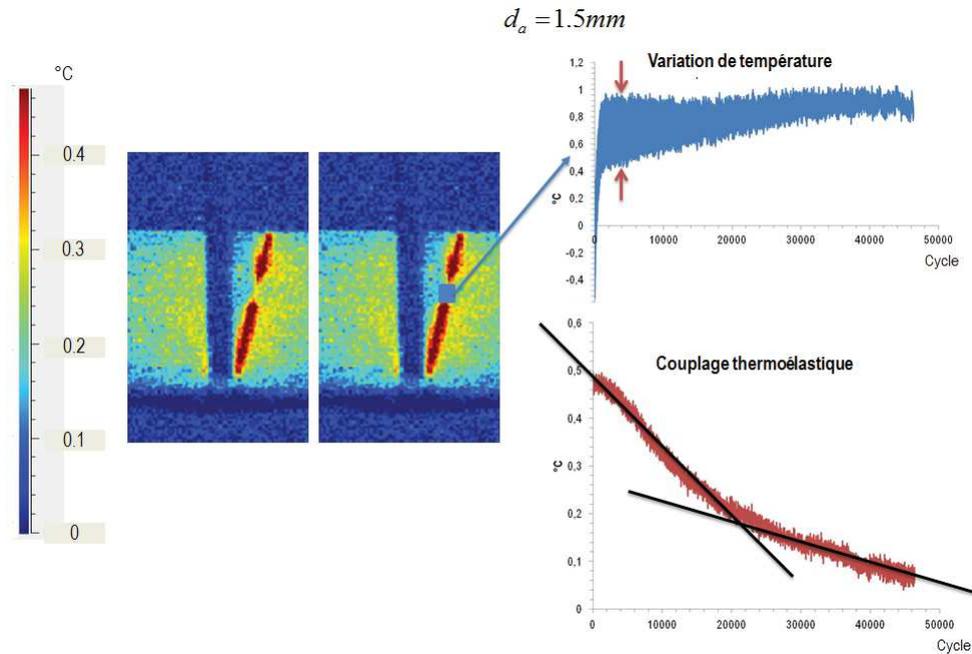


FIGURE 5.77 – Évolution du couplage thermoélastique au niveau de la zone d'initiation. $d_a = 1.5mm$, RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

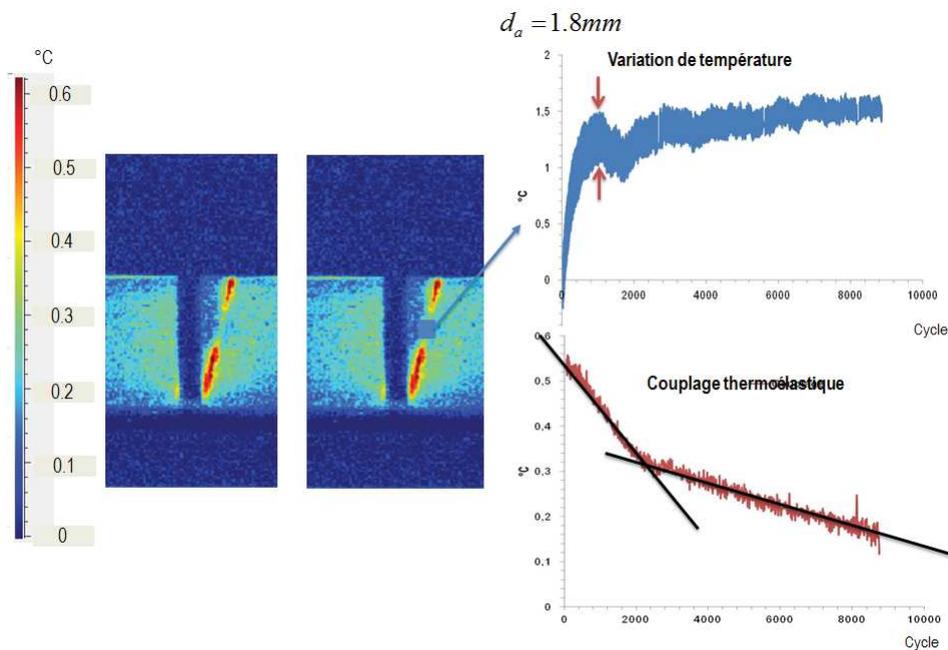
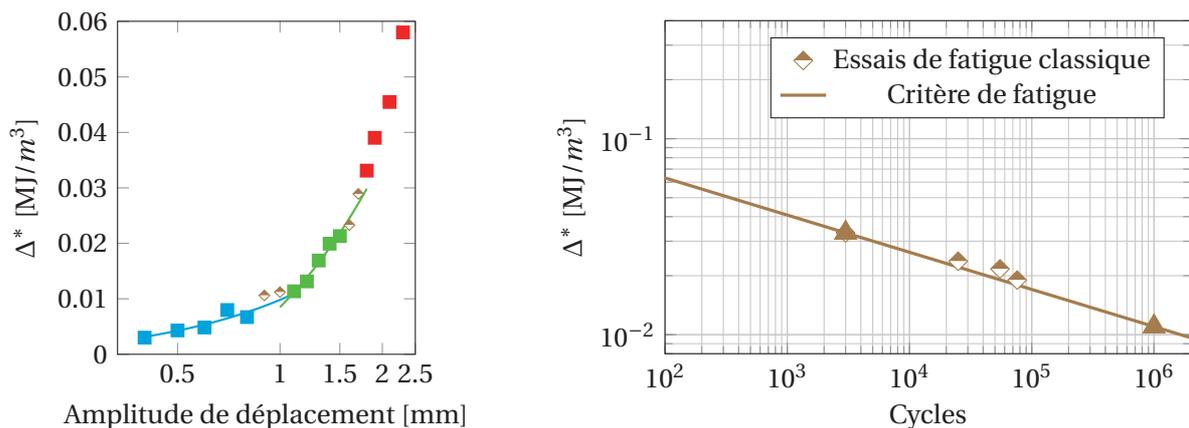


