CRITERE DE CAVITATION DANS DES PARTICULES D'ELASTOMERE : INFLUENCE DE LA DEFORMATION PLASTIQUE DANS LA MATRICE

C. Fond, S. Géhant et R. Schirrer

Résumé : On rappelle le principe des critères de cavitation pour des particules d'élastomère dans des matrices polymères. Les critères existants étant basés sur une analyse élastique linéaire, ce même principe est étendu pour des comportements de matrice élastiques-plastiques. Les résultats sont focalisés sur la cavitation en traction uniaxiale et la méthode des éléments finis est utilisée pour la modélisation. On construit un volume élémentaire représentatif sur la base d'une inclusion sphérique. Les influences de la fraction volumique en élastomère, de la loi de comportement de la matrice et de la rigidité relative de l'élastomère sur le niveau de dépression dans la particule d'élastomère sont analysées. Il apparaît que la progression de la plasticité dans la matrice s'accompagne d'une saturation du niveau de dépression hydrostatique dans l'élastomère dans tous les cas. On montre aussi que l'histoire de la cavitation influence peu la progression de la plasticité dans la matrice.

1. INTRODUCTION

Les modèles de cavitation proposés [1] [2] [3] [4] pour les particules d'élastomère des polymères renforcés au choc ont été jusqu'ici formulés avec des modèles de comportement élastique linéaire. Les critères de cavitation sont basés sur la conservation de l'énergie entre l'état initial, particule saine en dépression hydrostatique, et l'état final, particule endommagée et dépression relâchée. Bien que cette modélisation soit discutable [5], puisque le bilan d'énergie n'est pas vérifié à tout instant pendant le processus de cavitation, ces modèles fournissent des valeurs plausibles pour les dépressions critiques au seuil de cavitation et la bonne tendance pour la sensibilité du critère à la taille de la particule. Aux vitesses de déformation typiques de celles induites par les essais Charpy ou Izod, on observe une compétition entre plasticité et cavitation. Peu d'études sont disponibles en ce qui concerne les critères de cavitation en présence de plasticité, citons cependant [6]. Nous proposons donc ici d'évaluer l'influence de la plasticité dans la matrice sur les dépressions dans les particules d'élastomère et sur le bilan d'énergie.

La compréhension du mécanisme de cavitation a beaucoup progressée ces dernières années grâce aux essais de traction uniaxiale instrumentés [7] [8] [9] [10]. En traction uniaxiale la trace et le déviateur du tenseur des contraintes sont du même ordre de grandeur. On remarque que la dépression hydrostatique dans une particule sphérique isolée d'élastomère est insensible au cisaillement pur [11]. De plus, pour des sollicitations de traction équi-biaxiale ou équi-triaxiale, la dépression dans l'élastomère est considérable et la plasticité n'est pas favorisée. Pour plus de simplicité, nous nous limiterons donc ici à la contrainte uniaxiale, dans la mesure où l'essai de traction uniaxiale est le principal outil d'investigation expérimental des laboratoires de mécanique du solide. On peut toutefois se reporter à [11] pour des résultats concernant les champs mécaniques rencontrés en sommet de fissure.

2. CRITERES DE CAVITATION

Le niveau de dépression hydrostatique dans l'élastomère, P_h, constitue le facteur principal des critères de cavitation. Le premier aspect de cette dépression est relatif à l'amorçage du processus qui nécessite une dépression, ou densité d'énergie, suffisante pour amorcer la genèse de la micro-cavité [4] [5]. Si l'on considère l'élastomère comme un fluide compressible, la matrice linéairement élastique, la dépression est donnée par [4] pour une particule sphérique isolée. Elle s'exprime par

$$P_h = \frac{(1 - \nu_m)}{(1 + \nu_m)} \frac{3\,K_r\,Tr(\boldsymbol{\sigma})}{4\,\mu_m + 3\,K_r} \tag{1}$$

où μ_m et ν_m sont respectivement le module de cisaillement et le coefficient de Poisson de la matrice, K_r le module de compressibilité de l'élastomère et $\boldsymbol{\sigma}$ le tenseur des contraintes appliquées à l'infini.

