

Observation de l'endommagement

L'objectif de ce chapitre est tout d'abord de réaliser, à l'aide de l'observation des faciès de rupture, une étude qualitative de l'influence de la température et de la géométrie (ou triaxialité) sur les différents aspects qui caractérisent l'endommagement. On s'attachera notamment à valider l'hypothèse proposée dans le chapitre précédent (voir § 3.4.1) d'un endommagement ductile peu sensible à la température.

Dans un deuxième temps, les analyses fractographiques des faciès de rupture des éprouvettes *CT*, *SENT* permettront la caractérisation de la nature de la rupture. En effet, pour étudier le clivage dans la partie basse de la zone de transition ductile-fragile, il est nécessaire de distinguer les éprouvettes rompues uniquement en clivage qui serviront de base à la modélisation (§6).

4.1 L'effet de température sur l'endommagement et la rupture

Afin d'évaluer l'influence de la température sur le mode de rupture l'ensemble des faciès des éprouvettes AE_χ ont été observés au microscope électronique à balayage (*MEB*).

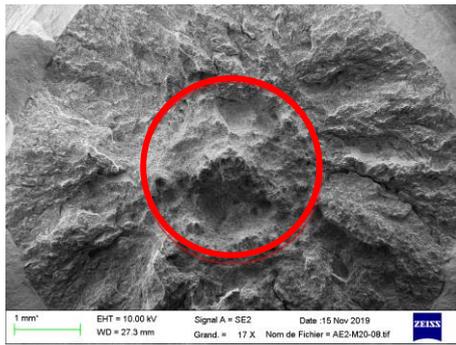
La Figure 44 et Figure 45 présentent les comparaisons des observations réalisées sur les AE_2 et AE_4 à différentes températures et pour des différents niveaux de grossissement.

L'amorçage est ductile pour toutes les éprouvettes AE_χ testées entre -100°C et -20°C . A -100°C et -50°C , la déchirure ductile est suivie par une rupture en clivage. La taille de la zone ductile réduit de taille lorsqu'on diminue la température. A -100°C , la zone ductile à l'amorçage devient très petite et est localisée sur des inclusions *MnS* (Figure 44). On note également qu'après l'amorçage ductile, seule l'éprouvette AE_2 est rompue par clivage à -20°C contrairement aux éprouvettes AE_4 et AE_{10} qui présentent une zone ductile centrée et une zone de cisaillement considérable aux bords.

Sur la Figure 45 on distingue des grandes cupules qui ont des tailles qui varient entre $\sim 20\mu\text{m}$ (indiquées par des flèches bleues dans la Figure 45) et $\sim 200\mu\text{m}$ (indiquées par des flèches jaunes dans la Figure 45) et de très petites cupules $\sim 1\mu\text{m}$ (Cercles noirs de la Figure 46). Les grandes cupules se forment sur des inclusions *MnS* dont certaines sont allongées et significativement de grandes tailles. Les cupules plus petites se forment sur des carbures Fe_3C . Sur la Figure 45 et sur la Figure 46, on remarque que pour une géométrie AE_χ donnée, les cupules ont des tailles comparables entre -20°C et -50°C . On en déduit que la température n'a pas d'effet remarquable sur la taille des cupules.

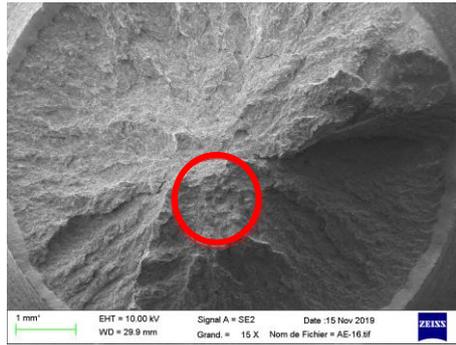
L'amorçage ductile est contrôlé par un niveau de déformation. Le fait que la ductilité des éprouvettes AE_χ ne dépende pas de la température (§3.4.1) signifie que ce niveau de déformation d'amorçage n'en dépend pas non plus. Du point de vue de la modélisation, cette remarque signifie que les paramètres du modèle d'endommagement à utiliser ne doivent pas dépendre de la température.

1987-BT1-AE(2)-1 à -20°C



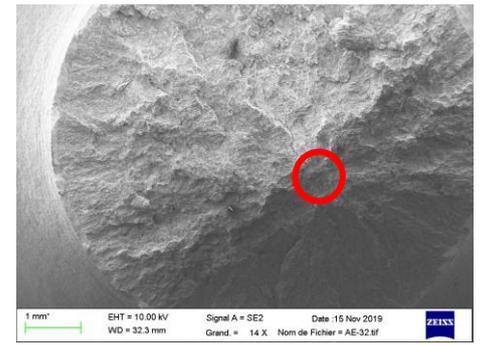
Diamètre de la zone ductile ~2.7mm
Le reste du faciès est fragile (clivage)

1987-BT1-AE(2)-3 à -50°C



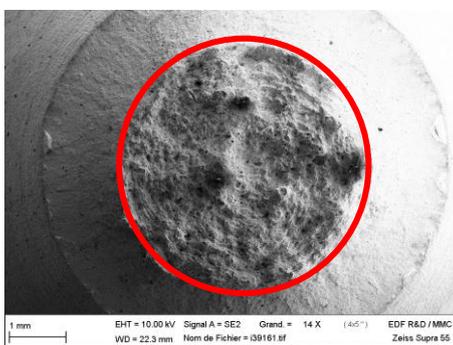
Diamètre de la zone ductile ~900µm
Le reste du faciès est fragile (clivage)

1987-BT1-AE(2)-4 à -100°C



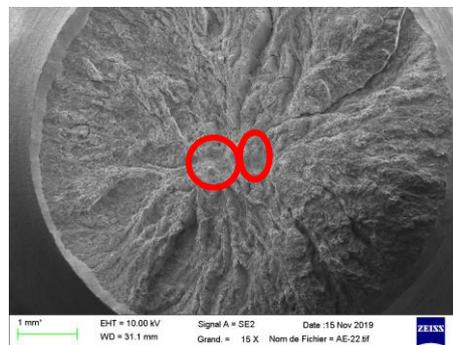
Zone ductile : une seule inclusion
Le reste du faciès est fragile (clivage)

1987-BT2-AE4-1 à -20°C



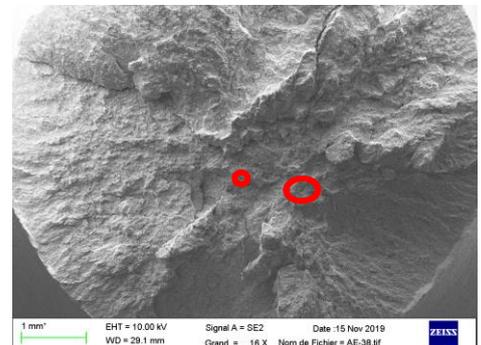
100% ductile. Zone ductile centrée.
Le reste du faciès est ductile(cisaillement)

1987-BT2-AE4-2 à -50°C



Diamètre de la zone ductile ~900µm
Le reste du faciès est fragile (clivage)

1987-BT2-AE4-3 à -100°C



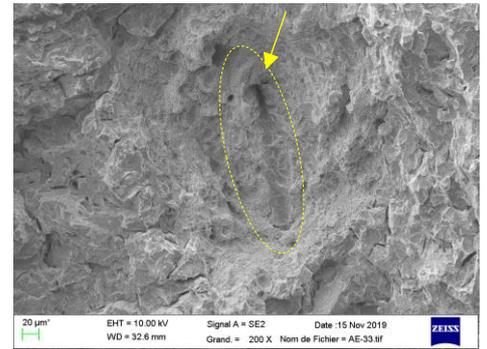
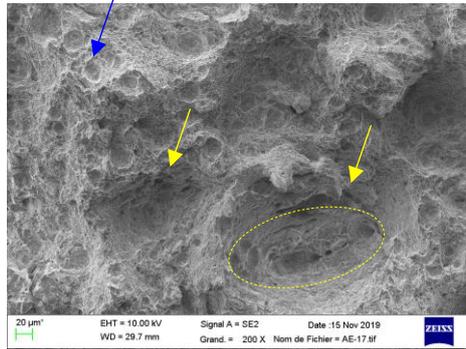
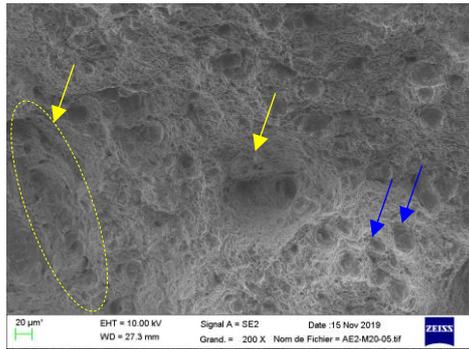
Zone ductile : Deux petites inclusions
Le reste du faciès est fragile (clivage)

Figure 44 : Taille de la zone ductile (en rouge) mesurée sur les éprouvettes AE_2 et AE_4 . L'échelle des images est 1mm.