FIGURE 5.78 – Évolution du couplage thermoélastique au niveau de la zone d'initiation. $d_a = 1.8mm$, RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

Pour définir le moment d'initiation en fatigue, nous avons utilisé exclusivement l'évolution du couplage thermoélastique. Les figures 5.77 et 5.78 montrent l'évolution de la variation de température moyennée au niveau de la zone d'initiation, où nous pouvons observer une diminution progressive du couplage thermoélastique dès le début de l'essai. Pour mieux observer

l'évolution de celui-ci, les figures montrent l'évolution de l'amplitude du signal de température (ou bien du couplage thermoélastique). Nous observons l'apparition de deux régimes dans le graphique présentant le couplage thermoélastique en fonction du nombre de cycles (décrits à l'aide de deux droites). La transition entre les deux régimes est approximativement corrélée au moment où la fissure commence à se propager. **Nous faisons l'hypothèse que le point de transition entre ces deux régimes correspond au moment d'initiation en fatigue.** Le premier régime serait alors associé à un endommagement local diffus. Il faut remarquer que le choix réalisé reste discutable, car nous ne pouvons pas prouver que le premier régime est associé à un endommagement local. Il faudrait enrichir la description du scénario d'endommagement pour bien détecter le moment d'initiation en faisant, par exemple, des essais de fatigue avec suivi du champ de déformation ou des essais de fatigue avec de jauges de déformation à la zone d'initiation. Le couplage thermoélastique a été systématiquement suivi pour tous les essais de fatigue réalisés et le critère de fatigue a été mis en place en détectant l'initiation avec la méthode décrite. La figure 5.79a montre les régimes observés dans le graphique présentant l'énergie dissipée par cycle au niveau de la zone d'initiation en fonction de l'amplitude de déplacement en spécifiant la transition entre le premier et le deuxième régime. La figure 5.79b montre le critère de fatigue et les essais de fatigue classiques réalisés, nous constatons une bonne corrélation entre les deux.



(a) Régimes observés pour l'identification du critère de fatigue.

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

FIGURE 5.79 – Identification et validation du critère de fatigue. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

5.5.3 Bilan des éprouvettes T-Bone 1A et 1B

Comparaison en traction

La figure 5.80 montre la comparaison entre le scénario d'endommagement et le champ de couplage thermoélastique. Nous pouvons faire les observations suivantes :

- nous pouvons observer une différence très importante quant au champ de couplage thermoélastique initial des deux cas d'éprouvettes. Celui-ci est symétrique par rapport à la

tige pour les éprouvettes T-Bone 1A et asymétrique pour les éprouvettes T-Bone 1B. Ceci est corrélé aux prédictions du tenseur d'orientation d'ordre 2 (symétrique pour l'éprouvette T-Bone 1A et asymétrique pour l'éprouvette T-Bone 1B) ;

