

Modélisation de l'endommagement

Les essais mécaniques présentés au chapitre II ont indiqué le rôle joué par l'endommagement sur les résultats macroscopiques. Dans le chapitre III, les observations microscopiques ont indiqué que la croissance de cavités était le mécanisme endommageant dans le PVDF. Etant donné que ce mécanisme a été bien identifié sur les éprouvettes AE, on choisit de travailler sur cette géométrie pour identifier les paramètres numériques d'endommagement. On compare également les prévisions du modèle avec l'expérience. Les calculs sur ces éprouvettes permettent d'étendre la loi de comportement à des sollicitations multiaxiales.

C.1 Choix des conditions de calculs

La géométrie axisymétrique entaillée a été étudiée suivant trois rayons de courbures : $R = 4$ mm (AE4), $R = 1.6$ mm (AE1.6) et $R = 0.8$ mm (AE0.8). Par symétrie, seule la moitié de l'éprouvette est maillée à l'aide d'éléments axisymétriques quadratiques à intégration réduite (appelé *cax4r*). Ainsi, grâce à la symétrie il est possible de ne mailler que la demi-longueur pour représenter la structure entière. Dans la zone entaillée, le maillage est fin ($100 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$), contrairement à la zone lisse où celui-ci est plus grossier. Le nombre total de nœud varie suivant la géométrie étudiée : 905 nœuds et 280 éléments pour l'AE4, 1080 nœuds et 345 éléments pour l'AE1.6, 1273 nœuds et 400 éléments pour l'AE0.8. La figure IV.14 indique les maillages utilisés dans la zone de l'entaille. Le maillage complet, c'est à dire sur toute la demi-longueur, est présenté dans l'annexe IV.1.

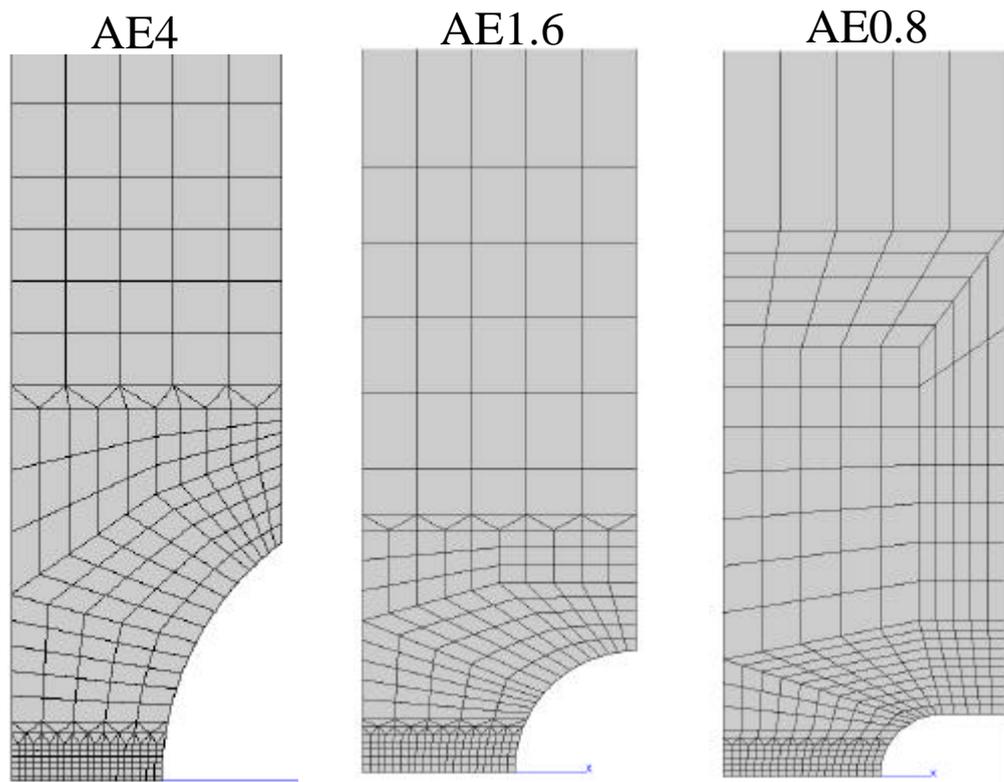


Figure IV.14 Maillage des éprouvettes AE4, AE1.6 et AE0.8

Un ressort est ajouté en haut de l'éprouvette afin de tenir compte de la complaisance de la machine. Il permet de représenter le déplacement élastique dû à la ligne d'amarrage. Cette ligne est particulièrement longue pour permettre de réaliser des essais dans l'enceinte climatique. Le comportement du ressort est considéré comme élastique ($E = 1.5 \text{ GPa}$, et $\nu = 0.45$). Sa hauteur est fixée arbitrairement à 3 mm. L'ajout du ressort permet d'ajuster les déplacements longitudinaux expérimentaux et simulés.

Les essais sur éprouvettes AE ont été pour la plupart effectués en pilotage de réduction diamétrale. Numériquement il n'est pas possible de rentrer directement une telle condition de chargement dans le calcul. Dans un premier temps, le déplacement longitudinal de l'éprouvette qui a été mesuré lors d'un essai à vitesse de réduction diamétrale constante, est utilisé. L'allure de ces courbes est illustrée sur la figure IV.15 pour deux éprouvettes AE1.6 et AE0.8. Le déplacement longitudinal est caractérisé par trois étapes : tout d'abord le chargement est à peu près linéaire, il correspond à la déformation dans le domaine viscoélastique. Ensuite, un très net ralentissement de la déformation est obtenu pour tous les rayons de courbure, à toutes les vitesses testées, correspondant à la localisation de la déformation dans l'entaille. En fin d'essai, la vitesse de déplacement ré-augmente, correspondant à l'étape d'étirement final des fibrilles. Ainsi, pour représenter correctement ces trois zones bien distinctes, le déplacement est entré point par point dans le calcul.

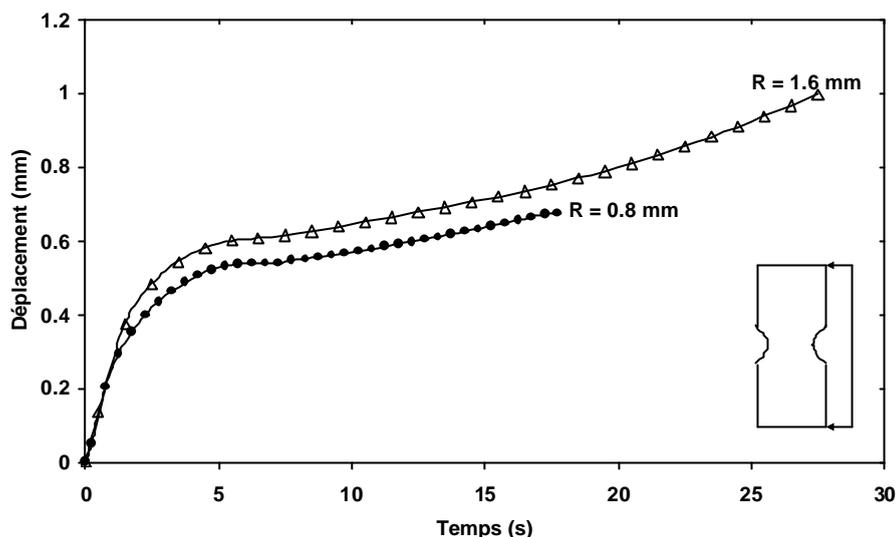


Figure IV.15 Déplacement LVDT en fonction du temps pour une AE1.6 et AE0.8, pour un pilotage en réduction diamétrale $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s, à 20°C

La figure IV.16 indique le résultat du calcul sur AE0.8 en ayant comme chargement la courbe de déplacement longitudinal précédente.

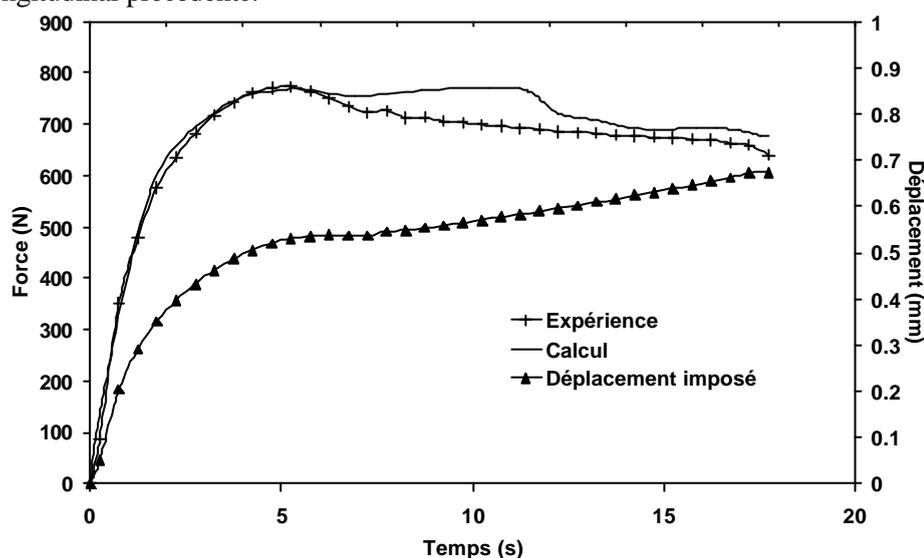


Figure IV.16 Courbes force-réduction diamétrale simulée et expérimentale en pilotage en déplacement longitudinal, AE0.8, à 20°C

Une telle condition de chargement implique que l'adoucissement après la charge maximale est immédiatement suivi d'une ré-augmentation de la charge. Bien que ce résultat soit logique compte tenu des conditions de chargement présentées sur la courbe de la figure IV.15, il ne correspond pas au résultat expérimental. On rappelle qu'expérimentalement le chargement se fait à partir d'une routine qui relie le déplacement radial au déplacement du vérin de la machine. Une vitesse de déplacement radial est imposée par une consigne dans le logiciel de pilotage. La vitesse du vérin s'ajuste ensuite pour permettre à la réduction diamétrale de correspondre à la consigne demandée.

Dans la première partie du chargement, le déplacement radial et le déplacement longitudinal sont tous les deux monotones croissants. A la charge maximale, la localisation de la déformation dans l'entaille nécessite une diminution de la vitesse de déplacement longitudinal. Ensuite, l'orientation de la matière dans le sens de traction tend à rigidifier le matériau. Pour maintenir la vitesse de réduction diamétrale constante, la machine réagit en augmentant la vitesse de déplacement.