1987-BT1-AE (2) -1 à -20°C
Au centre de la zone ductile

1987-BT1-AE (2) -3 à -50°C
Au centre de la zone ductile

1987-BT1-AE (2) -4 à -100°C
Au centre de la zone ductile locale



1987-BT2-AE4-1 à -20°C

1987-BT2-AE4-2 à -50°C

1987-BT2-AE4-3 à -100°C

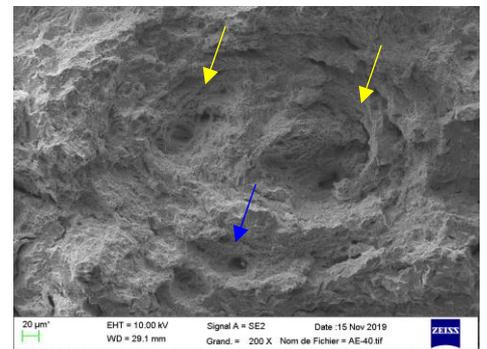
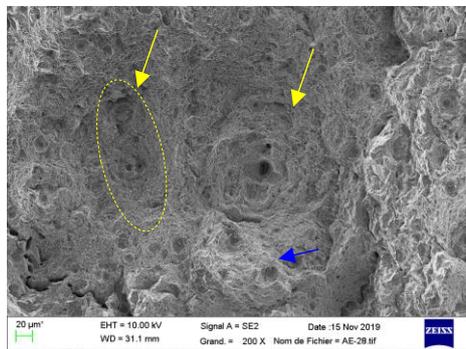
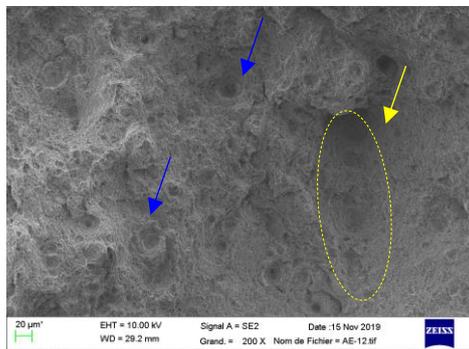


Figure 45 : Image au centre (échelle 20µm) des zones ductiles observées dans la figure précédente. Présence des cupules de grandes tailles initiées sur des inclusions *MnS* (très allongées et d'autres relativement de petites tailles)

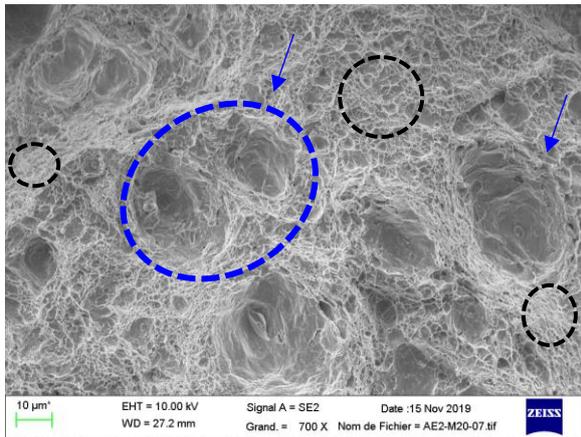
4.2 L'effet de l'état de triaxialité sur l'endommagement et la rupture

Pour évaluer l'effet de la triaxialité sur l'endommagement et la rupture, on propose d'observer toutes les géométries testées à -20°C . Puisque la triaxialité est différente d'une géométrie à l'autre, on peut par simple comparaison des faciès, déduire l'effet de ce paramètre sur l'endommagement et sur la rupture. On rappelle que : $\tau_{TC6} \approx \tau_{DP} < \tau_{AE10} < \tau_{DP6} < \tau_{AE4} < \tau_{AE2} < \tau_{SENT0.5} < \tau_{CT12.5}$. On choisit donc de regarder séparément l'effet d'une grande, moyenne et faible triaxialité sur la taille des cupules et sur le mécanisme de rupture.

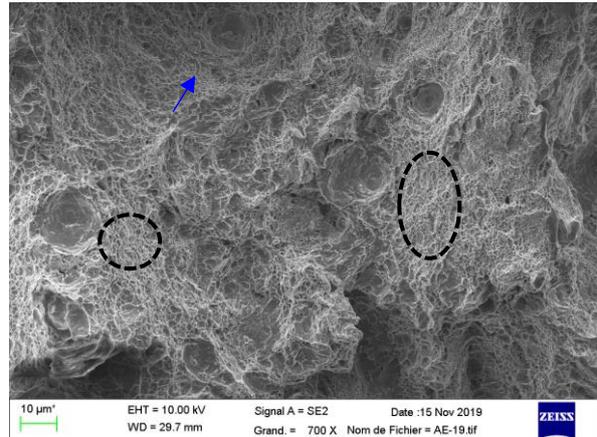
4.2.1 Comparaison des éprouvettes AE (triaxialité modérée)

A partir des observations (Figure 46) on remarque que la taille des cupules croît en fonction de la triaxialité. L'éprouvette AE_4 a une triaxialité plus grande que la AE_{10} et donc présente des cupules plus grosses. En outre, on remarque que le pourcentage des grandes cupules par rapport aux petites, décroît en fonction de la triaxialité (comparaison des éprouvettes AE_2 et AE_4). La triaxialité de l'éprouvette AE_2 favorise la croissance des cupules jusqu'à ce qu'elles se rejoignent par striction sur un petit ligament et coalescent entre elles (Figure 46, Figure 47). Une grande triaxialité favorise alors la coalescence des cupules par striction interne (Stone *et al.*, 1985). On rappelle que l' AE_2 est la seule qui a présenté une rupture par clivage à -20°C ce qui n'est pas le cas pour AE_4 et AE_{10} qui ont une triaxialité relativement faible (Figure 47). Ceci confirme le fait qu'une grande triaxialité favorise le clivage (Figure 44) (Soboyejo, 2002).

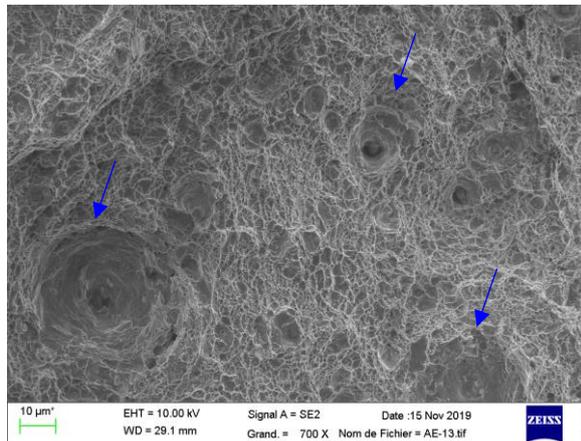
1987-BT1-AE (2) -1 à -20°C
Au centre de la zone ductile



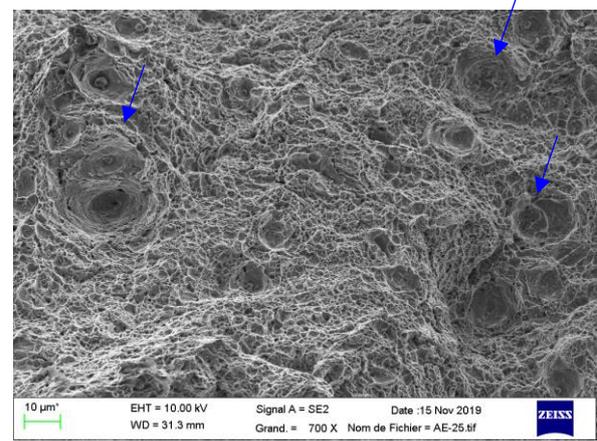
1987-BT1-AE (2) -3 à -50°C
Au centre de la zone ductile



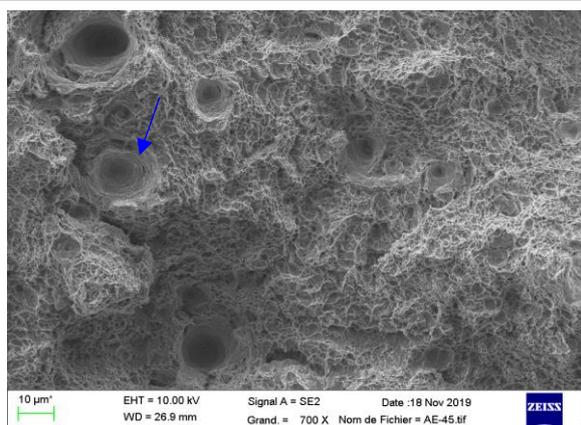
1987-BT2-AE4-1 à -20°C
Au centre de la zone ductile



1987-BT2-AE4-2 à -50°C
Au centre de la zone ductile



1987-BT3-AE10-1 à -20°C observée au centre



1987-BT3-AE10-2 à -50°C observée au centre

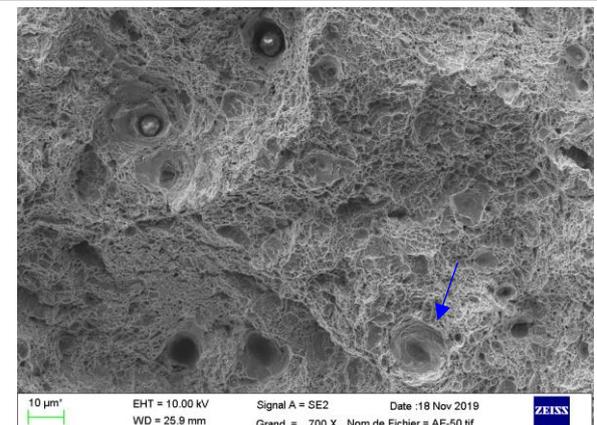


Figure 46 : Images (Echelle 10μm) illustrant des grandes et de très petites cupules (les cupules à l'intérieur des cercles noirs par exemple) à deux températures : -20°C et -50°C. Les grandes cupules ~20μm sont entourées par des petites cupules qui font quelques μm en taille. Ces petites cupules sont germinées sur des carbures. Les cercles bleus en pointillés montrent l'exemple d'une striction interne des deux cupules.