- pour les deux cas d'éprouvettes nous voyons plusieurs points chauds (souvent 2) quelques cycles avant la rupture ;
- nous observons une chute progressive du couplage thermoélastique au niveau de la zone de rupture. Pour le cas des éprouvettes T-Bone 1A, cette chute commence dans une zone bien précise et ensuite elle se propage. Pour le cas des éprouvettes T-Bone 1B, cette chute commence ponctuellement dans plusieurs zones, lesquelles grandissent et coalescent ;
- nous constatons que les points chauds observés sont corrélés des deux extrémités de la zone où le couplage thermoélastique a chuté quelques cycles avant la rupture. La figure 5.81 montre cette corrélation. Il faut remarquer que pour mieux observer les points chauds, les images présentées sont obtenues par différence de température par rapport à une image pour laquelle la propagation n'a pas eu lieu.

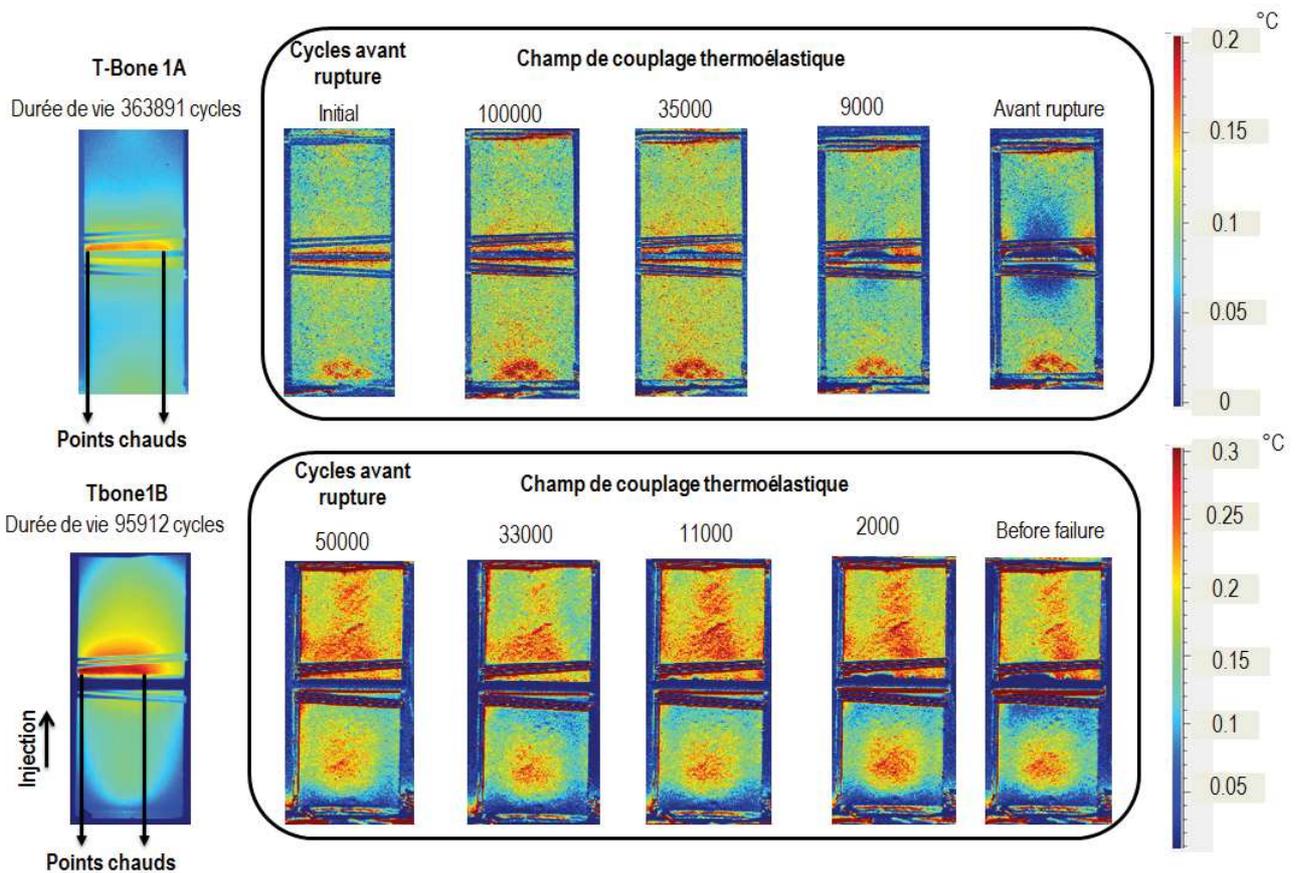


FIGURE 5.80 – Points chauds et évolution du champ de couplage thermoélastique pendant un essai de fatigue. RH50, R=0, $f=1\text{Hz}$ et température ambiante.