Le second aspect de la dépression concerne la quantité d'énergie libre stockée dans la particule [1] [2] [4]. De ce dernier découle l'influence du volume de la particule sur le critère de cavitation. Les champs mécaniques étant adimensionnels, toutes les variations d'énergie définies plus loin, aussi bien à l'intérieur de la particule que dans la matrice, sont proportionnelles au volume de l'inclusion. Bien sûr, l'énergie liée à la création de surface est, elle, proportionnelle à la quantité de surface créée. Cependant, afin de ne pas entrer dans la discussion sur la nature exacte de l'énergie dissipée [1] [2] [3] [4] [5], nous considérerons plus loin l'énergie disponible, $U_{cav.}$, pour la création de surface et non celle consommée.

Rappelons brièvement que le critère de cavitation s'exprime par

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 \leq 0 \tag{2}$$

où U_1 est l'énergie fournie au système, U_2 est l'énergie potentielle du système et U_3 l'énergie dissipée par le système. La cavitation étant un phénomène instable, on considère que les déplacements aux frontières sont bloqués pendant celle-ci. Cela conduit à un apport d'énergie de l'extérieur nul pendant l'endommagement de l'élastomère, c'est à dire $\Delta U_1 = 0$. Quoique la cavitation soit un mécanisme brusque, la variation d'énergie cinétique n'est pas comptée dans ce bilan. Le critère donné par l'éq. (2) fournit donc une borne inférieure pour la sollicitation critique vis à vis de la cavitation. Le terme ΔU_2 inclut l'énergie élastique restituée par la particule, $\Delta U_{él.\ part.}$, et par la matrice $\Delta U_{él.\ mat.}$. Le terme ΔU_3 comprend l'énergie plastique, $\Delta U_{pl.}$, associée au relâchement de la dépression dans le nodule et l'énergie disponible, $U_{cav.}$, pour créer la micro-cavité.

3. MODELISATION PAR LES ELEMENTS FINIS

Les calculs nécessitant une analyse matérielle non linéaire, incluant élasticité et plasticité, le choix de la méthode des éléments finis (MEF) est quasiment incontournable. Le volume élémentaire représentatif (V.E.R.), représenté en Fig. 1, conduit à un matériau quasi-périodique. Les interactions entre inclusions sont induites par des conditions aux limites sur le V.E.R. telles que les bords des maillages, dont un exemple est représenté en Fig. 2, demeurent rectilignes. Le logiciel de calcul utilisé est principalement Abaqus©. La quasi-incompressibilité de l'élastomère y fait appel à des éléments de type hybrides (un degré de liberté supplémentaire est utilisé pour la pression hydrostatique inconnue dans l'élément). Les résultats de calculs obtenus avec des maillages utilisant des triangles à 3 nœuds et quadrilatères à 4 nœuds et des triangles à 6 nœuds et quadrilatères à 8 nœuds se sont avérés quasiment identiques. Il en est de même pour les résultats obtenus avec le logiciel Castem2000 pour des maillages automatiques et une formulation basée sur la méthode de "projection des déformations" [12] [13] pour la gestion de la quasi-incompressibilité de l'élastomère. De plus, les algorithmes de convergence en plasticité sont vraisemblablement différents pour ces deux logiciels, respectivement méthode de Newton et "méthode θ". Il est possible de comparer la dépression dans l'inclusion au résultat analytique obtenu pour une inclusion élastique isolée dans une matrice linéairement élastique infinie par J. D. Eshelby

[14] [15]. Le calcul analytique prédit une contrainte uniforme dans l'inclusion lorsque les inclusions sont diluées. La table 1 compare la moyenne volumique de la dépression, P_h, dans l'inclusion, pour un V.E.R. contenant une fraction volumique, v_f, de 1% d'élastomère au résultat analytique pour $v_f \approx 0$. Les résultats concordent à 1% près sans que l'on puisse dire si l'écart provient du modèle numérique approximatif ou de la légère différence de fraction volumique. Quoiqu'il en soit, les résultats produits par l'analyse par éléments finis s'avèrent précis, du moins pour l'analyse élastique et plausibles en analyse non linéaire puisque deux logiciels différents donnent des résultats semblables.