(a) 1987-BT1-AE (2) -1

(b) 1987-BT2-AE4-1

(c) 1987-BT3-AE10-1

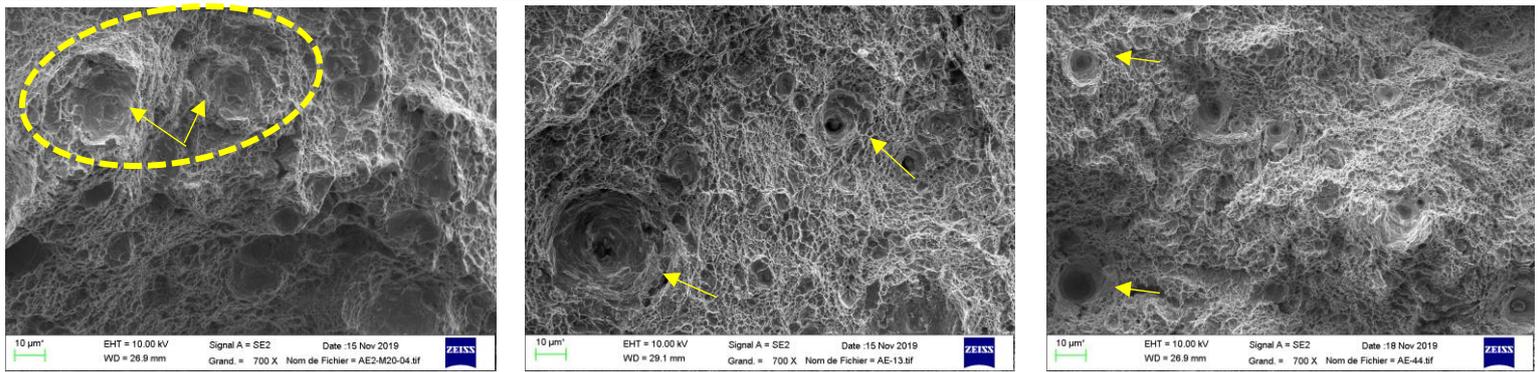


Figure 47 : Images au centre (échelle 10µm) des éprouvettes AE_{χ} . Les flèches jaunes désignent la plus grande cupule de l'image. Les cercles en pointillés montrent l'exemple d'une striction interne des deux cupules.

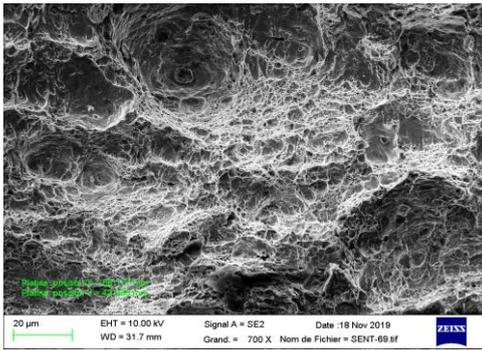
4.2.2 Comparaison des éprouvettes fissurées (triaxialité élevée)

On propose d'observer la zone de déchirure ductile des éprouvettes $CT_{12.5}$, $SENT_{0.3}$, $SENT_{0.5}$ et $SENT_{0.7}$ en trois positions différentes qu'on repère par rapport au front de la préfissure de fatigue (Figure 48).

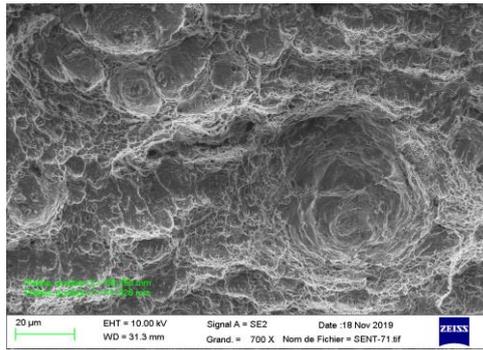
Pour une éprouvette donnée ($CT_{12.5}$ ou $SENT_{a_0/W} \in \{0.3; 0.5; 0.7\}$), la comparaison à deux positions différentes montre que les cupules gardent une taille presque constante tout au long de la zone de déchirure ductile. Dans toutes les positions observées, la coalescence des cupules se fait par striction interne. La triaxialité élevée des éprouvettes $CT, SENT$ favorise la croissance des cupules et leur coalescence par striction interne. Ceci est en accord avec notre remarque précédentes sur l'effet de triaxialité sur les éprouvettes AE_χ .

Finalement, on constate que la profondeur initiale de la fissure dans les éprouvettes $SENT$ n'a pas d'effet remarquable sur la taille des grandes cupules observées (Figure 48 : $a_{1,2}, b_{1,2}, c_{1,2}$). La taille des cupules des éprouvettes $SENT_{a_0/W}$ est comparable aux tailles des cupules dans l'éprouvette $CT_{12.5}$.

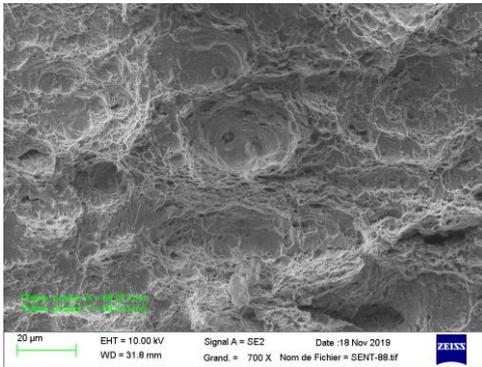
(a₁) 2141-SENT-24($a_0/W = 0.3$) à -20°C
d = 1 mm du front de fatigue



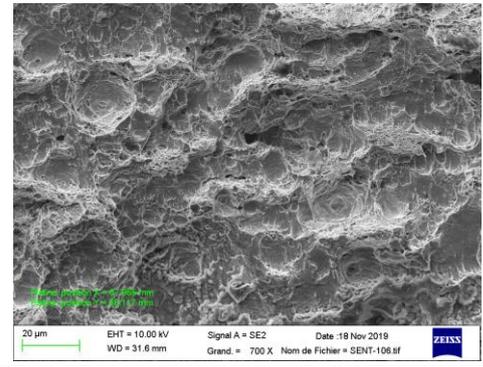
(a₂) 2141-SENT-24($a_0/W = 0.3$) à -20°C
d = 3 mm du front de fatigue



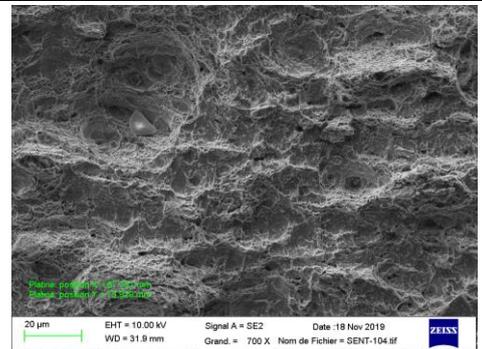
(b₁) 2141-SENT-21($a_0/W = 0.5$) à -20°C
d = 1 mm du front de fatigue



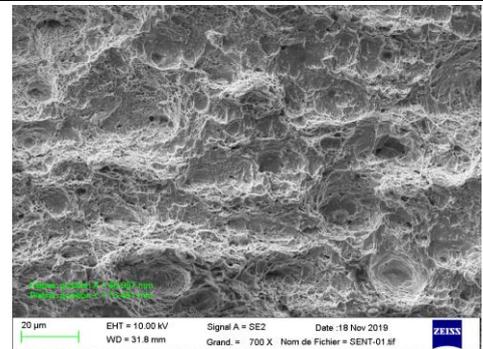
(b₂) 2141-SENT-21($a_0/W = 0.5$) à -20°C
d = 1.5 mm du front de fatigue



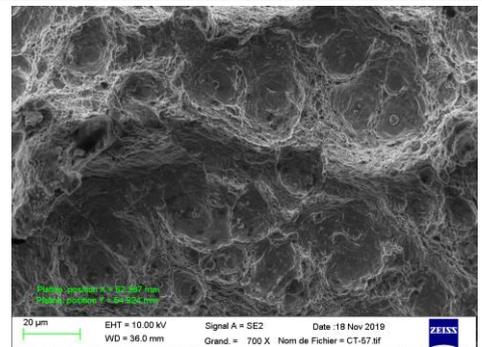
(c₁) 2141-SENT-24($a_0/W = 0.7$) à -20°C
d = 1 mm du front de fatigue



(c₂) 2141-SENT-24($a_0/W = 0.7$) à -20°C
d = 1.5 mm du front de fatigue



(d₁) 2141-T6-CT12-13($B = 12.5$) à -20°C
d ≈ 0.5 mm du front de fatigue



(d₂) 2141-T6-CT12-13($B = 12.5$) à -20°C
d ≈ 1.5 mm du front de fatigue

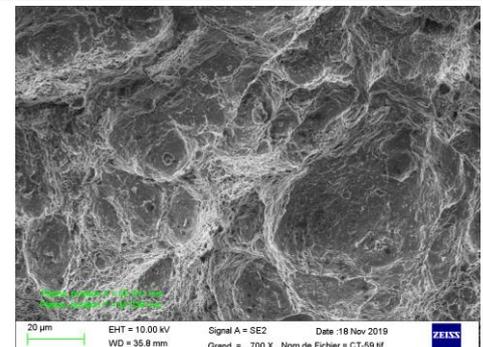


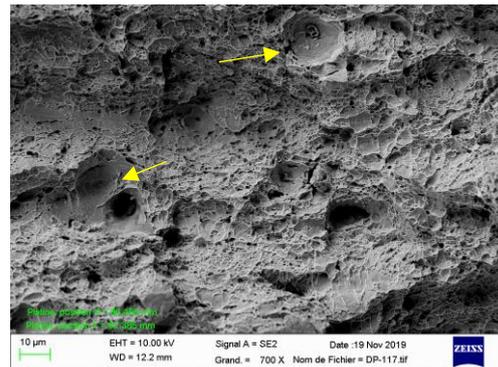
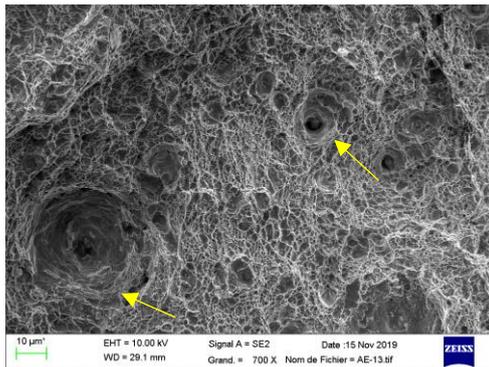
Figure 48 : Comparaison par éprouvette du faciès observé dans deux positions différentes. Les positions sont repérées par la distance du front de la préfiçsure de fatigue notée d.