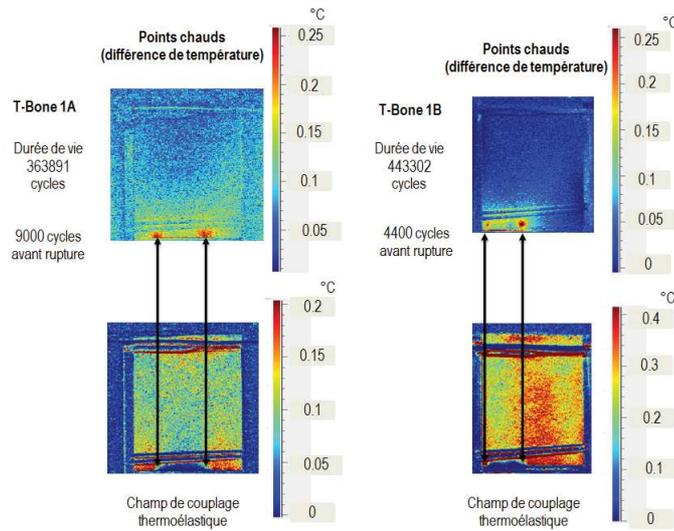
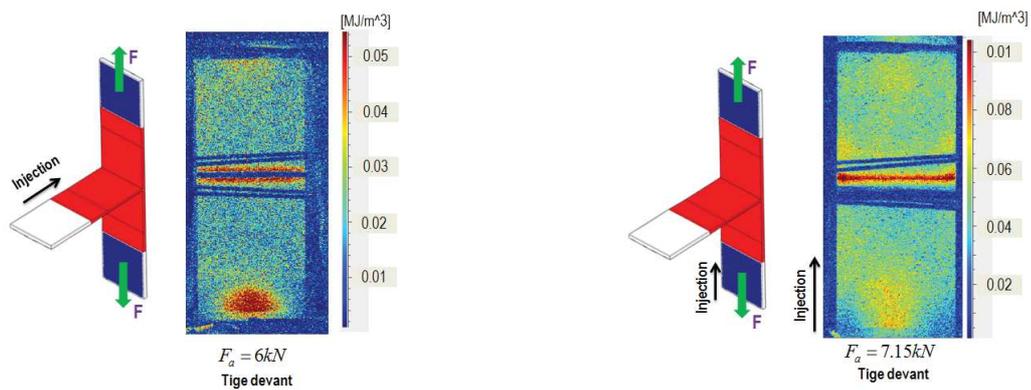
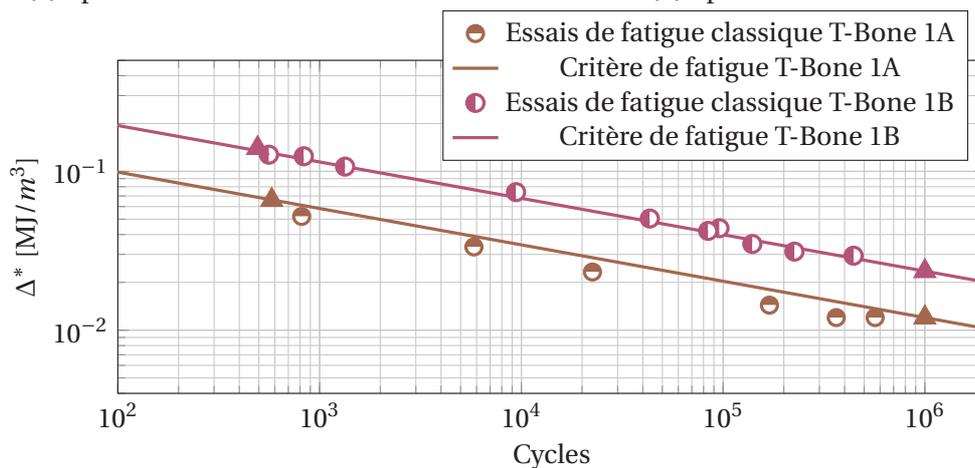


FIGURE 5.81 – Corrélation des points chauds avec la chute locale du couplage thermoélastique. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.