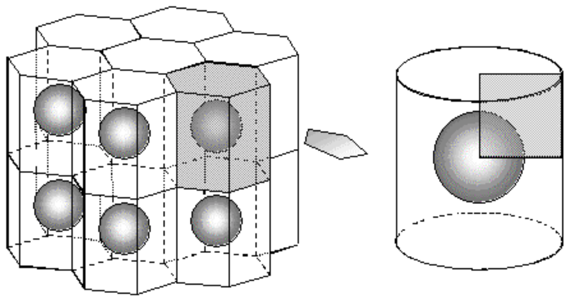


Fig. 1.Volume élémentaire représentatif : le cylindre à base circulaire est une approximation axisymétrique du cylindre à base hexagonale.

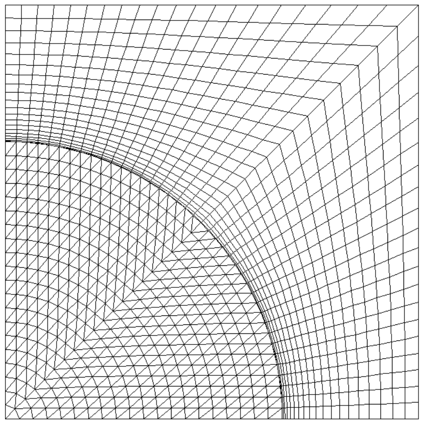


Fig. 2. Maillage axisymétrique pour v_f = 20 % utilisant les symétries du V.E.R. L'axe 3 est l'axe d'axisymétrie.

L'élastomère est supposé avoir un comportement hyperélastique néo-hookéen. Le module d'Young, E_m, de la matrice est 2 GPa et son coefficient de Poisson, ν_m, vaut 0.35. Le seuil d'écoulement, ε_y, se situe à 5% de déformation en traction uniaxiale. Les écoulements plastiques n'induisent pas de variations volumiques, même pour la loi de Drucker-Prager qui implique une sensibilité du seuil d'écoulement à la contrainte hydrostatique (potentiel d'écoulement non associé au critère de plasticité dans ce cas).

K_m / K_r	P_h / Tr($\boldsymbol{\sigma}$) (analytique)	$\langle P_h \rangle$ / Tr($\boldsymbol{\sigma}$) (E. F.)	Erreur relative
1	0.2549	0.2528	–0.81 %
1.5	0.2889	0.2863	–0.91 %
2	0.3333	0.3299	–1.03 %

Table 1. Comparaison des dépressions hydrostatiques fournies par la solution d'Eshelby pour une particule d'élastomère (E_r = 1 MPa) isolée dans une matrice élastique infinie (E_m = 2 GPa, ν_m = 0.35) et par E.F. pour un modèle axisymétrique (v_f = 1%) en traction uniaxiale (σ_{zz} = 1).

4. EVOLUTION DE LA DEPRESSION DANS LES PARTICULES D'ELASTOMERE

Le comportement global du V.E.R. est reporté en Fig. 3 pour des fractions volumiques comprises entre 1 % et 30 % et pour un comportement élastique-plastique-parfait de la matrice (potentiel d'écoulement associé au critère de plasticité de von Mises). Pour v_f = 1 %, la courbe de traction est quasiment identique à ce que serait celle de la matrice pure, en absence d'endommagement ou rupture. Le module d'Young ainsi que la contrainte d'écoulement diminue de façon significative lorsque la fraction volumique de particule augmente. Ces deux grandeurs évoluent de façon approximativement identique : baisse d'environ 2 %, 8 %, 14 %, 25 % et 35 % respectivement pour les fractions volumiques 1 %, 5 %, 10 %, 20 % et 30 %. Quoique la plasticité apparaisse à l'équateur de la particule pour une déformation globale ε_{33} de l'ordre de $\varepsilon_y / 2$, l'écoulement plastique ne devient significatif qu'aux environs de $\varepsilon_{33} = \varepsilon_y$. La dépression dans la particule d'élastomère suit sensiblement l'évolution de la contrainte. On peut observer une légère augmentation au début de l'écoulement plastique généralisé (ε_{33} = 5÷8 %). La dépression diminue sensiblement lorsque la fraction volumique de particule augmente.