4.2.3 Comparaison $AE_\chi - DP_6$ (triaxialité modérée)

Pour les éprouvettes AE_4 , DP_6 , AE_{10} on remarque que les petites cupules sont les plus dominantes. Ces cupules sont germinées sur des inclusions de carbures durs et fortement attachées à la matrice ferritique ce qui nécessitent un niveau de déformation plus important pour leur germination. Deux grandes cupules se rejoignent (par cisaillement) à travers pleins de petites cupules intermédiaires. Autrement dit, une triaxialité modérée favorise la coalescence des micro-vides par localisation de la déformation (Figure 49) (Stone *et al.*, 1985).

(a) 1987-BT2-AE4-1

(b) 2141-T9-DP6-2



(c) 1987-BT3-AE10-1

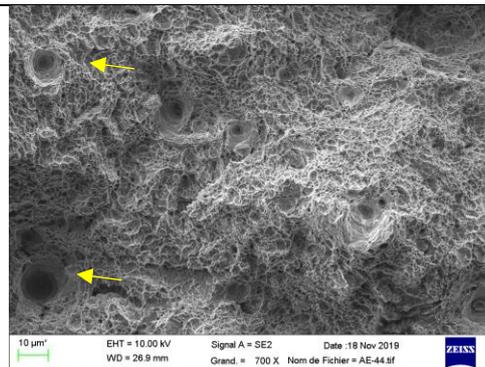


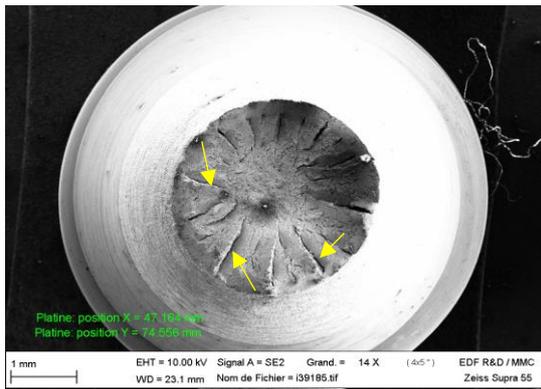
Figure 49 : Images au centre (échelle 10 μ m) des éprouvettes DP_6 , AE_4 , AE_{10} . Les flèches jaunes désignent la plus grande cupule de l'image.

4.2.4 Comparaison $TC_6 - DP$ (faible triaxialité)

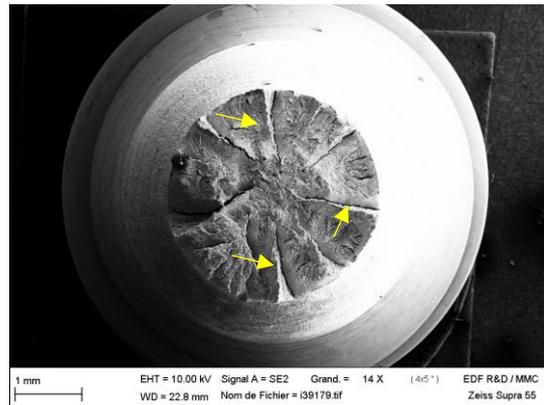
Les éprouvettes DP et TC_6 ont des triaxialités faibles. Cette faible triaxialité favorise une rupture par cisaillement internes des cupules germinées plutôt que leur croissance (voir l'exemple dans la Figure 50 : $b_{1,2}, c$). La Figure 50(d) montre que le faciès des éprouvettes AE_{10} au niveau des bords du *Cup-Cone* est semblable au faciès des éprouvettes TC_6 (Figure 50(b_1)). Ceci est expliqué par le fait que la triaxialité dans les bords du *Cup-Cone* des AE_χ est plus faible par rapport au centre.

Par ailleurs des fissures radiales sont observées au niveau des faciès des éprouvettes TC_6 à toutes les températures. Ce type de rupture est connu sous le nom de *Rosette fracture* et est liée à la décohesion des grains austénitiques suivant le chemin des joints des grains primaires. Cette décohesion est due à la rupture des carbures au niveau de ces joints de grains selon (Verma *et al.*, 2017).

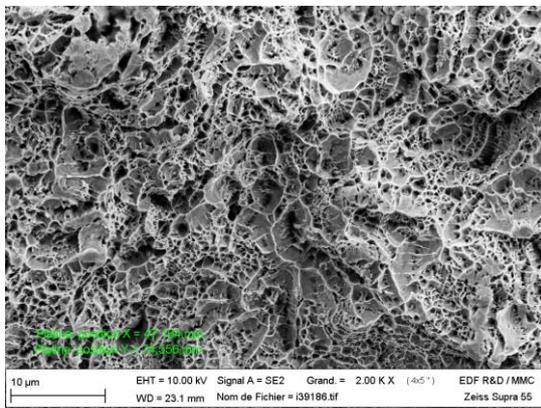
(a₁) 1987-BT1-TC6-1 à -20°C



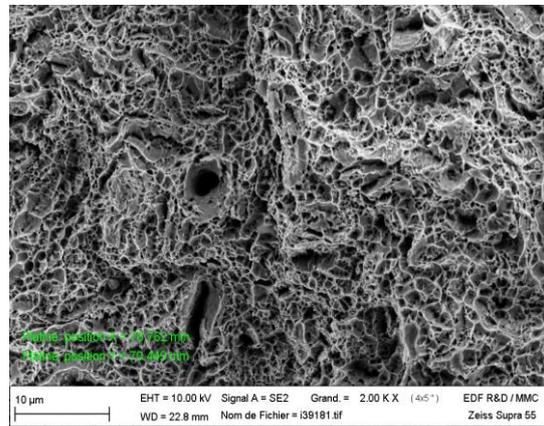
(a₂) 1987-BT2-TC6-1 à -100°C



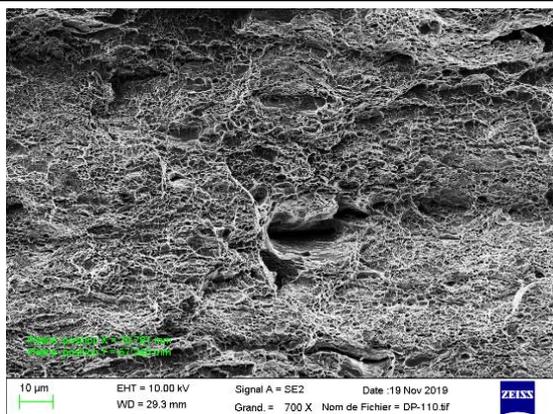
(b₁) 1987-BT1-TC6-1 à -20°C
au centre de l'éprouvette



(b₂) 1987-BT2-TC6-1 à -100°C
au centre de l'éprouvette



(c) 2141-T9-DP-2



(d) 1987-BT3-AE10-1 à -20°C

Au bord du Cup-Cone

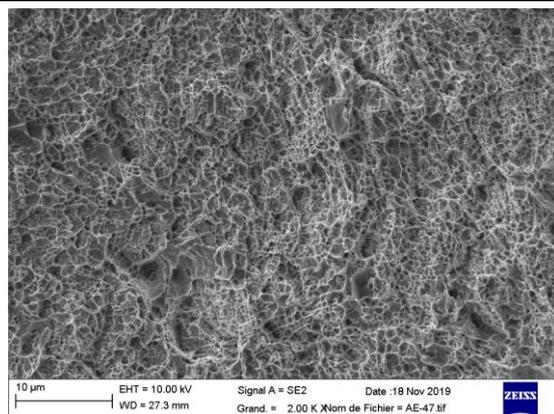


Figure 50 : Comparaison des cupules au centre de l'éprouvettes TC₆ à -20°C et à -100°C. Ces deux observations sont comparées avec la partie cisaillement du Cup-Cone de l'éprouvette AE₁₀ à -20°C et avec le faciès de l'éprouvette DP à -20°C. les fissures radiales sont indiquées par des flèches jaunes.

4.3 Conclusion partielle

Dans cette première partie des observations fractographiques, la nature ductile de l'amorçage de la rupture des AE_χ a été confirmée (voir une synthèse dans le Tableau 9). Ceci nous permettra d'utiliser ces éprouvettes pour avoir une première identification des paramètres lors de la modélisation préliminaire de l'endommagement (§5.3). On remarque que la taille de la zone d'amorçage ductile mise en évidence réduit lorsque la température diminue. A -100°C l'amorçage devient presque localisé sur des inclusions MnS .

Une comparaison par température et par géométrie entre les faciès de rupture est présentée par la suite. Pour une géométrie donnée, la température n'a pas d'effet remarquable sur la taille des cupules observées. Qualitativement, la taille des cupules présentes dans le faciès ne semble dépendre que de la géométrie de l'éprouvette et donc de la triaxialité. D'une part, une grande triaxialité favorise des cupules de grandes tailles qui coalescent par striction interne. Dans ce cas, le faciès de rupture est dominé par des cupules de grande taille ($\sim 200\mu\text{m}$). Et d'une autre part, une triaxialité modérée semble favoriser l'apparition de quelques cupules de grandes tailles qui se coalescent par cisaillement à des niveaux de déformations plus élevés probablement. Dans ce cas, le faciès est dominé par des cupules de petites tailles (\sim quelques microns). Finalement, on a montré qu'une triaxialité faible favorise le cisaillement. Dans ce cas, le faciès semble être entièrement dominé par des cupules de petite taille comme on a pu le constater au niveau des bords des éprouvettes AE_χ qui est l'endroit où la triaxialité est la plus faible. Ces observations montrent que l'endommagement de notre matériau semble dépendre uniquement de la triaxialité. La température n'influence pas l'endommagement ce qui confirme les résultats de l'analyse expérimentale du chapitre §3. Ces tendances, clairement visibles, pourraient être à l'avenir précisément quantifiées par une analyse quantitative basée sur un traitement d'image.