Afin de mieux représenter les conditions de l'essai, on choisit d'entrer dans le calcul la même routine que celle utilisée expérimentalement, pour permettre de relier le déplacement longitudinal à la réduction diamétrale. Comme expérimentalement, la consigne de chargement est telle que le vérin doit permettre de contrôler une vitesse de réduction diamétrale constante. La vérification entre la consigne et le résultat numérique se fait à chaque pas de calcul et est corrigée si nécessaire. Une procédure de pénalisation est également présente dans le processus de routine pour permettre d'accroître la correspondance avec la réduction diamétrale expérimentale. L'inconvénient majeur de l'emploi de la routine est de générer un pas de calcul très faible, afin que numériquement le déplacement des nœuds en haut de l'éprouvette induise le déplacement du nœud donnant la réduction diamétrale. Suivant le pas de calcul choisi, il est possible de suivre correctement la vitesse de réduction diamétrale imposée. Ainsi, pour les calculs un compromis sera fait entre la rapidité des calculs et le suivi exact de la vitesse de réduction diamétrale imposée (cf. Annexe IV.3). L'introduction de cette routine dans le calcul permet de s'assurer que la réduction diamétrale expérimentale est très proche de la réduction diamétrale simulée.

C.II Rappels des particularités des courbes force-réduction diamétrale obtenues sur AE pour le PVDF déplastifié

Le modèle de Gurson habituellement utilisé sur les matériaux métalliques permet de représenter la chute de charge liée à la croissance des cavités dans le matériau. L'allure des courbes suit en général celle donnée sur la figure IV.17. Sur cette figure représentant la force en fonction de l'évolution du diamètre pour un acier 16MND5, trois rayons de courbure différents sont présentés ($R = 6$ mm, $R = 2.4$ mm, et $R = 1.2$ mm).

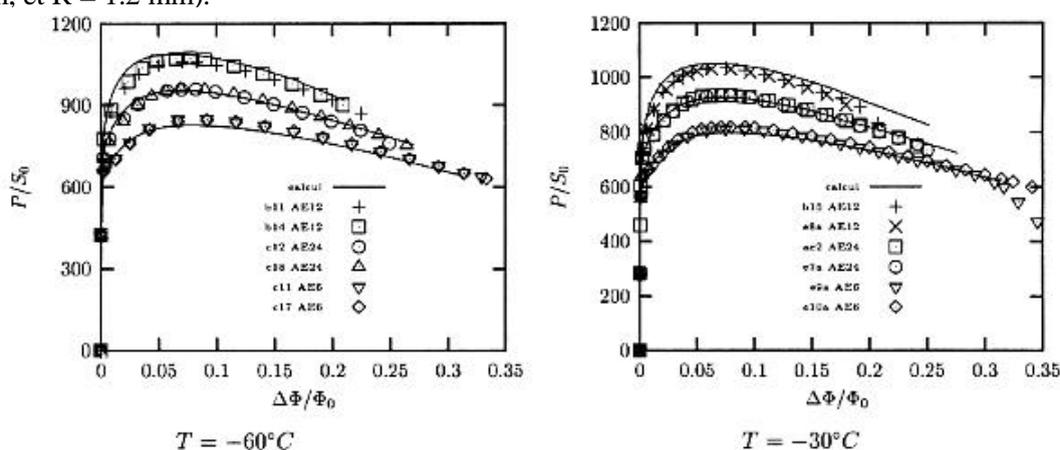


Figure IV.17 Résultats expérimentaux et simulés obtenus à -60°C et -30°C sur l'acier 16MND5 [Tanguy, 2001]

Dans le cas des matériaux métalliques, le comportement élastique se vérifie pour des niveaux de déformation très faibles et une limite élastique très haute. Ensuite la localisation de la déformation entraîne une diminution progressive de la charge. La charge maximale augmente en fonction de la diminution du rayon de courbure, c'est à dire en fonction de l'augmentation du taux de triaxialité des contraintes. La réduction diamétrale à rupture diminue avec l'augmentation de τ .

Concernant le PVDF, il a déjà été mentionné de nombreuses fois que la localisation de la déformation entraînait un très net adoucissement de la charge. Cet adoucissement, appelé communément crochet de traction, ne peut pas en théorie être représenté par le modèle GTN. Les observations microscopiques ont indiqué que la croissance des cavités débute juste avant la force maximale, induisant une augmentation de volume. Le crochet est d'ailleurs d'autant plus significatif que le rayon de courbure diminue. Tous ces résultats confirment le rôle de la triaxialité sur l'importance des mécanismes d'endommagement.

Le second résultat particulier observé sur le PVDF concerne la même charge maximale obtenue entre les éprouvettes AE1.6 et AE0.8. Pour différentes vitesses et également à plus basse température, la force maximale pour les deux types d'éprouvettes est équivalente. Une éprouvette de rayon $R = 0.15$ mm avait indiqué également la même tendance. Les observations microscopiques et les mesures de déformations volumiques ont indiqué que le taux initial élevé de porosités, ainsi que l'importance de l'endommagement pouvait expliquer ce résultat. Il ne peut pas en théorie être reproduit par le modèle GTN puisqu'une diminution de rayon de courbure implique une augmentation du taux de triaxialité c'est à dire une augmentation de la rigidité de l'éprouvette.

Enfin, le dernier résultat important et différent des matériaux métalliques est la stabilisation (AE1.6, AE0.8) voire l'augmentation de la charge en fin d'essai (AE4). Ce mécanisme communément appelé rhéodurcissement dans les polymères caractérise l'augmentation de rigidité dans la matrice due à l'orientation des chaînes macromoléculaires de phase amorphe, et probablement aux lamelles cristallines plus ou moins orientées dans la direction principale de sollicitation. Même si la réelle augmentation de charge n'est visible macroscopiquement que sur les AE4 à faible vitesse de déplacement, la quasi-stabilité de la charge pour les AE1.6 et AE0.8 indique une augmentation de la rigidité avec la déformation.

Tous ces mécanismes devront être pris en compte pour permettre de représenter correctement les résultats de traction sur les éprouvettes entaillées.

C.III Prise en compte de l'adoucissement lié à l'endommagement : utilisation de q_1 et q_2

C.III.1 Etude de la sensibilité des paramètres q_1 et q_2

Les paramètres q_1 et q_2 ont été introduits dans le modèle GTN pour décrire les interactions possibles entre les cavités en cours de croissance. En général, ils sont respectivement pris égaux à 1.5 et 1. Ces valeurs sont choisies pour des matériaux métalliques où le taux de porosité initial est d'environ 10^{-3} et où même en cours de croissance, le pourcentage volumique de cavités reste assez faible ($\approx 2 \cdot 10^{-3}$).

Etant donné que le pourcentage volumique initial de cavités dans le PVDF non plastifié a été estimé à 10%, une différence majeure entre les deux types de matériau, métallique et polymère, existe déjà au départ. Afin d'identifier le rôle de q_1 et q_2 avec une telle fraction volumique de cavités, une étude de sensibilité des paramètres est réalisée sur une éprouvette AE0.8 en les faisant varier entre 0.5 et 2 (limites extrêmes de ces paramètres dans la littérature). Dans un premier temps, on ne regarde que les résultats globaux, c'est à dire la force en fonction de la réduction diamétrale par rapport à une courbe expérimentale. L'essai réalisé à 20°C est piloté en déplacement à 0.05 mm/s. Le tableau IV.2 donne les différentes valeurs des paramètres q_1 et q_2 étudiés.

q_1	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	1	1	1.1	1.3	1.5	1.5	2
q_2	2	1.55	1	1.55	2	1.2	1.5	1.55	1.55	0.8	1	0.5

Tableau IV. 2 Valeurs de q_1 et q_2 choisies pour étudier l'influence de chaque paramètre

La figure IV.18 présente les résultats du calcul (trait + symbole) et la courbe expérimentale (trait plein). Ces premiers calculs utilisent les valeurs extrêmes de q_1 et q_2 données dans le tableau IV.2. Le jeu de paramètre $q_1 = 2$ et $q_2 = 0.5$ est proche des paramètres habituellement choisis pour les matériaux métalliques. Il permet de représenter une chute de charge assez linéaire après la localisation de la déformation. Cependant, il ne permet pas de représenter la forme du crochet de traction observée

sur le PVDF. Dans le cas de $q_1 = 0.5$ et $q_2 = 2$, excepté en fin de calcul, le crochet de traction est mieux simulé.

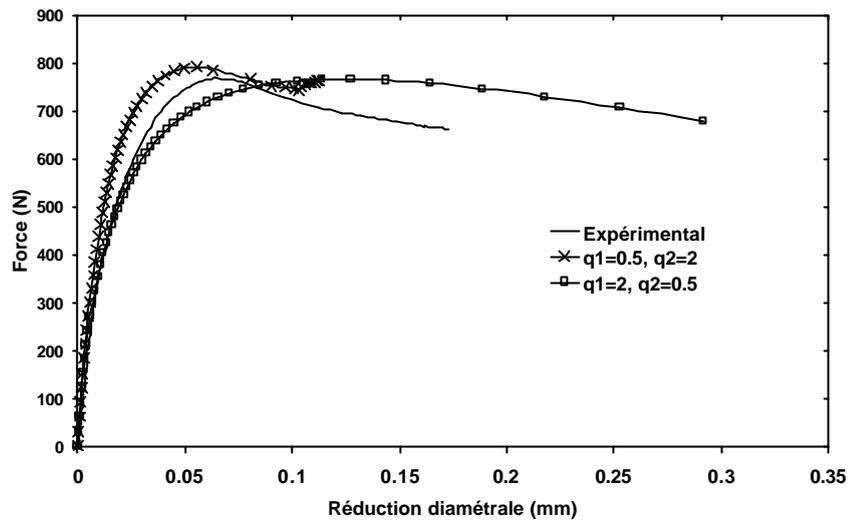


Figure IV.18 Influence de q_1 et q_2 sur les résultats de traction force-réduction diamétrale sur AE0.8, à 20°C et 0.05 mm/s

Afin de vérifier l'influence de chacun des paramètres, la figure IV.19 présente différents calculs avec q_2 variable pour une valeur de q_1 constante prise égale à 0.8. L'augmentation de q_2 permet une diminution de la charge après la localisation et réduit la largeur de la bosse correspondant au crochet de traction. Cependant, une valeur trop élevée induit une cavitation excessive qui provoque une chute de charge violente même avant la charge maximale expérimentale.