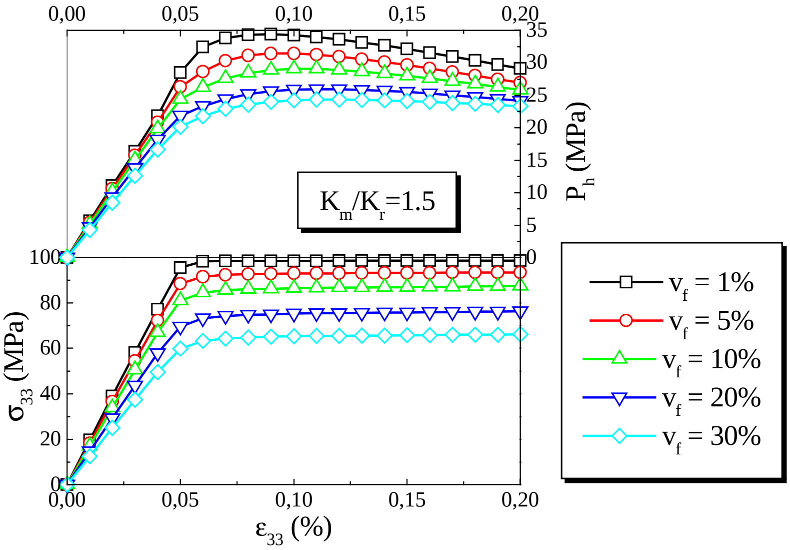


Fig. 3. (bas) Comportement global du matériau idéalisé en traction uniaxiale. (haut) Evolution de la dépression dans la particule d'élastomère en fonction de la déformation globale.

La tendance à la saturation du niveau de dépression hydrostatique dans l'élastomère lorsque l'écoulement plastique se généralise dans presque toute la matrice environnante est générale. En effet, la Fig. 4 montre que, pour une large gamme de rapport de compressibilité, K_m / K_r, (voir Table 2), entre la particule et la matrice, le maximum est atteint entre 6 % et 18 % de déformation. Ce maximum évolue peu avec le rapport K_m / K_r, mais est toujours sensible à la fraction volumique de particule.

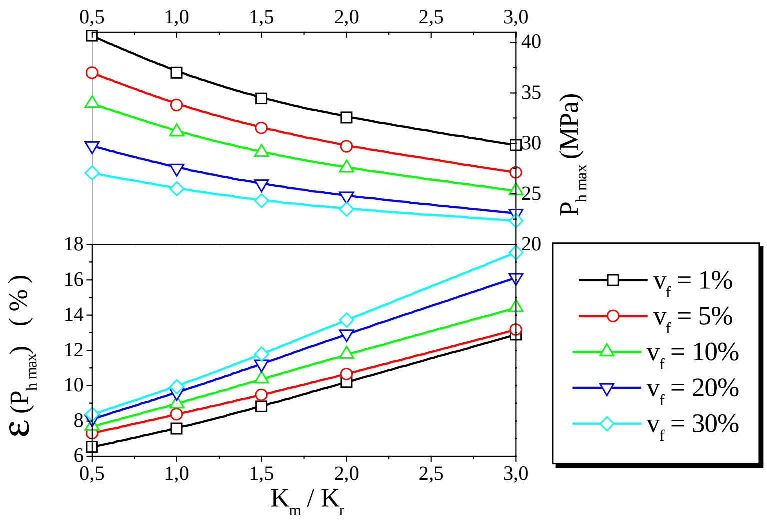


Fig. 4. (haut) Evolution de la dépression maximum, P_h, et (bas) de la déformation globale associée, $\varepsilon(P_{h\ max})$, dans l'élastomère en fonction des caractéristiques relatives de compressibilité matrice-particule.

$\frac{K_m}{K_r}$	K_r (Mpa)	ν_r
0.5	4444	0.4999625
1	2222	0.499925
1.5	1481	0.4998875
2	1111	0.49985
2.5	889	0.4998125
3	741	0.499775

Table 2. Caractéristiques de l'élastomère pour K_m = 2222 MPa et E_r = 1 MPa.