On résume dans Tableau 9 la nature de l'amorçage et de rupture des éprouvettes non fissurées :

Température	Eprouvette	Faciès global
-20°C	1987-BT1-AE(2)-1	Zone ductile centrée + clivage
	1987-BT2-AE4-1	Zone ductile centrée + cisaillement
	1987-BT3-AE10-1	Zone ductile centrée + cisaillement
	2141-T9-DP6-2	Faciès ductile
	2141-T9-DP-2	Faciès ductile
-50°C	1987-BT1-AE(2)-3	Zone ductile centrée + clivage
	1987-BT2-AE4-2	Zone ductile centrée + clivage
	1987-BT3-AE10-2	Faciès ductile + quelques zones très locales de clivage ($\sim 10\mu\text{m}$)
-100°C	1987-BT1-AE(2)-4	Zone ductile locale + clivage
	1987-BT2-AE4-3	Zone ductile locale + clivage
	1987-BT3-AE10-3	Délaminage (cas unique)

Tableau 9 : Aspect global de rupture dans les faciès des éprouvettes AE , DP , DP_6 . Le cas particulier de délaminage est observé sur une seule éprouvette AE_{10} à -100°C (voir l'image du faciès en annexe §B.3)

4.4 La nature de rupture des éprouvettes fissurées : CT_B et $SENT_{0.5}$

Dans cette partie on s'intéressera à distinguer les éprouvettes CT_B et $SENT_{0.5}$ du bas de la transition des éprouvettes du haut de la transition. Les éprouvettes du bas de la transition sont les éprouvettes qui sont rompues par clivage sans déchirure ductile tandis que les éprouvettes du haut de la transition sont les éprouvettes rompues après une propagation ductile de la fissure. Cette distinction est faite dans l'objectif de modéliser la partie basse de la transition dans le chapitre (§6).

Il est important de noter que la mesure Δa ne permet pas à elle seule cette distinction. En effet cette mesure inclut l'émoussement de la fissure qui est différent de la déchirure ductile. Un $\Delta a \neq 0$ ne signifie pas forcément une avancée ductile de la fissure, par contre $\Delta a = 0$ indique que l'amorçage de la rupture est fragile et la fissure n'est pas émoussée.

Lorsque la fissure est émoussée, on désigne par la zone d'étirement (*Stretch Zone* : *SZ*) (Pardoën and Delannay, 2000; Sivaprasad *et al.*, 2002) la zone parcourue par le front de la fissure de fatigue pendant l'émoussement. (Figure 51) :

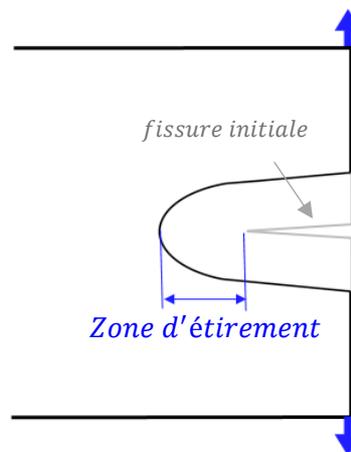


Figure 51 : Illustration de la zone d'étirement (*Stretch Zone*)

Pour choisir les éprouvettes à observer, on classe dans l'ordre croissant les données des ténacités de chaque éprouvette par température et on choisit quelques éprouvettes (5 maximum à chaque température) qui ont un $\Delta a \neq 0$. Afin de déduire la nature des autres éprouvettes non choisies à partir des celles observées, on suit la logique suivante : Si l'amorçage de l'éprouvette observée est avéré fragile alors toutes les éprouvettes qui ont des ténacités inférieures seront fragiles, et inversement, lorsque l'amorçage de l'éprouvette observée est ductile, toutes les éprouvettes qui ont des ténacités supérieures seront ductiles.

4.4.1 $T = -150^{\circ}\text{C}$

A cette température, on dispose uniquement des éprouvettes $CT_{12.5}$ qui sont fragiles avec $\Delta a = 0$ ce qui signifie que la fissure n'est pas émoussée (ou très peu). On confirme cette remarque dans Figure 52 où on peut voir que le clivage domine entièrement le faciès sans trace distincte de présence d'une SZ. A Cette température, la taille de la SZ est très limitée à cause de la valeur faible de la ténacité.

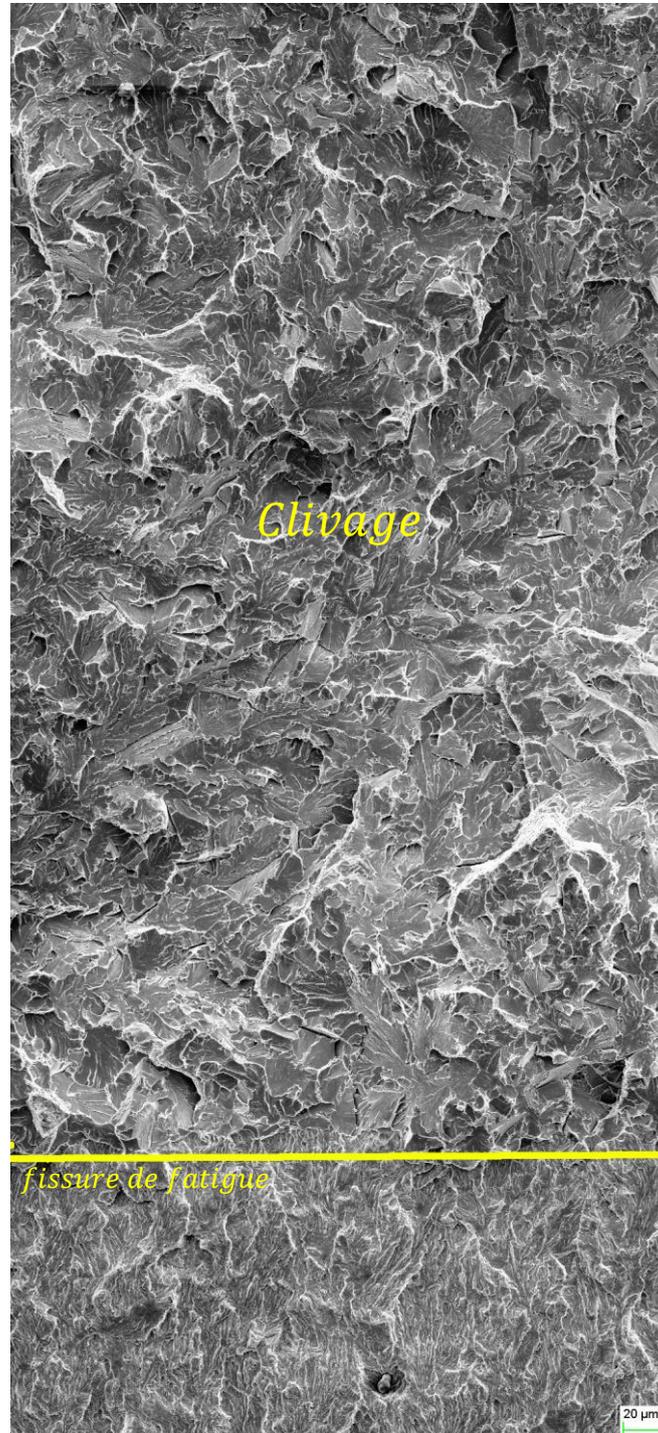


Figure 52 : Faciès de l'éprouvette 1987-T11-CT12-13 à -150°C . Le clivage domine le faciès du front de la fissure de fatigue. L'échelle en bas à droite est : $20\mu\text{m}$. $K_{JC} = 32\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

4.4.2 $T = -100^{\circ}\text{C}$

Les éprouvettes CT_B sont toutes fragiles. On observe uniquement les éprouvettes $SENT_{0,5}$ à cette température. On résume dans le Tableau 10 les données des éprouvettes $SENT_{0,5}$ observées :

$SENT_{0,5}$	$\Delta a(\text{mm})$	$K_{Jc}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	$J(\text{kJ}/\text{m}^2)$
2141 – SENT – 9	0,061	175	133,41
2141 – SENT – 3	0,052	194	163,95

Tableau 10 : Résumées des données des éprouvettes $SENT_{0,5}$ observées.

La Figure 54 met en évidence la présence de trois zones distinctes : la première zone est la SZ tandis que la deuxième zone est une zone de cisaillement et une dernière zone de clivage qui domine le reste du faciès. En effet, la fissure de fatigue s'é moussé jusqu'à une certaine limite où le clivage peut être initié. Celui-ci se déclenche dans la zone en avant de la SZ où les contraintes sont élevées ($\approx 1.5 CTOD$). Le faciès est alors rompu par clivage à partir de cet amorçage fragile. Le ligament restant entre la fissure é moussée et le site d'amorçage est rompu par cisaillement comme l'indique la présence de petites cupules de carbures (voir Figure 53). On fait donc l'hypothèse que le ligament rompu en cisaillement après que l'amorçage fragile eu lieu et que donc l'amorçage s'est fait sans aucune avancée ductile de la fissure. On en déduit que la rupture s'amorce en clivage et qu'il n'y a pas d'avancée ductile préalable de la fissure. On observe les mêmes zones dans le faciès de l'éprouvette qui a la plus grande ténacité (Figure 54). Puisque cette éprouvette s'amorce en clivage on en déduit que toutes les éprouvettes $SENT_{0,5}$ à cette température s'amorcent en clivage.