(a) Épruvettes T-Bone 1A

(b) Épruvettes T-Bone 1B



(c) Comparaison des courbes de Wöhler en fonction de Δ^* .

FIGURE 5.82 – Comparaison des champs d'énergie dissipée par cycle et des critères de fatigue. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

La figure 5.82 montre les champs d'énergie dissipée par cycle et la comparaison des critères de fatigue pour chaque cas d'éprouvette. Notons que les points chauds apparaissent toujours au niveau de la zone ayant la dissipation la plus importante dans la zone de jonction entre la tige et la semelle. Nous pouvons observer que le critère de fatigue n'est pas unifié pour les deux cas d'éprouvettes. Pour le même niveau de Δ^* , il y a environ une décade de différence entre les deux.

Comparaison en flexion

La figure 5.83 montre les évolutions du champ de couplage thermoélastique et de l'effort maximum par cycle lors d'essais de fatigue en flexion. Nous pouvons faire les observations suivantes :

- pour les deux cas d'éprouvettes, nous observons une chute locale du couplage thermoélastique (initiation) suivi par une propagation au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle ;
- pour le cas des éprouvettes T-Bone 1B, l'instant d'initiation est détecté par la chute du couplage thermoélastique et est corrélé à l'instant où l'effort maximal par cycle commence à diminuer. Pour le cas des éprouvettes T-Bone 1A, nous n'observons pas de changements remarquables de l'effort maximal par cycle même après propagation ;

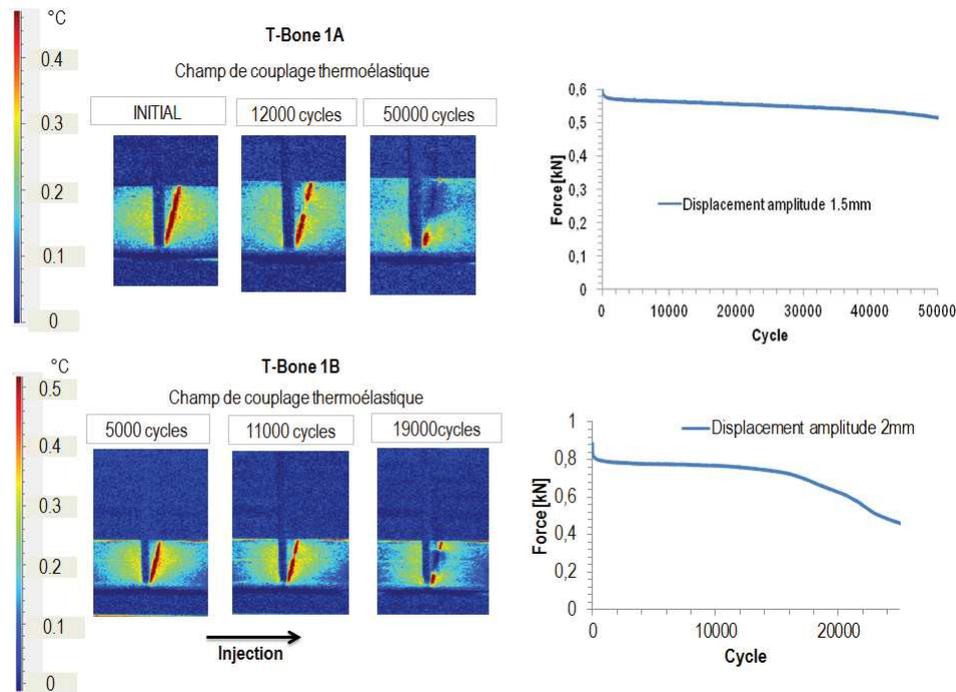
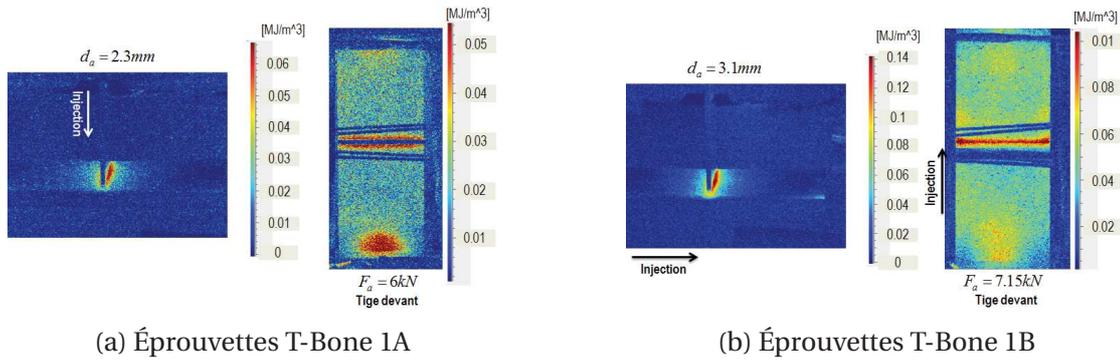
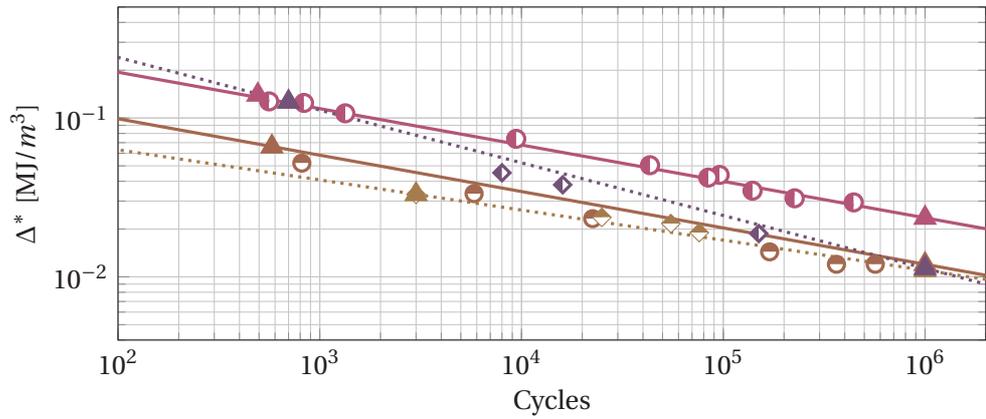