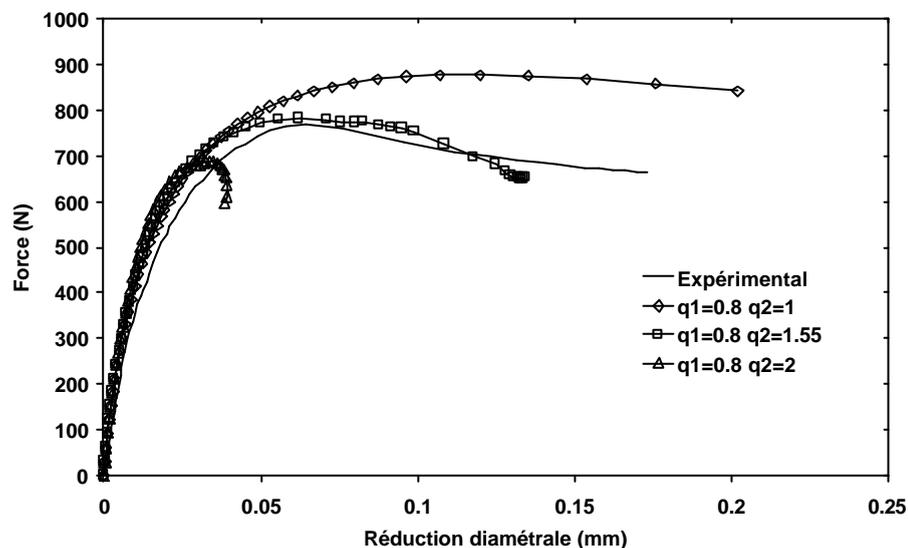


Figure IV.19 Influence du paramètre q_2 pour $q_1 = 0.8$ sur les résultats de traction force-réduction diamétrale sur AE0.8, à 20°C et 0.05 mm/s

Le même travail est réalisé cette fois-ci sur q_1 , en choisissant $q_2 = 1$ (cf. Figure IV.20). L'augmentation de q_1 entraîne également une chute de la charge après la force maximale sans qu'il y ait rétrécissement de la largeur de la bosse. La différence entre les deux paramètres est que, dans le modèle où on ne tient compte que de la croissance, la rupture aura lieu pour un taux de porosité égal à $f_R = 1/q_1$. Ainsi, pour q_1 élevé, par exemple pour $q_1 = 1.5$, la rupture a lieu sur le point de gauss où

le taux de porosité a atteint 66%. C'est le cas par exemple sur la figure IV.20 ($q_1 = 1.5$, $q_2 = 1$), où si toute la courbe avait été représentée on aurait une chute brutale de la charge juste après le dernier point donné. En revanche, dans le cas de q_2 élevé, si q_1 est faible, il n'y a pas numériquement de conditions de rupture imposée. Les éléments continuent à se déformer et compte tenu de leur forme très allongée, les résultats du calcul ne sont plus très pertinents.

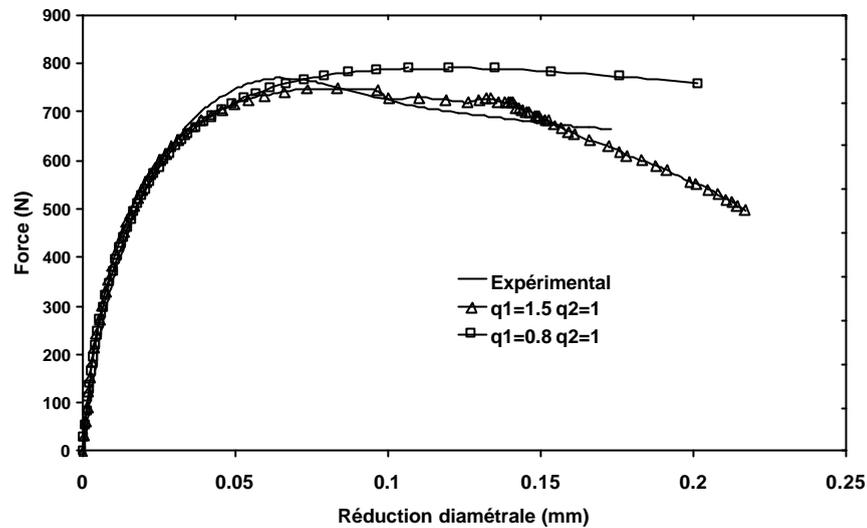


Figure IV.20 Influence du paramètre q_1 pour $q_2 = 1$ sur les résultats de traction force-réduction diamétrale sur AE0.8, à 20°C et 0.05 mm/s

Une dernière analyse de ces résultats est faite en comparant l'évolution de l'endommagement dans l'élément le plus au centre de l'éprouvette (cf. Figure IV.14, élément en bas à gauche situé au cœur de l'éprouvette), pour différents jeux de paramètres. Cet élément est choisi en particulier car il correspond au lieu d'amorçage expérimental, au maximum de triaxialité au début de l'essai et au maximum d'endommagement en fin d'essais. L'évolution du taux de porosité est donnée pour les différentes configurations (cf. Figure IV.21). La figure IV.22 indique la localisation de cet endommagement pour les paramètres (a) $q_1 = 0.8$ et $q_2 = 1$, et (b) $q_1 = 0.8$ et $q_2 = 2$.

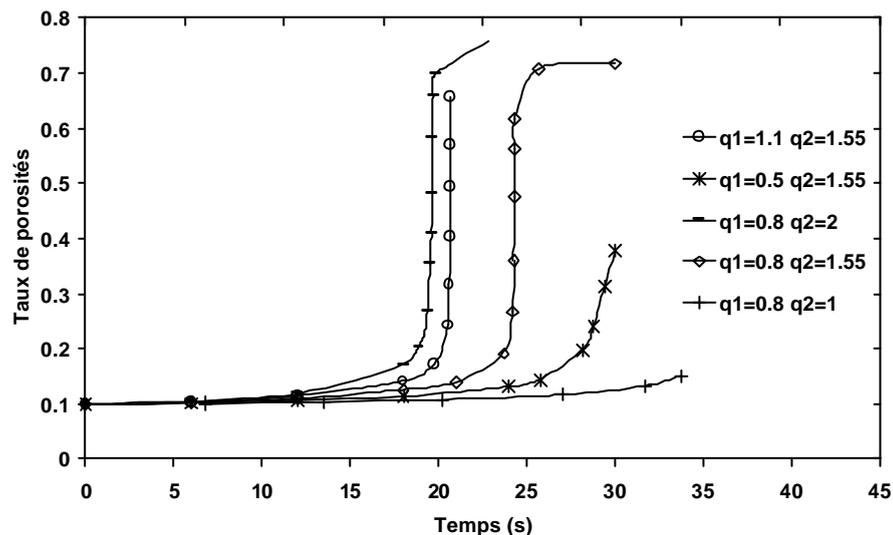


Figure IV.21 Evolution du taux de porosités avec différents jeux de coefficients q_1 et q_2

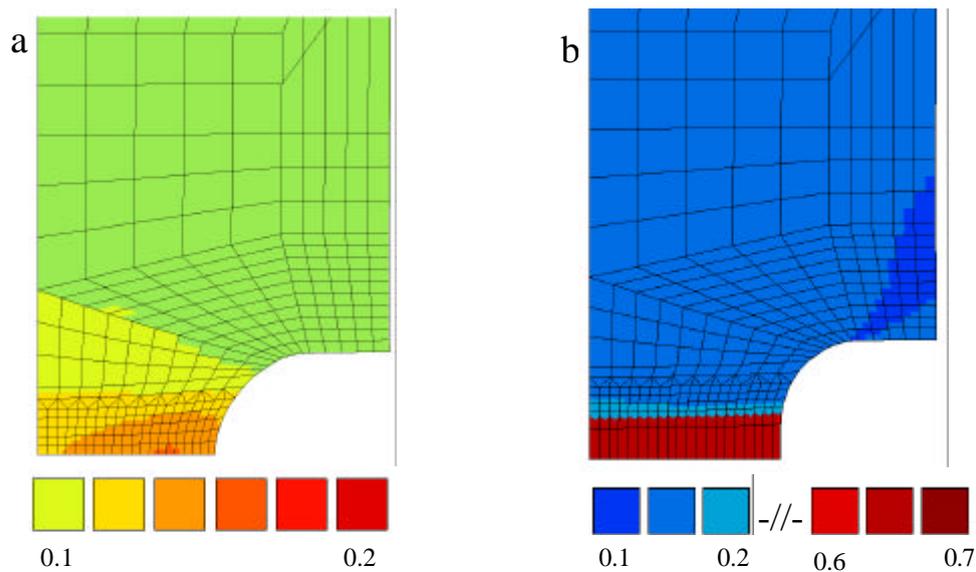


Figure IV.22 Localisation de la porosité pour le même chargement, pour deux jeux de coefficients q_1 et q_2 , (a) $q_1 = 0.8$ et $q_2 = 1$, et (b) $q_1 = 0.8$ et $q_2 = 2$, au temps final

Les deux figures IV.21 et IV.22 révèlent qu'en choisissant des paramètres q_1 et q_2 proche de 1, on ne crée que très peu d'endommagement dans le matériau. Ce résultat est visible sur la figure IV.21 où la courbe ($q_1 = 0.8$ et $q_2 = 1$) atteint à peine un taux maximal de porosité à rupture de 20%. La figure IV.22a indique également ce résultat. En revanche, pour q_2 constant ($q_2 = 1.55$), comme pour les courbes force-réduction diamétrale, une augmentation de q_1 de 0.5 à 1.1 permet d'accélérer l'apparition de l'endommagement, dans l'élément considéré, cet élément étant significatif de l'évolution de f dans la structure.

C.III.2 Détermination de q_1 et q_2

D'après les résultats présentés, on constate qu'il est nécessaire que l'un des deux paramètres soit supérieur à 1.5 pour modéliser l'importance de l'endommagement. En effet, sur les figures IV.19 et IV.20 pour $q_1 = 0.8$ et $q_2 = 1$, la chute de charge est très peu marquée et le crochet de traction n'est pas du tout simulé. Ensuite pour choisir lequel des deux paramètres q_1 et q_2 est à fixer à 1.5, on se base sur tous les résultats qui indiquent que q_2 permet de mieux traiter l'endommagement dans le matériau. Même si dans le cas de la figure IV.19 pour $q_1 = 0.8$ et $q_2 = 1.55$ la fin de l'essai est mal prise en compte, on constate que l'allure de la courbe est assez bien représentée.

Si la valeur de q_2 est fixée à 1.55, la figure IV.23 indique les valeurs de q_1 susceptibles de représenter correctement la courbe force-réduction diamétrale. Une valeur trop faible de q_1 ne permet pas de faire diminuer la charge après la force maximale. Une valeur trop élevée entraîne un endommagement tel que la rupture est obtenue pour de très faibles niveaux de déformation. Par contre, il semblerait qu'une valeur proche de 0.8 permette de se rapprocher de la courbe expérimentale.