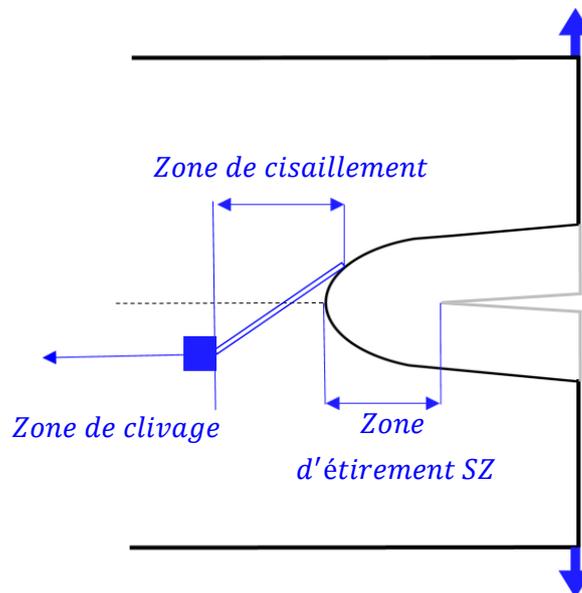


Figure 53 : Illustration des différentes zones présentes dans une éprouvette fragile

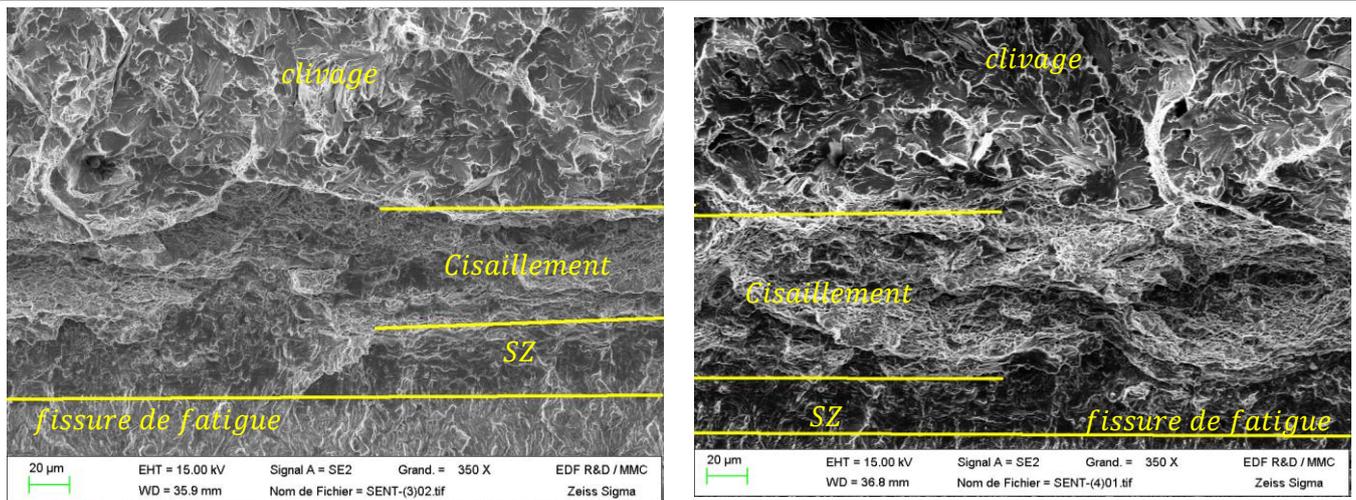


Figure 54 : Faciès des éprouvettes 2141 – *SENT* – 9/3. Existence d’une *SZ*, d’une zone de cisaillement et du clivage. Ces deux éprouvettes sont fragiles. Echelle est : 20µm.

4.4.3 $T = -50^{\circ}\text{C}$

A cette température, les éprouvettes CT_{50} sont fragiles. On s’intéresse aux éprouvettes : $CT_{12.5}$, CT_{25} et $SENT_{0.5}$. Tableau 11 résume les éprouvettes choisies :

$CT_{12.5}$	$\Delta a(mm)$	$K_{Jc}(MPa\sqrt{m})$	$J(kJ/m^2)$
2141 – T11 – CT12 – 11	0,083	205	184,66
2141 – T6 – CT12 – 9	0,153	240	253,10
CT_{25}	$\Delta a(mm)$	$K_{Jc}(MPa\sqrt{m})$	$J(kJ/m^2)$
2141 – T3 – CT25 – 3	0,234	271	322,70
2141 – T7 – CT25 – 2	0,688	389	664,91
$SENT_{0.5}$	$\Delta a(mm)$	$K_{Jc}(MPa\sqrt{m})$	$J(kJ/m^2)$
2141 – <i>SENT</i> – 18	0,231	267	313,24

Tableau 11 : Les éprouvettes choisies pour observation

La Figure 55 met en évidence la présence de trois zones comme dans le cas de l’éprouvettes $SENT_{0.5}$ à -100°C , à savoir : une zone d’étirement suivie par une zone du cisaillement et une zone de clivage. Le mode d’amorçage de ces deux éprouvettes est bien le clivage. Par conséquent, toutes les éprouvettes qui ont des ténacités inférieures à $205 MPa\sqrt{m}$ pour les $CT_{12.5}$ et $271 MPa\sqrt{m}$ pour les CT_{25} s’amorcent en clivage.

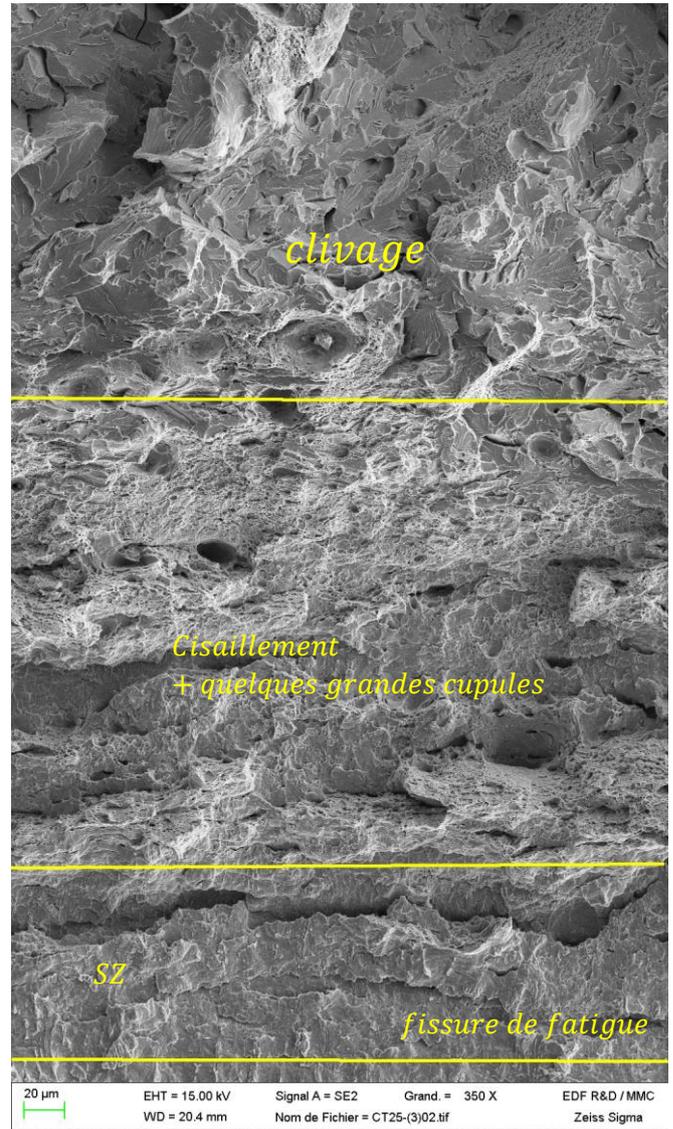
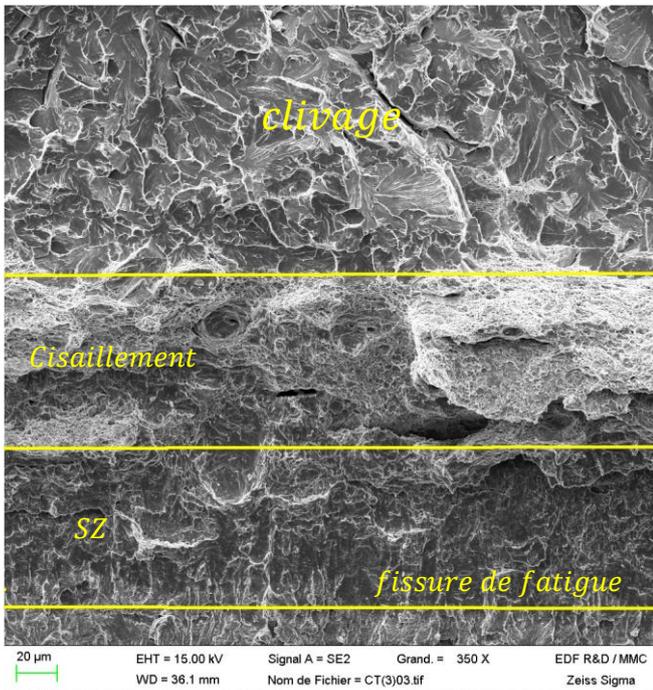


Figure 55 : Faciès des éprouvettes $CT_{12.5}$ et CT_{25} . Existence d'une SZ, d'une zone de cisaillement et du clivage. Ces deux éprouvettes sont fragiles (CT_{25} représente un cas limite). Echelle est : $20\mu m$.

En revanche, Figure 56 et Figure 57 montrent l'existence d'une nouvelle zone qui est la zone de déchirure ductile juste avant celle du clivage (dans le cas où l'éprouvette est rompue par clivage). Dans cette zone, des grosses cupules germinées sur des inclusions MnS sont observées. Ces éprouvettes ont alors une avancée ductile de la fissure. On en déduit que les éprouvettes $CT_{12.5}$, CT_{25} , $SENT_{0.5}$ qui ont des ténacités supérieures respectivement à $205 MPa\sqrt{m}$; $389 MPa\sqrt{m}$; $267 MPa\sqrt{m}$ s'amorcent également en ductile.