FIGURE 5.83 – Évolutions du champ de couplage thermoélastique et de l'effort maximum cyclique. R=0, RH50 et f=1Hz.

La figure 5.84 montre les champs d'énergie dissipée par cycle en traction et en flexion et la comparaison des critères de fatigue pour chaque cas d'éprouvette et chaque type de chargement. Nous observons que pour le cas des éprouvettes T-Bone 1A, le critère de fatigue semble unifié pour les deux types de chargement étudiés. Par contre, pour les éprouvettes T-Bone 1B nous constatons une différence entre les deux types de chargement pouvant atteindre au maximum une décade pour le même niveau de Δ^* .



- Essais de fatigue classique T-Bone 1A (traction) — Critère de fatigue T-Bone 1A (traction)
- ◆ Essais de fatigue classique T-Bone 1A (flexion) — Critère de fatigue T-Bone 1A (flexion)
- Essais de fatigue classique T-Bone 1B (traction) — Critère de fatigue T-Bone 1B (traction)
- ◆ Essais de fatigue classique T-Bone 1B (flexion) — Critère de fatigue T-Bone 1B (flexion)



(c) Comparaison des courbes de Wöhler en fonction de Δ^* .

FIGURE 5.84 – Comparaison entre les champs d'énergie dissipée par cycle et les critères de fatigue en traction et en flexion. R=0, RH50 et f=1Hz.

Comparaison entre les éprouvettes T-Bone RH50 et les éprouvettes Dogbone 0° RH50

La figure 5.85 montre la comparaison des courbes de fatigue en fonction de Δ^* entre les éprouvettes T-Bone (en traction) et Dogbone 0°. Nous pouvons observer que les critères de fatigue sont très proches entre les éprouvettes T-Bone 1B et les éprouvettes Dogbone 0°. Ceci est une troisième vérification que le critère de fatigue identifié sur des éprouvettes simples peut être valide pour des éprouvettes plus complexes. Pour les éprouvettes T-Bone 1A, nous constatons que pour la même durée de vie, l'énergie dissipée par cycle est moins importante que pour les autres cas d'éprouvettes. Ceci montrerait que l'énergie dissipée mesurée au niveau de la zone d'initiation n'est pas représentative du comportement en fatigue de l'éprouvette. Ceci peut être expliqué par le fait que le gradient d'orientation des fibres semble être important au niveau de l'épaisseur des éprouvettes. En effet, l'énergie dissipée par cycle calculée au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle lorsque la tige est devant ou derrière la zone observée (cf. Fig.5.50b) évolue de façon considérable (ce n'est pas le cas pour les éprouvettes T-Bone 1B). Il est donc possible que le volume capté lors du calcul de l'énergie dissipée par cycle soit plus important que le volume critique en terme de fatigue. Ceci semble cohérent avec les comparaisons entre les chargements de traction et de flexion des éprouvettes T-Bone (cf.