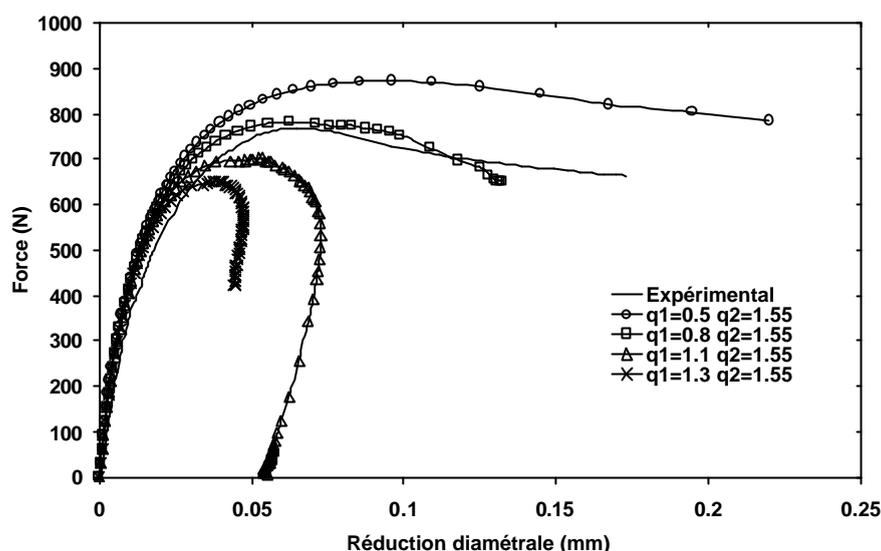


Figure IV.23 Influence de q_1 pour $q_2 = 1.55$ sur les résultats de traction force-réduction diamétrale sur AE0.8, à 20°C et 0.05 mm/s

C.III.3 Evolution de l'endommagement avec la déformation

C.III.3.a Modification de q_2

A partir de cette identification, on s'aperçoit très vite notamment sur les AE4 que même si le crochet de traction est simulé, aucune modification des paramètres ne permet de représenter la quasi-stabilité de la charge qui suit cette localisation, ainsi que le rhéodurcissement en fin d'essai. Au contraire, on obtient en fin de calcul une chute de charge trop significative. Différentes analyses des résultats numériques indiquent que presque indépendamment de la géométrie, la stabilisation de la charge débute pour une déformation plastique principale maximale proche de 20%. Les mesures de déformations volumiques avaient également indiqué que l'importante augmentation du volume au moment de la localisation de la déformation était suivie d'un ralentissement.

Pour des niveaux assez faibles de déformations, les cavités peuvent croître assez aisément de manière sphérique sous l'effet de la contrainte hydrostatique. En revanche, dès que la matière se déforme plus, elle s'oriente dans le sens de sollicitation, limitant alors la croissance sphérique des cavités. On suppose donc qu'au delà d'une certaine déformation, choisie numériquement comme déformation plastique principale p_1 , la croissance des cavités est limitée par l'orientation des chaînes. La forte valeur de q_2 nécessaire pour obtenir une importante cavitation au moment de la localisation de la déformation ne se justifie plus pour les plus grandes déformations. Il devient alors nécessaire de diminuer q_2 pour induire une croissance plus faible des cavités. Pour cela le paramètre q_2 est considéré comme une fonction décroissante de la déformation plastique principale p_1 telle qu'à 20°C (20) :

$$\begin{aligned}
 q_2 &= 1.55 \quad \text{pour } p_1 < 0.2 \\
 q_2 &= (1 + \exp(-3p_1)) \quad \text{pour } p_1 \geq 0.2
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

q_2 permet de cette façon de retranscrire indirectement l'anisotropie de forme des cavités en cours de déformation.

C.III.3.b Conséquence du choix de q_2 sur l'évolution de la porosité

Suivant les valeurs des paramètres q_1 et q_2 , il est possible de représenter différentes évolutions de la porosité. On se base sur les calculs par éléments finis pour prédire l'évolution de f suivant la valeur de q_1 et q_2 .

La comparaison est faite avec les paramètres choisis pour le modèle, c'est à dire $q_1 = 0.8$ et q_2 défini par l'équation (20). Les résultats sont appelés « modèle » sur la figure IV.24. Les résultats pour deux autres jeux de paramètres sont également présentés : $q_1 = 1.55$ et $q_2 = 0.8$ appelé solution 1, et $q_1 = 0.8$ et $q_2 = 1.55$ appelé solution 2. La figure IV.24 s'intéresse à l'évolution de la porosité et de la triaxialité dans l'élément le plus au centre du maillage, c'est à dire l'élément le plus en bas à gauche dans la géométrie (cf. Figure IV.14).

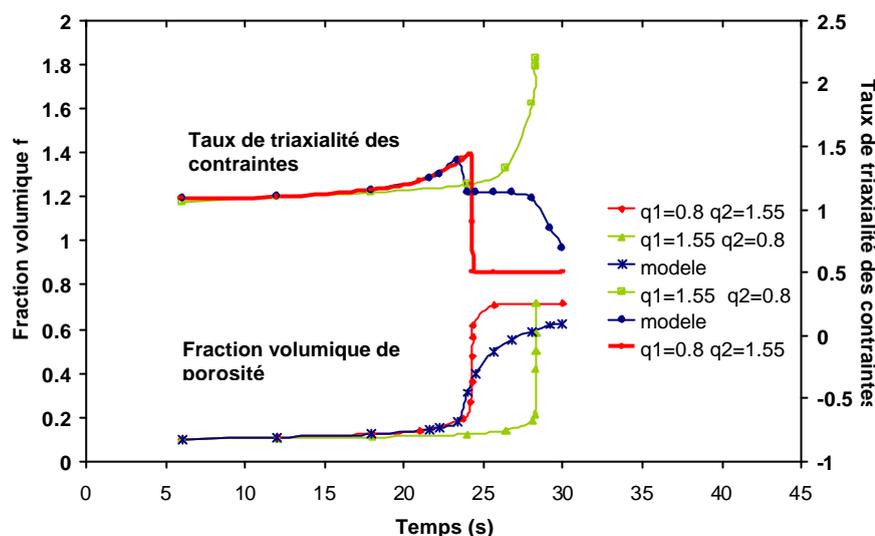


Figure IV.24 Taux de porosité et taux de triaxialité des contraintes, pour trois jeux de paramètres, pour une AE0.8 sollicitée en pilotage LVDT 0.05 mm/s, à 20°C

Les résultats indiquent clairement que le paramètre q_2 a un effet plus important sur l'évolution de la porosité que le paramètre q_1 . En effet, pour la solution 2 (courbes rouges), le taux de porosité f augmente dès le temps $t = 24$ secondes, alors que pour la solution 1 celui-ci commence à croître pour $t = 28$ secondes. Le résultat confirme celui de la figure IV.20 où la chute de charge n'est pas assez significative pour représenter le crochet de traction dans le cas de la solution 1. Dans le cas des paramètres du modèle, on remarque que la croissance est d'abord importante puis ralentit ce qui permet une meilleure simulation des résultats expérimentaux.

Au niveau de la rupture, une valeur de q_1 élevée permet d'obtenir une rupture sur les points de gauss où la condition $f_R = 1/q_1$ est remplie. C'est le cas de la solution 1 ($q_1 = 1.55$) où le taux de porosité augmente progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur critique qui induit la rupture des éléments. Le taux de triaxialité dans ce cas ne peut plus être déterminé. Dans le cas de la solution 2 ($q_1 = 0.8$), le taux de porosité se stabilise sans entraîner la rupture des éléments. Si on s'intéresse à l'évolution du taux de triaxialité des contraintes τ , on constate que le taux de porosité est tel que τ décroît très vite dans la zone endommagée. Dans le cas des paramètres retenus pour le modèle, le début de croissance des porosités induit une diminution de τ qui se stabilise vers 1.2, puis diminue de nouveau dès que le taux de porosité est trop élevé. Le maximum de τ se situe au centre de l'éprouvette jusqu'à environ $f = 0.6$, puis se délocalise au dessus de la zone fortement endommagée.

La figure IV.25 donne le profil des taux de porosité pour les trois cas étudiés précédemment.

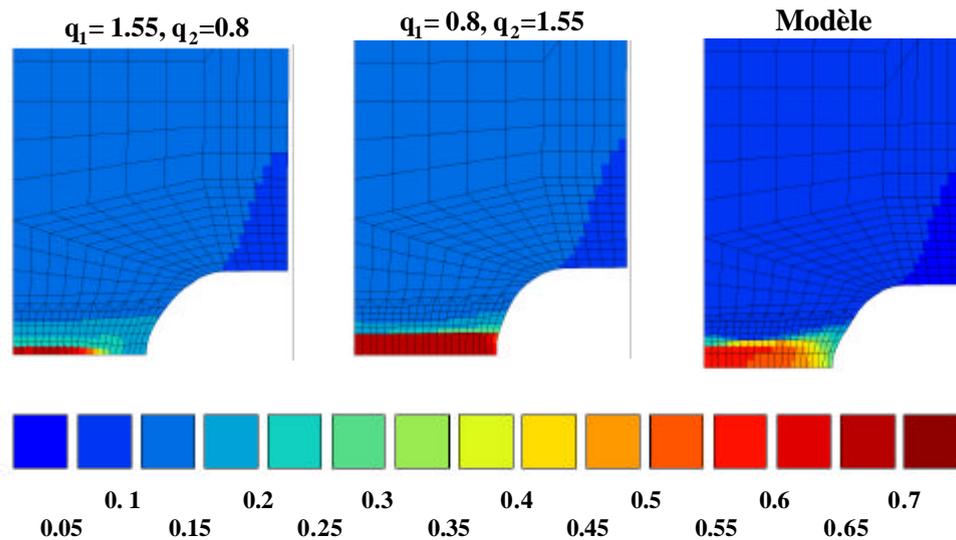


Figure IV.25 Observations de la localisation de l'endommagement pour une AEO.8 sollicitée en traction à 0.05 mm/s, à 20°C, pour différents jeux de paramètres q_1 et q_2

Ainsi, la prise en compte de l'évolution de l'endommagement en fonction de la déformation plastique principale permet :

- De reproduire le ralentissement de l'endommagement volumique observé expérimentalement
- De tenir compte indirectement de l'anisotropie probable de la forme des cavités, qui d'abord sphériques s'orientent dans la direction de sollicitation, limitées par l'étirement des chaînes. Cette anisotropie est indiquée notamment par le ralentissement de l'endommagement
- D'éviter la chute de charge trop importante liée à la forte valeur initiale de q_2 .