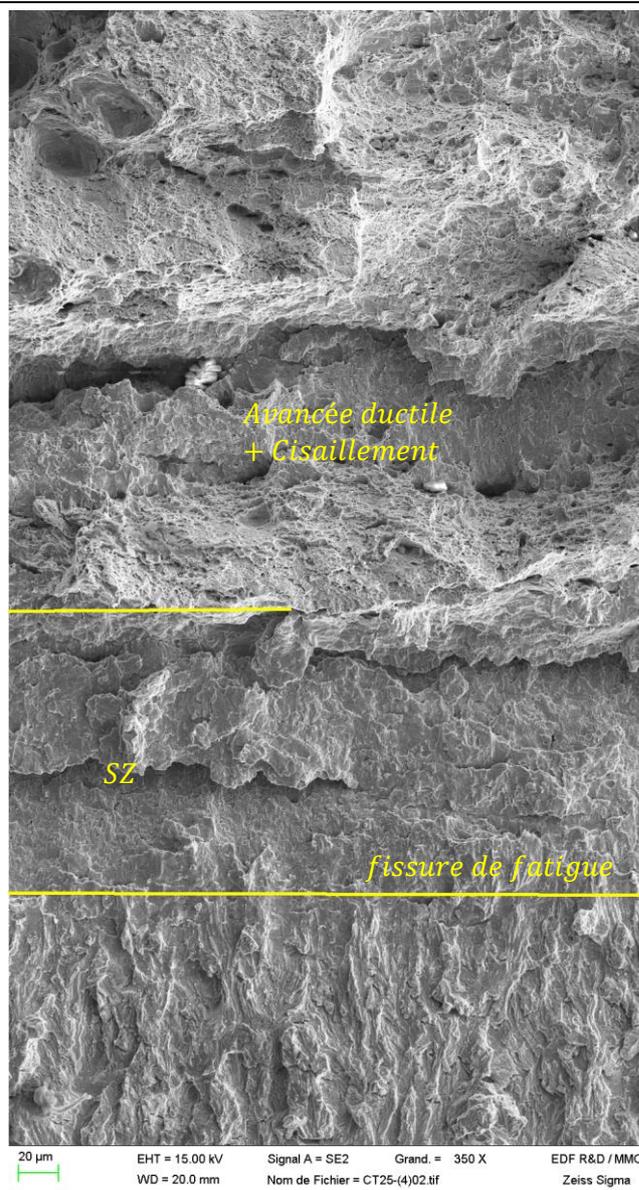
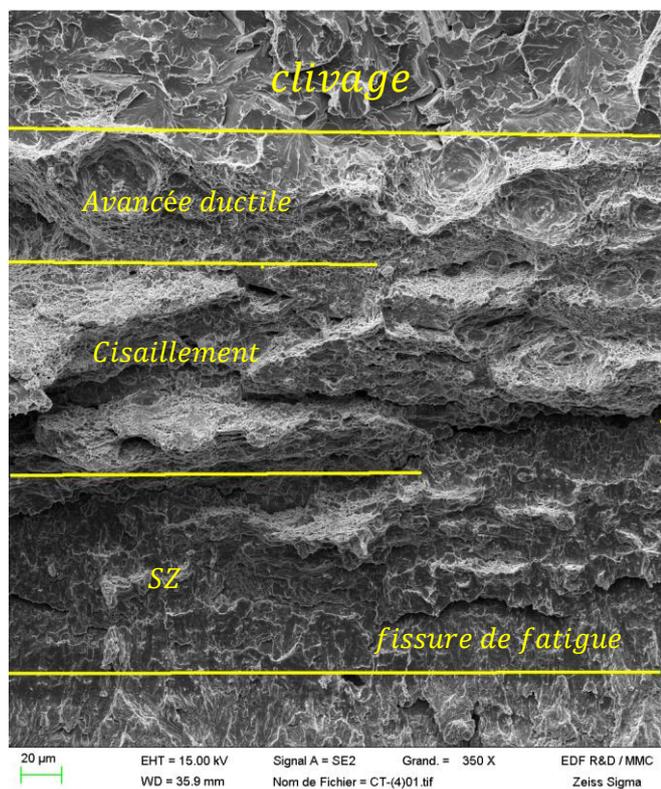


Figure 56 : Faciès des éprouvettes $CT_{12.5}$ et CT_{25} . Existence d'une SZ, d'une zone de déchirure ductile. Ces deux éprouvettes s'amorcent dans le domaine ductile. Echelle est : $20\mu\text{m}$.

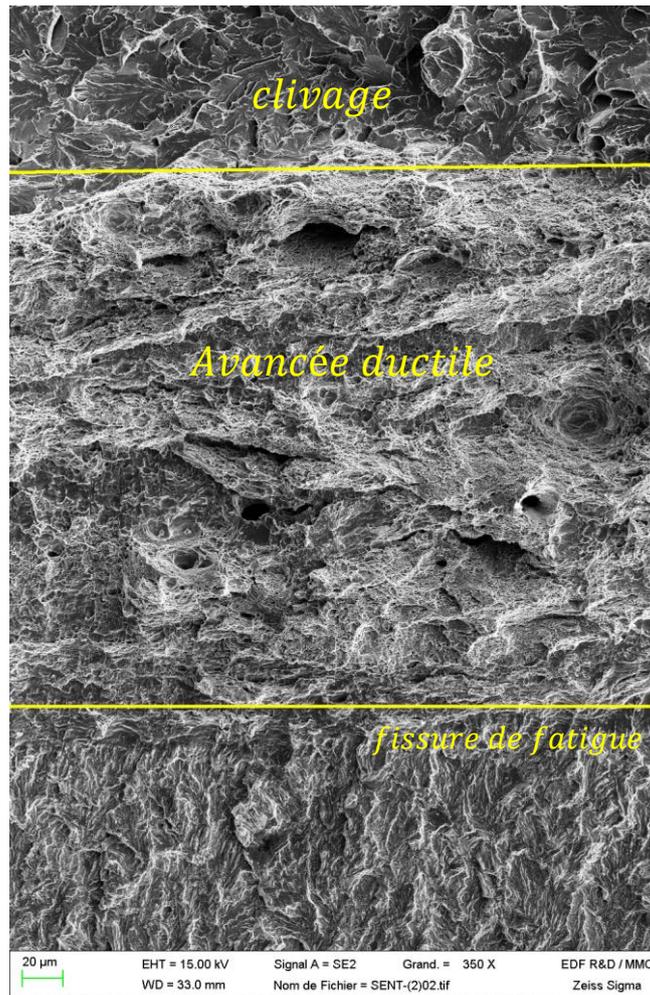


Figure 57 : Faciès de l'éprouvette $SENT_{0.5}$. Existence d'une zone d'avancée ductile de la fissure. On n'observe pas de SZ dans cette éprouvette. Echelle est : $20\mu m$.

La présence des petites cupules indique le cisaillement du ligament liant le front de la fissure émoussée avec les vides germinés sur des inclusions MnS (Figure 58). En effet, la triaxialité est maximale devant la fissure émoussée ce qui favorise la croissance des vides (triaxialité τ élevée) et ainsi, leur coalescence forme une fissure macroscopique. Cette fissure s'étend vers le front d'érousement et crée une zone de cisaillement.

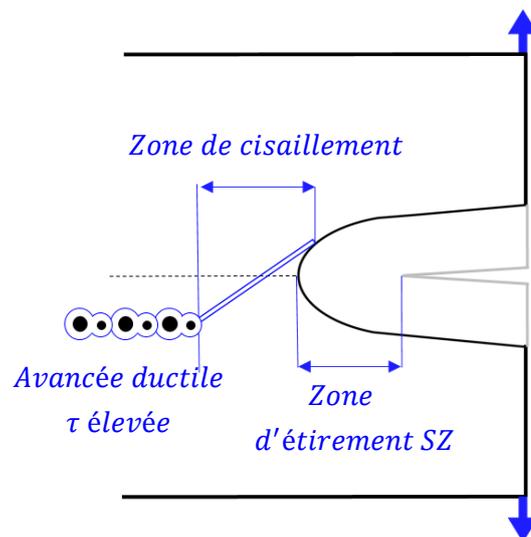


Figure 58 : Illustration des différentes zones présentes dans une éprouvette ductile

4.4.4 Discussion

L'hypothèse d'un amorçage fragile suivi par un cisaillement à -100°C et -50°C semble devoir être discutée. En effet à -100°C , les faciès observés ne présentent pas de trace d'un amorçage ductile sur une inclusion MnS de grande taille (un mécanisme possible dans la zone de transition ductile fragile comme évoqué dans le chapitre bibliographie §2.1.9) mais on a pu observer une zone de cisaillement immédiatement suivi par une zone de clivage. Ce type de faciès mixte a également été observé par (Zia-Ebrahimi, 1985) et (Ebrahimi and Seo, 1996). On trouve également une évidence de l'apparition du cisaillement au même temps que les cupules ductiles sur des éprouvettes de type Charpy *V-notch* à -70°C dans (Tanguy *et al.*, 2005). Selon (Zia-Ebrahimi, 1985) le clivage peut arriver soit avant soit après la zone de cisaillement. Dans le premier cas, la zone devra être plus étroite au centre que proche des bords libres (Figure 59.(a)). Dans le second, elle devrait avoir la forme d'une lunule (Figure 59.(b)). Ces formes n'ont pas pu être observées dans le cadre de cette thèse de sorte qu'il est difficile d'utiliser cette interprétation.

Pour étayer nos observations et nos conclusions sur la zone de cisaillement, il serait intéressant de réaliser un essai permettant de solliciter une éprouvette CT en arrêtant la sollicitation juste avant l'amorçage puis de vérifier sur cette éprouvette s'il y a ou pas une zone de cisaillement.

La démarche suivante pourrait être appliquée :

- Le niveau de chargement visé est déterminé à -50°C . Sur l'ensemble des essais à cette température, le niveau maximum de $CMOD$ à rupture obtenu pour les éprouvettes considérées de la partie basse de la zone de transition, est relevé.
- A -20°C , on charge une éprouvette de géométrie identique (au même a_0/W) et on stoppe l'essai pour le niveau de $CMOD$ obtenu ci-dessus. Ce chargement serait réalisé à -20°C afin de diminuer le risque de rupture fragile tout en étant à $CTOD$ identique.