Fig.5.84c) puisque pour les chargements de flexion, nous induisons un chargement ayant un gradient plus important par rapport aux chargements en traction, c'est-à-dire, avec un volume critique en terme de fatigue moins important. Nous constatons aussi que l'énergie dissipée par cycle pour le même niveau de durée de vie est moins importante pour les cas de flexion par rapport aux cas de traction (pour chaque cas d'éprouvette). Pour vérifier ce scénario il faudrait mesurer de façon précise la microstructure des éprouvettes T-Bone 1A au niveau de la zone de rupture.

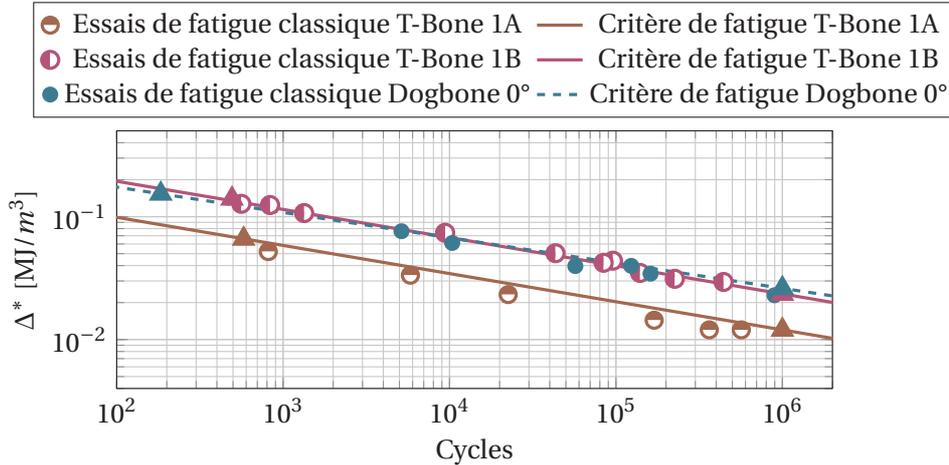


FIGURE 5.85 – Comparaison des courbes de fatigue en fonction de Δ^* entre les éprouvettes T-Bone (en traction) et les éprouvettes Dogbone 0°. RH50, R=0, f=1Hz et température ambiante.

5.6 Bilan pour les éprouvettes de structure

La définition conjointe par les partenaires du *work package* 3 du projet DURAFIP des éprouvettes de structure a permis de générer des superpositions de microstructure et de chargements complexes. Dans le cas des éprouvettes Wavy 1 et Wavy 2, il existe un défaut de surface (givrage) qui peut avoir une influence non négligeable sur le comportement mécanique en fatigue des éprouvettes.

En termes de protocoles d'analyse mis en place, nous remarquons que l'analyse des champs thermiques est un outil très précieux. En effet, il permet d'évaluer le champ d'énergie dissipée par cycle et le champ de couplage thermoélastique, lesquels permettent d'apprécier les hétérogénéités des éprouvettes de structure. En particulier, nous pouvons évaluer la cohérence entre le champs d'orientation des fibres et le champ d'énergie dissipée par cycle (ou bien de couplage thermoélastique). Ce genre d'analyse nous a permis, entre autres, de montrer que pour le cas des éprouvettes Wavy 1 DAM et Wavy 2 DAM, les contraintes résiduelles peuvent jouer un rôle important dans la réponse mécanique. Cette analyse nous a également permis de confirmer la différence en termes de champ d'énergie dissipée par cycle et de couplage thermoélastique entre les éprouvettes T-Bones, lesquelles ont une géométrie similaire, mais une configuration d'injection différente. La relation entre l'énergie dissipée par cycle et l'orientation des fibres reste par contre à préciser, car elle peut être couplée aux champs mécaniques locaux (cf. §5.5.3).