C.IV Prise en compte du rhéodurcissement

On rappelle que la fonction d'écroissage choisie est de la forme (19) :

$$R = R_0 + Q(1 - \exp(-bp)) + A(\exp(Bp) - 1)$$

avec à 20°C $R_0 = 10$ MPa ; $Q = 40$ MPa, $b = 75$, $A = 11$ MPa, $B = 1.6$.

Il est nécessaire de signaler que dans les calculs présentés sur la figure IV.24, la fonction d'écroissage présentée en (19) est prise en globalité, c'est à dire que les paramètres A et B ont été choisis afin de représenter le rhéodurcissement des fibrilles en fin d'essai. Par la diminution progressive de q_2 , la croissance limitée des porosités par étirement de la matière est prise en compte. Par l'utilisation du second écroissage, l'augmentation de rigidité due aux fibrilles et aux cristallites orientés est également représentée. Ces deux modifications par rapport au modèle original permettent de représenter les essais de traction sur éprouvettes entaillées, c'est à dire de retranscrire les évolutions microstructurales du PVDF en cours de déformation.

Pour faciliter l'écriture, on propose $R = R_0 + (1) + (2)$, avec (1) : $Q(1 - \exp(-bp))$, et (2) : $A(\exp(Bp) - 1)$. La figure IV.26 ci-dessous montre l'importance des deux écroissages en fonction de la déformation viscoplastique.

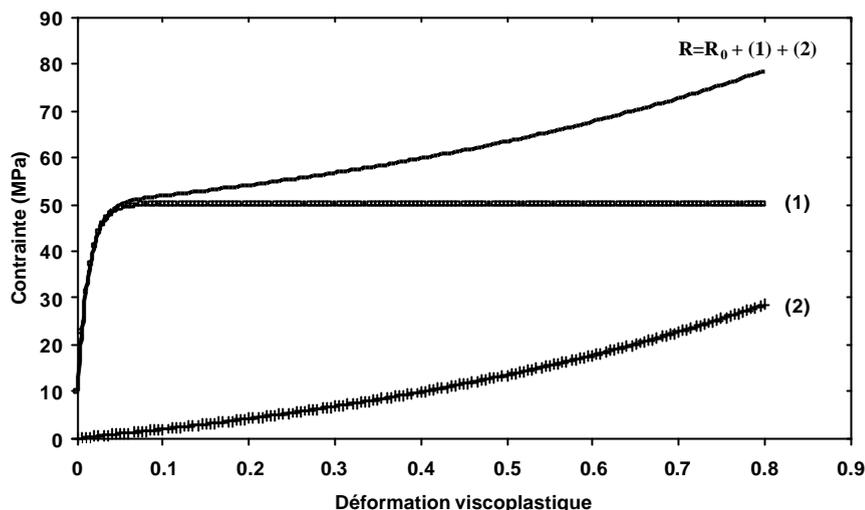


Figure IV.26 Décomposition de la fonction d'érouissage en fonction de la déformation viscoplastique, pour les paramètres R_0 , Q , b , A et B identifiés à 20°C

Les figures IV.27 et IV.28 présentent l'influence des paramètres A et B sur les courbes de traction d'éprouvettes AE, en comparaison avec la courbe expérimentale. Ces calculs sont réalisés sur une éprouvette AE4, en pilotage de réduction diamétrale ($2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s). Le paramètre A a été choisi à une valeur de 11 MPa, la sensibilité des résultats est étudiée pour une variation de $\pm 50\%$ de cette valeur (cf. Figure IV.27). Le paramètre B est identifié à 1.6, et les résultats sont présentés pour une variation de ce paramètre de $\pm 25\%$ (cf. Figure IV.28). Sur cette dernière figure est indiqué également le résultat pour un calcul sans les paramètres de rhéodurcissement.

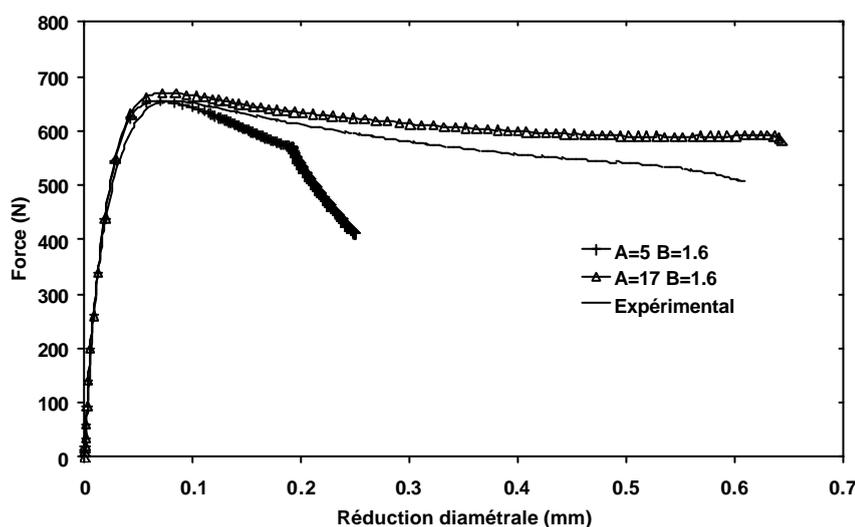


Figure IV.27 Etude de sensibilité du paramètre $A \pm 50\%$, AE4, 20°C , en vitesse de réduction diamétrale $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s

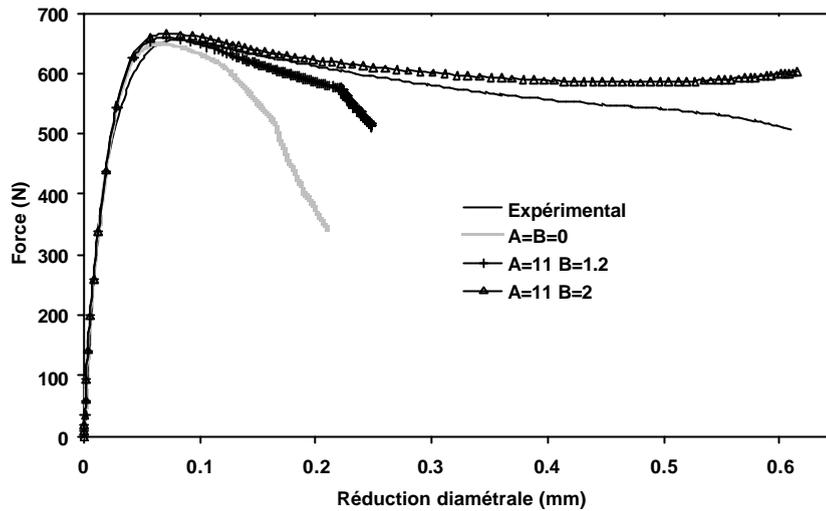


Figure IV.28 Etude de sensibilité du paramètre B +/- 25%, AE4, 20°C, en vitesse de réduction diamétrale $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s

Sans les paramètres de rhéodurcissement, la chute de charge est trop rapide. L'ajustement de A et B sur toutes les géométries indique que les paramètres les plus pertinents sont $A = 11$ MPa et $B = 1.6$. Ils permettent de reproduire au mieux l'augmentation de rigidité liée à l'éirement de la matière.

C.V Validation des paramètres de comportement et d'endommagement sur éprouvettes AE

Les différentes études de sensibilité réalisées précédemment vont être résumées dans ce paragraphe afin de montrer la bonne correspondance entre les résultats expérimentaux et les calculs par éléments finis.

Les essais sur éprouvettes axisymétriques entaillées ont été réalisés à deux vitesses de réduction diamétrale ($2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s notée a, $2,5 \cdot 10^{-2}$ mm/s notée b) et à une vitesse de déplacement LVDT ($5 \cdot 10^{-2}$ mm/s). Les résultats pour le pilotage LVDT seront donnés en annexe A.IV.2.

On rappelle le choix des différents paramètres :

Pour le comportement : $K = 20$ MPa, $n = 5$, $R_0 = 10$ MPa, $Q = 40$ MPa, $b = 75$, $A = 11$ MPa, $B = 1.6$

Pour l'endommagement :

$$q_1 = 0.8$$

$$q_2 = 1.55 \text{ pour } p_1 < 0.2$$

$$q_2 = (1 + \exp(-3p_1)) \text{ pour } p_1 \geq 0.2$$

Les éléments constitutifs des géométries sont des éléments axisymétriques à intégration réduite. La figure IV.29 indique les résultats pour l'AE4, la figure IV.30 indique les résultats pour l'AE1.6 et la figure IV.31 indique les résultats pour la géométrie AE0.8. Les résultats des calculs sont en trait gras et les résultats expérimentaux en trait+symbole.

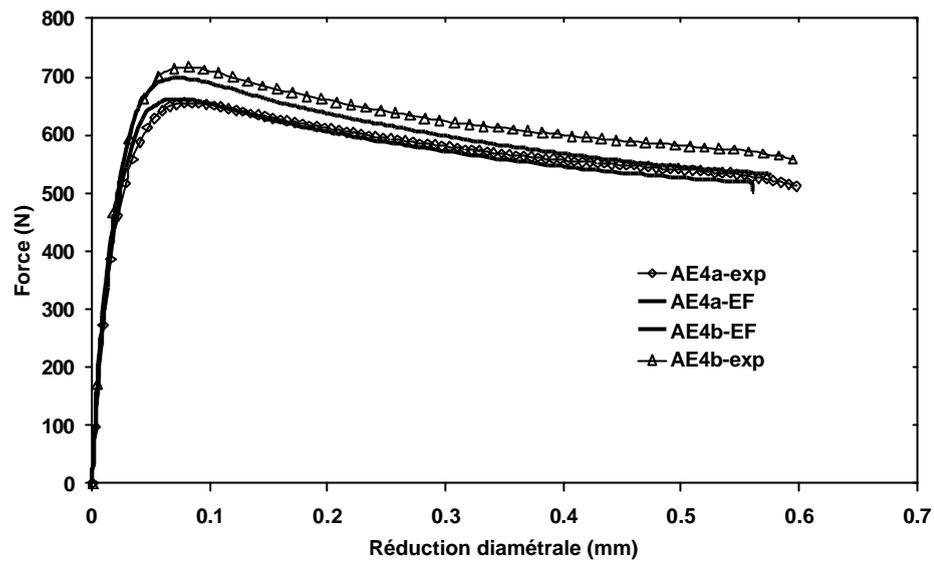


Figure IV.29 Comparaison des résultats expérimentaux et EF pour la géométrie AE4, à 20°C, pour deux vitesses de réduction diamétrale $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s (a) et $2,5 \cdot 10^{-2}$ mm/s (b)