En effet, pour cet acier, le comportement peut être modélisé par une courbe maitresse normalisée par $\sigma_Y = (R_m + R_{p0,2})/2$ comme montré dans le chapitre (§3). A $CMOD$ identique, la grandeur J/σ_Y est identique entre -50°C et -20°C . Or, l'amorçage en ductile étant indépendant de la température, il ne devrait pas y avoir d'amorçage ductile sur l'éprouvette à -20°C (On considère le $CMOD$ le plus grand des éprouvettes du bas de la transition). Par conséquent si l'éprouvette à -20°C ne montre pas de zone de cisaillement mais uniquement de l'émoussement, cela confirmera l'hypothèse.

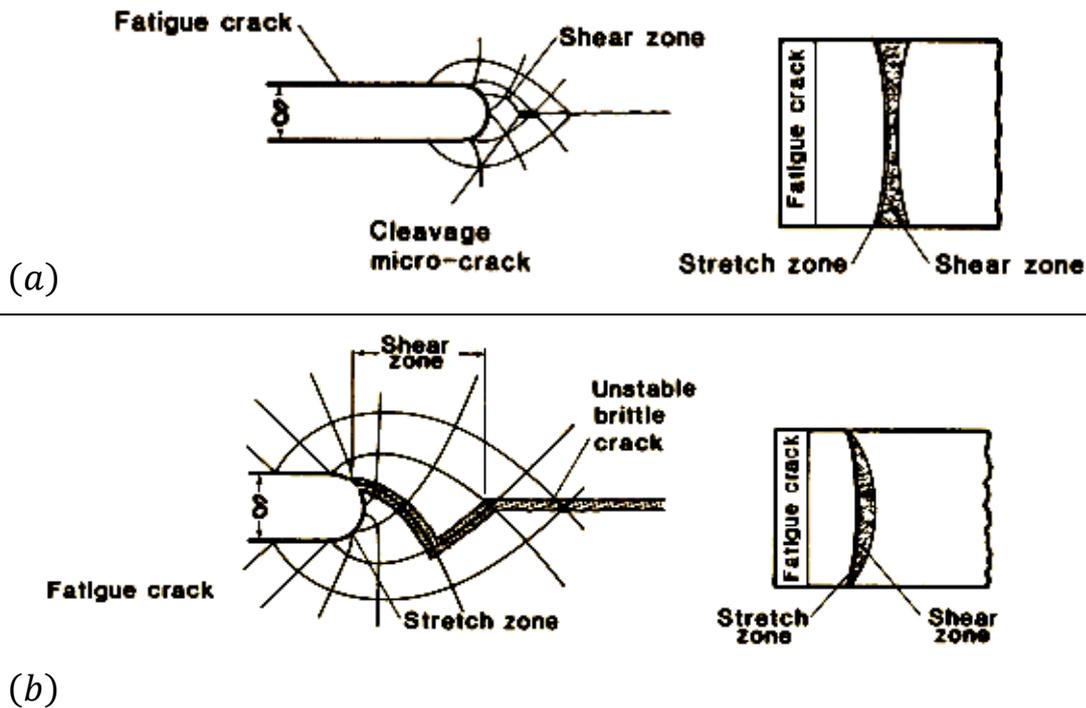


Figure 59 : Illustration de la forme de la zone de cisaillement en fonction de la nature de l'amorçage. (a) Amorçage fragile (b) Amorçage ductile. Figures adaptées de (Zia-Ebrahimi, 1985)

4.5 Conclusion partielle

L'analyse des faciès de rupture des éprouvettes CT_B et $SENT_{0.5}$ nous permet de distinguer les éprouvettes qui relèvent du bas de la transition aux trois températures : $-150^{\circ}C$, $-100^{\circ}C$ et $-50^{\circ}C$. A $-150^{\circ}C$ le faciès est entièrement fragile. La zone d'étirement est très réduite à cause de la faible ténacité. A $-100^{\circ}C$, on a distingué la présence de trois zones : la zone d'étirement SZ, la zone de cisaillement et la zone de clivage. On a émis l'hypothèse que le ligament liant la fissure émoussée et la zone d'amorçage fragile est entièrement rompue par cisaillement suite à l'action du clivage. Cette hypothèse nous a permis de caractériser les éprouvettes qui relèvent du bas de la transition et qui seront exploitées pour modéliser le clivage dans la suite. A $-50^{\circ}C$ on a distingué en plus des trois zones observées à $-100^{\circ}C$, une zone supplémentaire dans laquelle on a identifié des grandes cupules caractérisant une avancée ductile de la fissure à triaxialité élevée. Ces éprouvettes relèvent alors du haut de la transition (amorçage en ductile suivi de clivage) et ne seront pas considérées dans notre étude du clivage.

On résume dans la Figure 60 et le Tableau 12 la nature des éprouvettes de toute la base expérimentale. Le bilan global de toutes les éprouvettes de rupture et la nature de leur amorçage est présenté dans l'annexe (§B.6). La Figure 60 est en bon accord avec les prévisions de la norme présentées dans la Figure 43 car seuls 3 essais, valides au sens de la norme, sont exclus après l'observation fractographique des faciès de rupture (2 essais sur $CT_{12.5}$ et un essai sur CT_{25}).

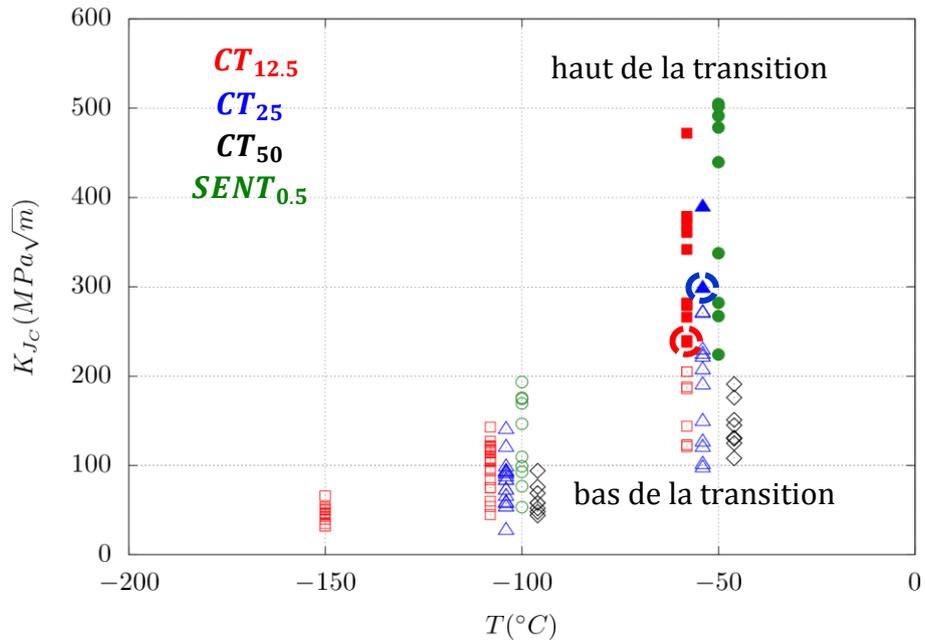


Figure 60 : Les valeurs de ténacités en fonction de la température et de type d'éprouvette. Les symboles creux désignent les éprouvettes du bas de la transition tandis que les symboles pleins indiquent les éprouvettes du haut de la transition. Le décalage des données en température a été fait artificiellement pour faciliter la lecture. Les points entourés correspondent aux essais valides au sens de la norme mais exclus suite à l'étude fractographique.

$T(^{\circ}C)$	Eprouvettes	Eprouvettes fragiles (bas de la transition)	Total
-50°C	CT_{12.5}	7	21
	CT₂₅	12	14
	CT₅₀	8	8
	SENT_{0.5}	0	10
-100°C	CT_{12.5}	20	20
	CT₂₅	16	16
	CT₅₀	8	8
	SENT_{0.5}	10	10
-150°C	CT_{12.5}	12	12
	CT₂₅ , CT₅₀ , SENT_{0.5}	0	0

Tableau 12 : Tableau sommaire des éprouvettes du bas de la transition

4.6 Conclusion globale

Dans ce chapitre, une étude fractographique des éprouvettes testées dans le chapitre (§3) a été présentée. Cette étude permet dans un premier temps d'analyser l'effet de la température et de la géométrie sur l'endommagement ductile et dans un deuxième temps de distinguer les éprouvettes CT_B , $SENT_{0.5}$ fragiles qui relèvent du bas de la zone de transition pour les modéliser par la suite.

La comparaison qualitative des faciès de rupture montre que la température a un effet limité sur les faciès de rupture pour la même géométrie. Ceci confirme que l'endommagement ne dépend pas de la température comme conclut également dans le chapitre (§3). On a également confirmé que l'amorçage de la rupture est de nature ductile sur les éprouvettes AE_χ dans l'intervalle de température $[-100^\circ C; -50^\circ C]$. Ces éprouvettes seront alors utilisées lors de la modélisation préliminaire de l'endommagement qu'on présentera dans le chapitre (§4).

Ensuite, l'analyse des faciès de rupture a permis d'identifier, sur les éprouvettes CT_B , $SENT_{0.5}$, la nature de l'amorçage de la rupture. L'analyse fine des faciès de rupture permet de mettre en évidence une zone de cisaillement dont la formation est considérée comme postérieure à l'amorçage fragile. Néanmoins, cette interprétation devrait être étayée par des essais complémentaires dans le futur. Suite aux observations précédentes : 93 éprouvettes présentent un amorçage fragile dans un total de 119 éprouvettes CT_B et $SENT_{0.5}$. L'ensemble des éprouvettes fragiles sera utilisé dans le chapitre (§6) afin de modéliser le clivage dans la partie basse de la zone de transition ductile-fragile.

La modélisation du clivage nécessite la description préalable du comportement élastoplastique de notre matériau. Dans le chapitre suivant, on s'intéresse à modéliser le comportement élastoplastique en proposant une formule d'écrouissage cohérente avec l'existence de la courbe maitresse qu'on a démontrée dans le chapitre (§3).