En terme d'analyse de la ruine, chacune des éprouvettes présente un comportement particulier. Les principales observations sont :

Éprouvettes Wavy 1 :

- le défaut de givrage semble piloter la ruine en fatigue, car la rupture est systématiquement observée au niveau de la zone de givrage que la teneur en humidité soit RH50 ou DAM ;
- la rupture n'est pas localisée dans la zone où la dissipation est maximale ;
- la phase de propagation est négligeable.

Éprouvettes Wavy 2 :

- nous observons deux zones de rupture. Pour des chargements importants, la rupture apparaît systématiquement au niveau de la première zone convergente pour les deux teneurs en humidité étudiées ;
- pour une teneur en humidité de RH50 et pour des niveaux de chargements importants, la rupture n'est pas localisée dans la zone ayant la dissipation la plus importante et en même temps celle-ci ne présente pas de givrage. Cela illustre le rôle de l'orientation locale dans la relation entre la durée de vie et l'énergie dissipée par cycle ;
- si le niveau de chargement est faible, la rupture aura toujours lieu au niveau de la deuxième zone convergente (pour les deux cas de teneur en humidité) dans une zone qui présente du givrage. Cela montre que pour ces niveaux de chargement, le comportement en fatigue peut être piloté par le défaut surfacique ;
- la phase de propagation est négligeable.

Éprouvettes T-Bone 1A :

- pour ce cas d'éprouvettes, la rupture a toujours lieu au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle. Il n'y a pas de côté privilégié observé. Comme nous l'avons illustré pour le cas de la traction, le champ de couplage thermoélastique est symétrique et la microstructure prédite est elle également symétrique, ce qui est cohérent avec le fait qu'il n'y a pas de côté privilégié pour la rupture ;
- la rupture apparaît en pied de tige dans un endroit de forte concentration de contrainte ;
- la phase de propagation peut atteindre 10% de la durée de vie à rupture en traction.

Éprouvettes T-Bone 1B :

- pour ce cas d'éprouvettes la rupture a toujours lieu au niveau de la zone de jonction entre la tige et la semelle du côté opposé par rapport à la direction d'injection. Comme nous l'avons illustré pour le cas de la traction, le champ de couplage thermoélastique et la microstructure prédite ne sont pas symétriques, ce qui est cohérent avec le fait qu'il y a bien un côté privilégié pour la rupture ;
- la rupture apparaît en pied de tige dans un endroit de forte concentration de contrainte ;

- la phase de propagation peut atteindre 10% de la durée de vie à rupture en traction.

Le tableau 5.1 montre le récapitulatif des principales observations sur la ruine des éprouvettes de structure.

Epreuve		Zone de rupture		Ratio propagation/initiation	Validité de la prédiction rapide	Corrélation avec le critère Dogbone 0° RH50
Wavy 1	Traction DAM	Deuxième zone divergente (zone ayant du givrage)		<1% des la durée de vie à la rupture	OK	Non (écart d'une décade)
	Traction RH50	Deuxième zone divergente (zone ayant du givrage)		<1% des la durée de vie à la rupture	OK	Oui (écart de moins d'une demi-décade)
Wavy 2	Traction DAM	Première zone convergente pour les hauts niveaux de sollicitation	Deuxième zone divergente pour les bas niveaux de sollicitation (zone ayant du givrage)	<1% des la durée de vie à la rupture	OK	Non (écart de moins d'une décade)
	Traction RH50	Première zone convergente pour les hauts niveaux de sollicitation	Deuxième zone divergente pour les bas niveaux de sollicitation (zone ayant du givrage)	<1% des la durée de vie à la rupture	OK	Oui (écart de moins d'une demi-décade)
T- Bone 1A	Traction RH50	En pied de nervure (pas de coté privilégié)		<10% de la durée de vie à la rupture	OK	Non (écart d'une décade)
	Flexion RH50	En pied de nervure (pas de coté privilégié)		Contrôlé en déplacement (propagation importante)	OK	Non (écart d'une décade)
T- Bone 1B	Traction RH50	En pied de nervure (du côté opposé à la tige par rapport à l'injection)		<10% de la durée de vie à la rupture	OK	Oui (écart de moins d'une demi-décade)
	Flexion RH50	En pied de nervure (du côté opposé à la tige par rapport à l'injection)		Contrôlé en déplacement (propagation importante)	OK	Non (écart de moins d'une décade)

TABLE 5.1 – Récapitulatif des principales observations faites concernant la ruine des éprouvettes de structure.