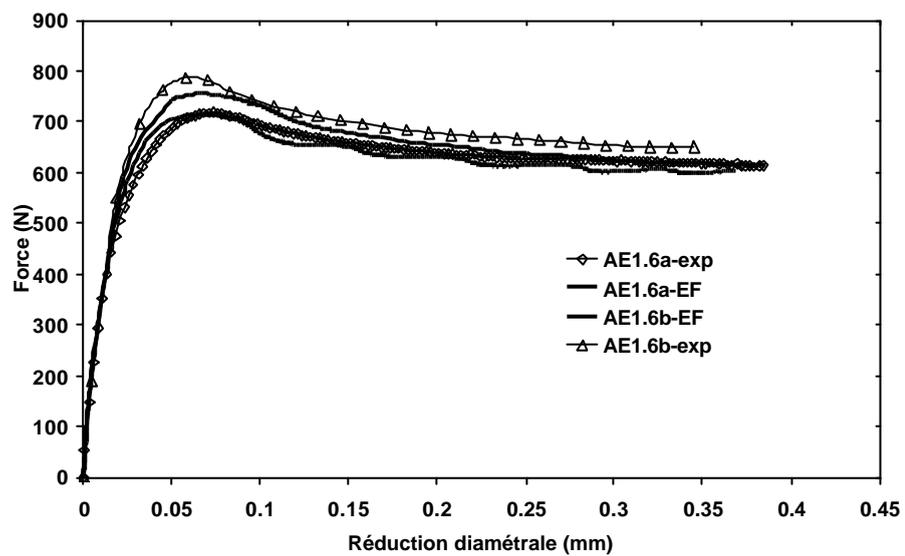


Figure IV.30 Comparaison des résultats expérimentaux et EF pour la géométrie AE1.6, à 20°C, pour deux vitesses de réduction diamétrale $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s (a) et $2,5 \cdot 10^{-2}$ mm/s (b)

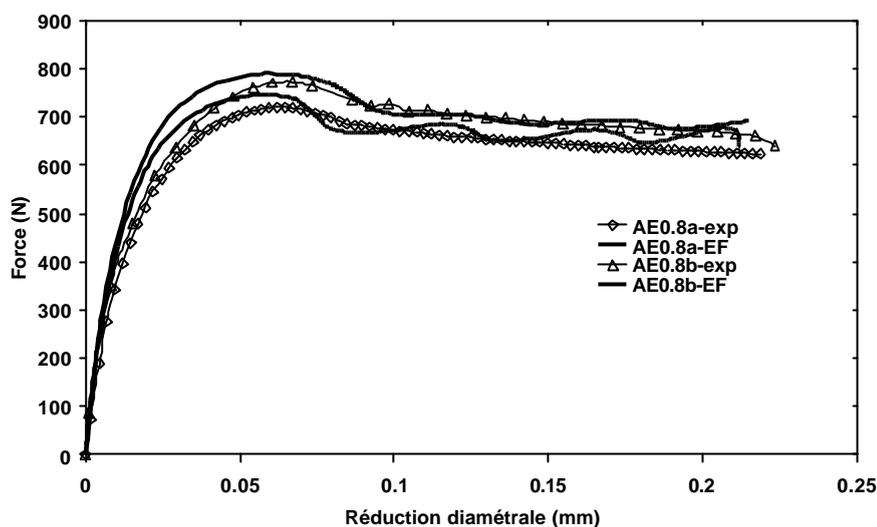


Figure IV.31 Comparaison des résultats expérimentaux et EF pour la géométrie AE0.8, à 20°C, pour deux vitesses de réduction diamétrale $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s (a) et $2,5 \cdot 10^{-2}$ mm/s (b)

Les comparaisons indiquent que dans tous les cas l'adoucissement après la force maximale est bien reproduit. Dans certains cas, comme par exemple, pour les éprouvettes AE0.8, le calcul par éléments finis donne un crochet trop marqué. Cependant, l'ensemble de ces résultats est issu d'un compromis général entre tous les essais et toutes les géométries. L'accord est donc très satisfaisant avec les expériences.

La rigidité du matériau en fin d'essai est également bien reproduite, surtout pour la vitesse de réduction diamétrale la plus faible (a). Pour la vitesse notée (b), la force est légèrement sous-estimée en fin d'essai.

Pour les calculs où le chargement est en vitesse de réduction diamétrale, l'utilisation de la routine liant le déplacement global de l'éprouvette et la réduction diamétrale peut imposer certaines difficultés de convergence dans le calcul. Ces difficultés sont renforcées par les conditions imposées sur q_2 . Ces difficultés s'observent notamment par des pas de calculs très faibles.

La réponse macroscopique indique également des oscillations de la charge sur les courbes force-réduction diamétrale et notamment aux plus faibles vitesses de réduction diamétrale. Ce résultat sera d'autant plus marqué que le rayon de courbure sera faible. Les mêmes résultats expérimentaux ont été obtenus, mais les oscillations sur la force étaient moins prononcées. Etant donné que les courbes expérimentales présentes sur les figures IV.29 à IV.31 sont moyennées, ces oscillations ne sont plus visibles. Expérimentalement, elles sont dues au temps de réponse de la machine, qui fonctionne en utilisant un PID. Le LVDT impose le déplacement en fonction de la consigne indiquée pour la vitesse de réduction diamétrale. Si par exemple la réduction diamétrale est plus importante que la consigne, le LVDT va imposer une vitesse de déplacement plus faible. La vitesse de réduction diamétrale va alors être inférieure à la consigne, d'où cette fois-ci la nécessité d'une augmentation de la vitesse du LVDT. Ce phénomène est essentiellement vrai dans la seconde partie de la déformation c'est à dire après la localisation de la déformation dans l'entaille. Dans cette zone, le matériau se rigidifie et le LVDT doit sans cesse ré-augmenter la vitesse de déplacement pour imposer la bonne vitesse de réduction diamétrale. En revanche, pour les essais réalisés en pilotage LVDT (cf. Annexe IV.2), les oscillations sont absentes.

Ces oscillations sont d'autant plus marquées que le taux de triaxialité est élevé. Cela s'explique par la localisation de la déformation dans une zone d'autant plus étroite que le rayon de courbure est faible. Etant donnée la longueur du montage et la taille de la zone entaillée, il semble assez évident qu'un faible incrément de déplacement global va provoquer une réduction diamétrale plus importante dans le cas de l'AE0.8 que pour l'AE4. Ainsi, la sensibilité au changement de vitesse LVDT sera plus grande

pour les plus petits rayons de courbure, ce qui explique que les oscillations soient plus marquées sur les éprouvettes AE1.6 et AE0.8.

L'hypothèse est faite que les mêmes remarques expliquent les oscillations dans le calcul numérique, qui traduit assez bien la réponse expérimentale. Sur la figure IV.32 est indiqué l'évolution de la réponse LVDT numérique, comparée à la réponse LVDT obtenue expérimentalement.

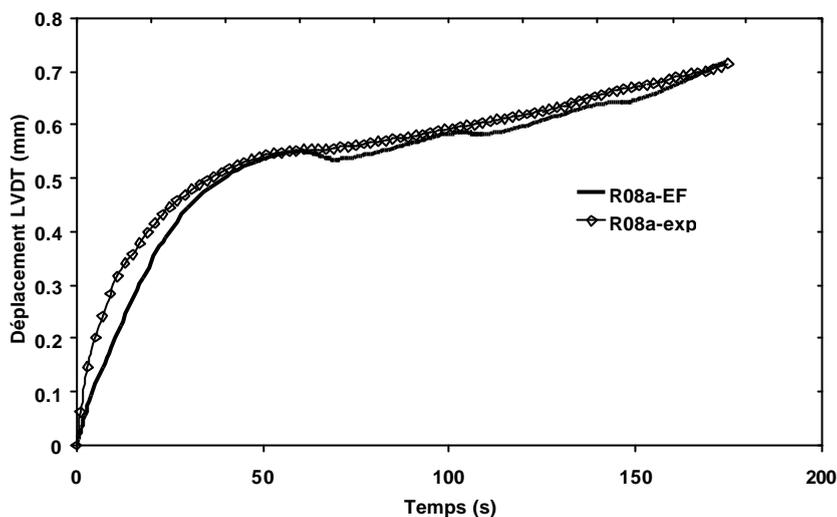


Figure IV.32 Evolution de la réponse LVDT numérique par rapport à la réponse LVDT expérimentale, AE0.8 à 20°C

Juste à titre de comparaison, on propose sur la figure IV.33 les mêmes résultats que la figure IV.32 mais avec cette fois sans utiliser la routine, mais en utilisant le déplacement LVDT. Celui-ci est introduit point par point dans les conditions de chargement. Son évolution permet normalement d'avoir une vitesse de réduction diamétrale constante. Comparativement avec la figure IV.31, les résultats indiquent qu'il y a nettement moins d'oscillations sur la courbe force-réduction diamétrale. Ce résultat est logique puisque la routine n'est pas utilisée. Cependant, même avec le chargement issu du LVDT, on s'aperçoit que le moindre changement de pente de la vitesse de déplacement induit des oscillations sur la force. Si on regarde l'évolution de la réduction diamétrale censée être constante, on constate que bien qu'elle suive globalement la bonne vitesse, celle-ci n'est pas constante mais oscille autour de la réduction diamétrale expérimentale.

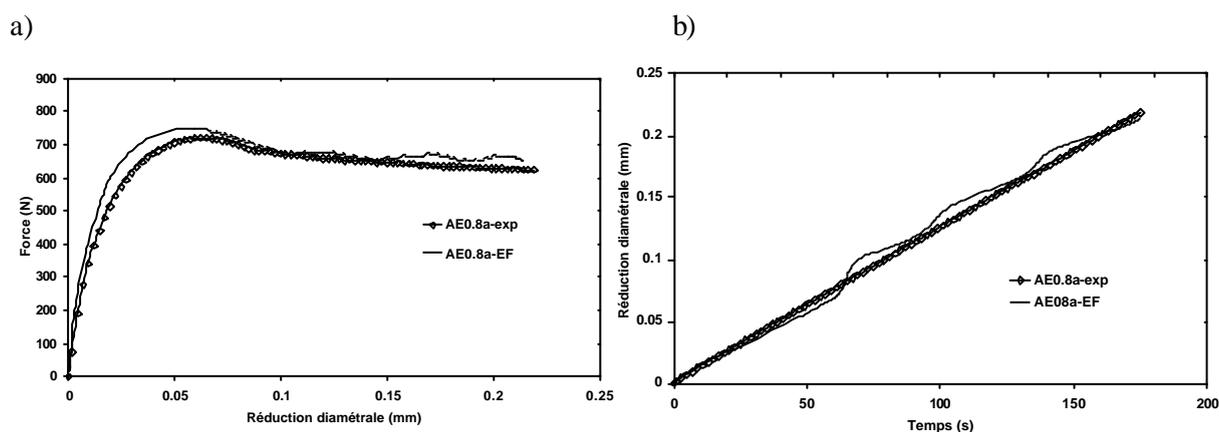


Figure IV.33 (a) Courbes force-réduction diamétrale, (b) Vitesse de réduction diamétrale, pour AE0.8, pilotage LVDT fonction de la réduction diamétrale $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/s, à 20°C

Ainsi, parce qu'on souhaite reproduire exactement les essais en pilotage de vitesse de réduction diamétrale constante, on utilise la routine dans les calculs en sachant que les oscillations sur la force sont dues au mode de chargement, difficile à reproduire par le calcul.

Enfin concernant la saturation de la charge entre l'AE0.8 et l'AE1.6, le modèle prévoit une force maximale légèrement supérieure pour l'éprouvette de plus petit rayon de courbure. Cependant, le fort endommagement introduit par la valeur q_2 élevée permet néanmoins de se rapprocher de la tendance expérimentale.

D. Détermination de la déformation volumique par calculs par éléments finis

Les essais mécaniques réalisés sur éprouvettes lisses et éprouvettes entaillées ont permis de calculer expérimentalement une augmentation de volume des éprouvettes en traction. La variation de volume directement liée à l'endommagement permet de vérifier la validité des paramètres d'endommagement choisis pour le modèle. Afin de vérifier que le modèle GTN employé ici confirme ces résultats, on utilise dans un premier temps les éprouvettes lisses et dans un second temps les éprouvettes entaillées. Il faut rappeler que pour les éprouvettes lisses, les mesures de déformation volumique ont été faites avant la localisation de la striction. Pour les éprouvettes entaillées au contraire, la mesure de la déformation volumique est faite dans l'entaille, c'est à dire dans la zone où se localise la déformation.

D.1 Utilisation du modèle GTN pour déterminer la variation de volume sur éprouvettes lisses

Dans le chapitre II, les mesures de variation de volume sur éprouvettes lisses ont indiqué que pour 20% de déformation (c'est à dire avant striction), l'augmentation de volume pouvait être estimée à 3 %. Ces mesures ont été effectuées sur une éprouvette lisse testée à $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, à partir de la mesure de la déformation longitudinale et de la déformation latérale suivant la largeur de l'éprouvette.

Pour le calcul par éléments finis, on utilise un élément de volume de type linéaire, à intégration réduite (c2d4r, c'est à dire 4 nœuds et 1 point de gauss). Le calcul est réalisé en conditions de contraintes planes. La réponse expérimentale est ensuite comparée au calcul numérique en se basant sur les déformations longitudinale et latérale (cf. Figure IV.34).

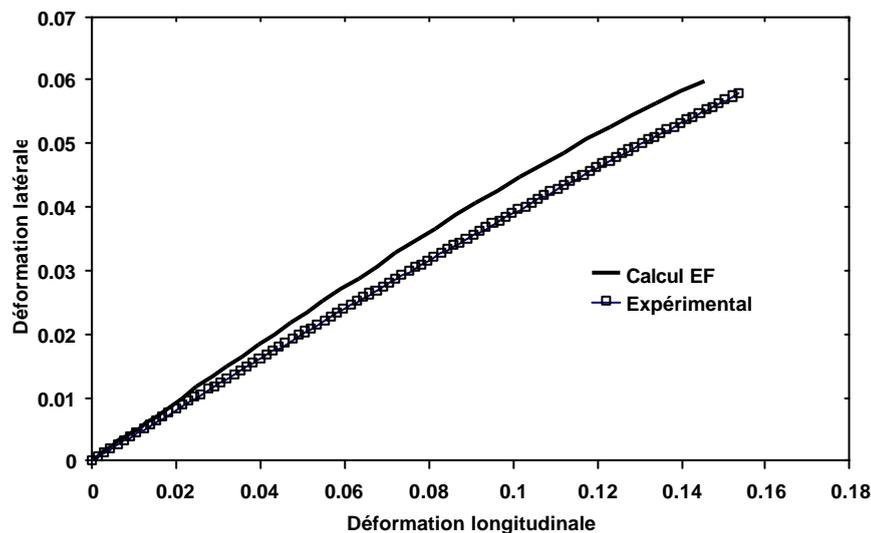


Figure IV.34 Déformation latérale en fonction de la déformation longitudinale, expérimentales et simulées, sur éprouvettes lisses, à 20°C , $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

L'accord entre les deux courbes est très acceptable (environ 8 % d'écart) compte-tenu de l'écart type expérimental qui était d'environ 5 %.

D.II Utilisation du modèle GTN pour déterminer la variation de volume pour des éprouvettes entaillées

Expérimentalement, la variation de volume sur éprouvettes entaillées a été déterminée sur deux géométries, AE4 et AE0.8. On rappelle que cette mesure s'est faite en déterminant d'abord optiquement lors d'un essai de traction quelle zone dans l'entaille était réellement concernée par le blanchiment. Considérant que le blanchiment provient de l'étirement de la matière et de la croissance des cavités, on se base sur son évolution pour estimer la variation de volume. Ces premières observations avaient indiqué que le blanchiment concernait 2 mm dans la hauteur de l'entaille pour une AE4 et 0.9 mm pour une AE0.8, en sachant que le milieu de cette zone est la section minimale de l'éprouvette (cf. Chapitre II, Figures II.34, 35, 36).

Une fois cette zone pré-déterminée, elle est coloriée en noir avant essai. Le mode de chargement est en vitesse de déplacement LVDT (0.05 mm/s), sachant que l'extensomètre ne peut pas être placé dans la zone entaillée. Par acquisition d'images, on suit la déformation de la zone noircie. Par analyses d'images après essai, le changement de volume est calculé (cf. Annexe IV.4). Par cette méthode, une augmentation de volume expérimentale de 30% est obtenue pour l'AE4 et environ 60% pour l'AE0.8, avant rupture.

D.II.1 Calcul du volume par post-processeur

Afin de déterminer par EF la variation de volume sur la même zone qu'expérimentalement, on définit un ensemble d'éléments (appelé elset dans le code de calcul Zébulon) qui aura les mêmes dimensions que la zone peinte en noire. La figure IV.35 indique les elsets choisis pour les géométries AE4 et AE0.8.

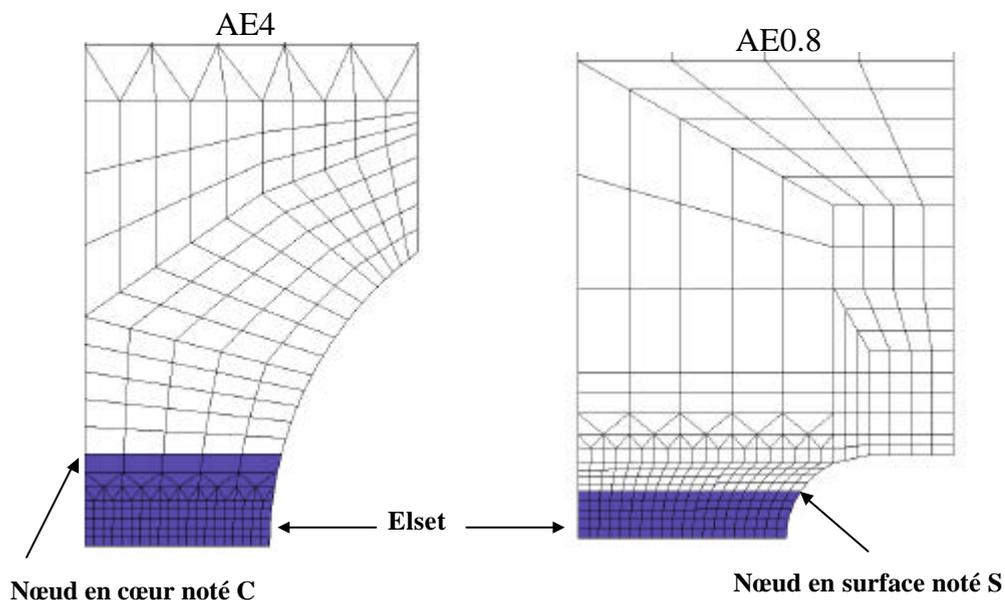


Figure IV.35 Elsets choisis pour les géométries AE4 et AE0.8

La détermination de la variation de volume se fait à l'aide d'un post-processeur, après le calcul relatif à l'essai de traction. Le post-processeur calcule la variation de volume de chaque élément à partir de la déformation aux points de gauss, pour aboutir à la variation de volume sur l'ensemble du elset. Expérimentalement, la déformation surfacique a été assimilée à la déformation volumique (on admet l'isotropie dans la section de l'éprouvette). Numériquement, le calcul donne la variation volumique exacte (éléments axisymétriques), ce qui permet de mettre en évidence l'erreur qui est faite en considérant que la mesure surfacique égale la mesure volumique (cf. Figure IV.36).

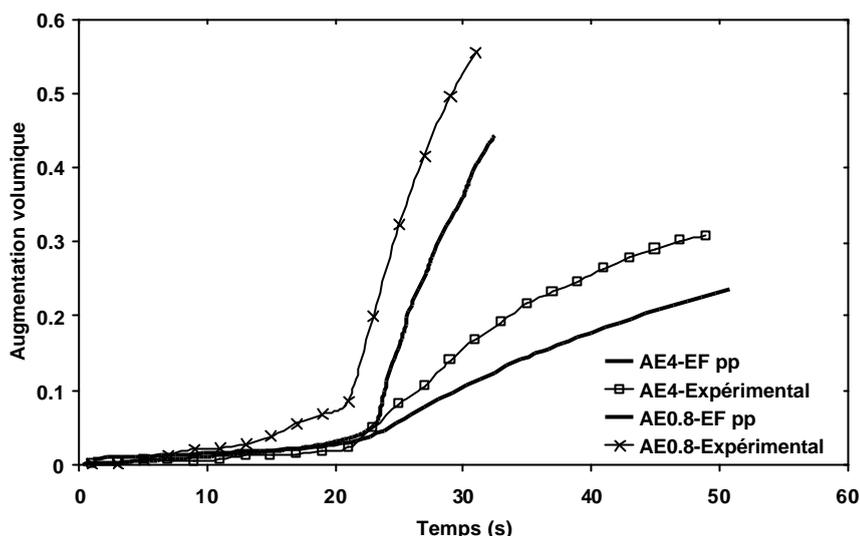


Figure IV.36 Augmentations volumiques obtenues à l'aide du post-processeur (pp) par rapport aux résultats expérimentaux, AE4 et AE0.8, 20°C, 0.05 mm/s

On rappelle que le début de l'augmentation de volume correspond à la localisation de la déformation dans l'entaille. Les résultats indiquent que les mesures surfaciques surestiment d'environ 20% les mesures de déformations volumiques. Cependant dans cet écart, l'erreur liée à la non correspondance exacte du calcul et de l'expérience n'est pas connue. Pour déterminer cette erreur, on compare dans un second temps les déformations surfaciques expérimentales et calculées.

D.II.2 Calcul du volume à l'aide du déplacement des nœuds

A l'aide du maillage on peut accéder à la comparaison directe avec l'expérience en utilisant le déplacement du nœud situé en surface (noté S sur la figure IV.35). Pour cela, si on considère que la zone noircie expérimentale peut être assimilée à deux troncs de cône accolés par leur petite base, l'elset représenté sur la figure IV.35 correspondra à la moitié d'un tronc de cône. Le volume d'un tronc de cône est donné par la formule (21) ci-dessous. Il est possible alors avec cette formule de déterminer l'évolution du volume de l'elset à partir de l'évolution de h, R, et r. En multipliant ce volume par 4 pour retrouver la totalité de la zone noircie, il est possible de comparer avec les résultats expérimentaux.

$$Volume = \frac{ph(R^2 + r^2 + Rr)}{3} \quad (21)$$

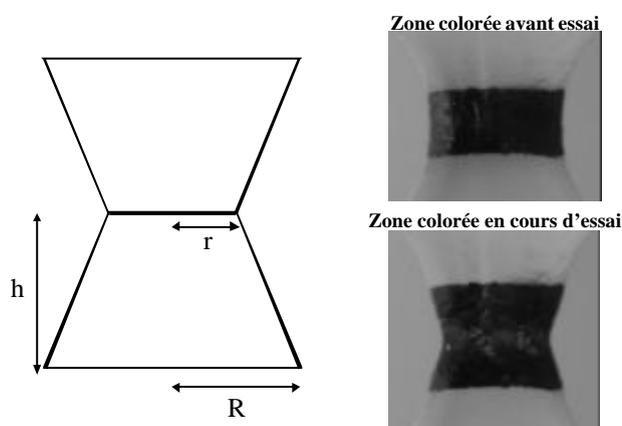


Figure IV.37 Modélisation de la zone endommagée par deux prismes

Expérimentalement, la variation de volume a été déterminée par analyse d'images, mais également en utilisant la formule (21) afin de vérifier que l'hypothèse de la forme en deux troncs de cône accolés était correcte. Les deux méthodes ont fourni des résultats équivalents.

La géométrie axisymétrique permet d'accéder aux déplacements longitudinaux en surface (nœud S) et en cœur d'éprouvette (nœud C). A l'aide de cette formule (21), on calcule d'abord l'augmentation de volume en prenant comme hauteur h la valeur issue du déplacement longitudinal du nœud S. On procède ensuite au même calcul en prenant cette fois-ci comme valeur de h le déplacement longitudinal du nœud C. Ces calculs visent à déterminer la différence d'augmentation de volume qui existe entre une mesure issue de la surface et une mesure issue du cœur.

Les résultats sont présentés pour l'AE4 (a) et l'AE0.8 (b) sur la figure IV.38.

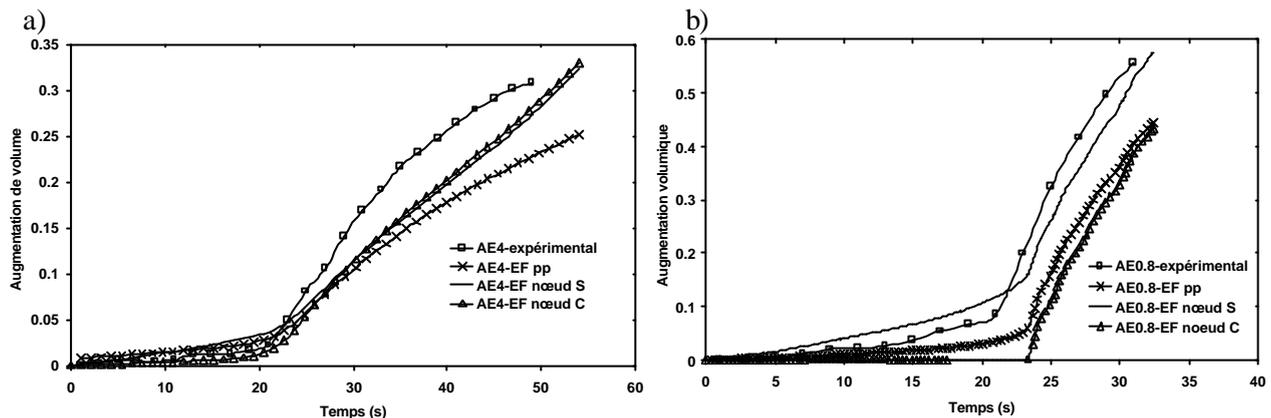


Figure IV.38 Comparaison de l'évolution de la déformation volumique suivant que le déplacement est pris en surface ou en cœur, par rapport aux résultats expérimentaux obtenus à 20°C, et 0.05 mm/s, et par rapport au calcul par post-processeur, AE4 (a) et AE0.8(b)

Une distinction assez nette doit être faite suivant le type d'éprouvette. Pour l'AE4, peu de différences sont obtenues entre la déformation volumique basée sur le déplacement du nœud S et celle issue du déplacement du nœud C. En revanche, on observe une meilleure correspondance avec l'expérience, en sachant que l'écart entre les deux est dû aux erreurs expérimentales de détermination du volume et à la non correspondance parfaite du modèle aux mesures. En revanche, il est à noter que si le calcul du post-processeur sous-estime le volume, il reproduit bien la diminution de la pente. Il traduit donc le ralentissement de la croissance des cavités.

Concernant l'AE0.8, la mesure de la variation de volume issue du déplacement du nœud S donne de meilleurs résultats avec l'expérience. Celle issue du nœud C indique que la déformation volumique serait nettement plus faible en cœur d'éprouvette. C'est ce que traduit en partie le calcul en post-processeur. On notera un léger décalage dans le temps relatif au début de l'augmentation de volume pour l'AE0.8. Concernant les calculs précédents, les erreurs de mesures expérimentales expliquent sans doute les écarts par rapport au modèle. Afin de vérifier maintenant que les profils des éprouvettes déformées correspondent qualitativement à ceux des calculs par EF, on choisit de comparer les éprouvettes avant rupture, pour l'éprouvette AE4 (cf. Figure IV.39) et AE0.8 (cf. Figure IV.40).

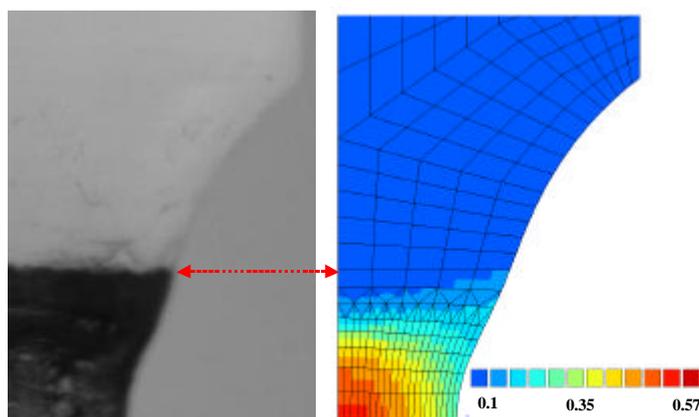


Figure IV.39 Comparaison des profils de déformation en surface pour l'AE4 avant rupture, 20°C et 0.05 mm/s

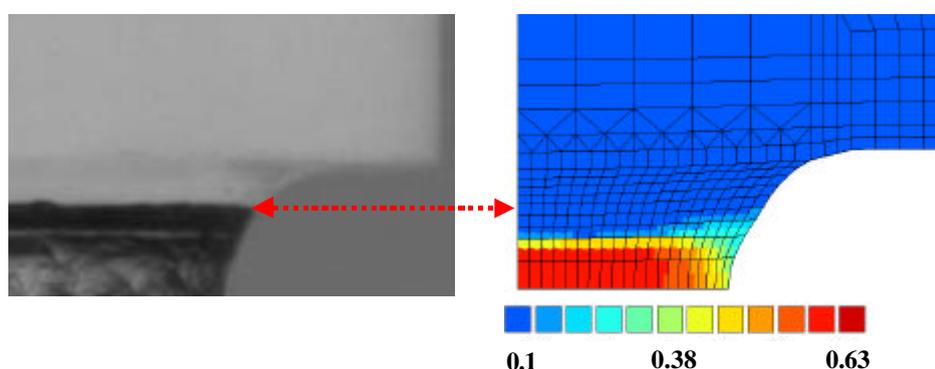


Figure IV.40 Comparaison des profils de déformation en surface pour l'AE0.8 avant rupture, 20°C et 0.05 mm/s

Les deux figures précédentes indiquent une bonne reproduction du profil de déformation expérimentale par le calcul par EF. Les iso-valeurs représentées correspondent au taux de porosité dans le matériau, la couleur rouge correspondant au taux de porosité le plus élevé. On peut constater que la hauteur de la zone noircie a sans doute été surestimée si on se base sur les résultats EF. Il semble que la zone réellement concernée par le blanchiment soit plus confinée. Les éléments au centre de l'éprouvette sont très étirés et traduisent ainsi le fort allongement des fibrilles dans cette zone très endommagée.

Si maintenant on regarde le profil des éléments dans l'épaisseur, on s'aperçoit essentiellement sur l'AE0.8 que les éléments situés sur le haut de l'elset en cœur sont moins déformés que ceux situés au bord. Il semble donc bien qu'il y ait un profil d'endommagement lié à la triaxialité plus importante dans l'éprouvette qu'en surface. L'erreur commise en mesurant la déformation surfacique pourrait donc s'expliquer par le schéma suivant qui indique le profil d'endommagement dans l'éprouvette suivant l'épaisseur (cf. Figure IV.41).

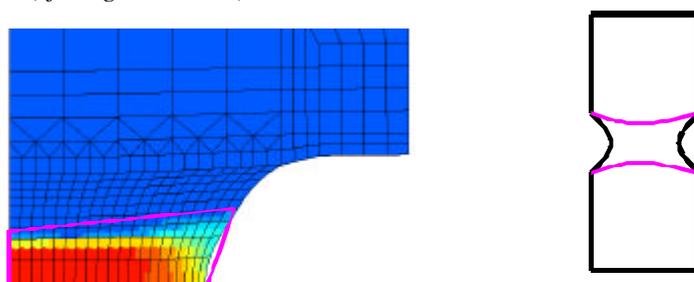


Figure IV.41 Profil d'endommagement volumique d'une éprouvette AE0.8 dans l'épaisseur