L'influence de la loi de comportement est visualisée en Fig. 5, pour une fraction volumique de particules de 1 %. Quatre lois ont été testées, avec un critère de plasticité de von

Mises. Deux lois, élastique-plastique-parfait avec et sans écrouissage, et deux lois de type Drucker-Prager avec et sans écrouissage. Pour ces dernières, le critère décrit une forte dépendance du seuil d'écoulement à la contrainte hydrostatique : la contrainte d'écoulement vaut 100 MPa en traction uniaxiale et 132 MPa en compression uniaxiale. Pour se rendre compte de l'effet d'une loi avec "crochet de traction", on peut se reporter à [11]. Il apparaît que le rapport P_h / Tr($\boldsymbol{\sigma}$) varie de 1.28 à 1.65 fois l'estimation élastique. Compte tenu de l'effet relativement important des interactions mécaniques entre inclusions sur les dépressions dans les particules [16], on peut donc admettre que l'estimation élastique est bonne en première approximation. L'écrouissage, qui à tendance à diffuser la déformation plastique, et donc "rigidifier" la matière à l'équateur de la particule, diminue le niveau de dépression. Par contre, la sensibilité à la contrainte hydrostatique, qui favorise la déformation plastique à l'équateur de la particule, augmente le niveau de dépression. La dépression transmise à l'élastomère est d'autant plus grande que le module de compressibilité de la particule, relativement à celui de la matrice, est grand.

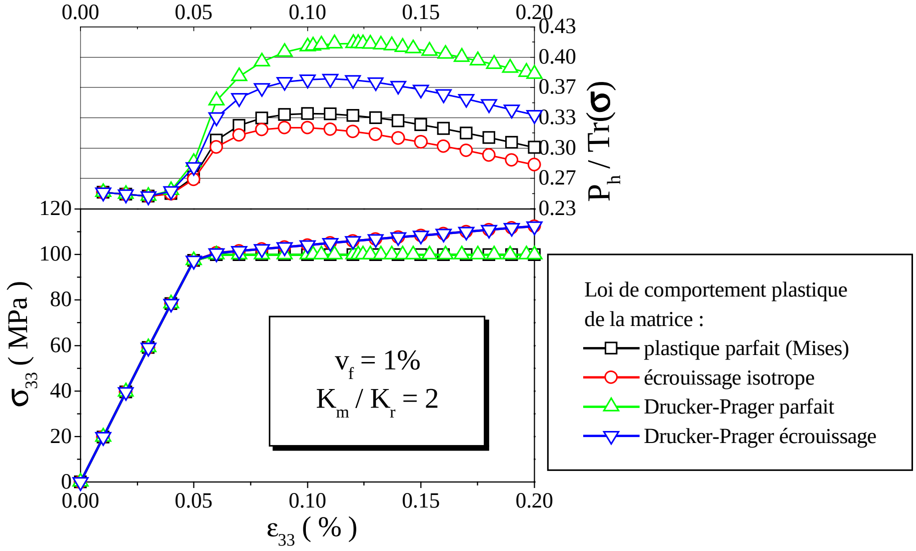


Fig. 5. Influence de la loi de comportement de la matrice sur la dépression hydrostatique dans la particule d'élastomère.

5. BILANS D'ENERGIE

Comme l'indique la section 2, le niveau de dépression dans l'élastomère n'est pas le seul critère de cavitation. Il faut aussi évaluer les énergies stockées dans et au voisinage de l'inclusion. Les résultats suivants sont relatifs à une loi de comportement élastique-plastique-parfait. En première approximation, on peut considérer l'élastomère comme un fluide compressible, c'est à dire négliger l'énergie de déformation associée au cisaillement. Ceci est illustré en Fig. 6 où l'on s'aperçoit qu'en effet l'estimation élastique fournie par l'éq. (1) et la connaissance de la contrainte de traction, σ_{33}, donne le bon ordre de grandeur pour l'énergie stockée dans la particule. On a donc reporté en Fig. 6, à titre de comparaison, les valeurs obtenues par les équations

$$P_h = \frac{(1 - \nu_m)}{(1 + \nu_m)} \frac{3\, K_r\, \sigma_{33}}{4\, \mu_m + 3\, K_r} \text{ et } U_{\text{él. part.}} = P_h^2 / 2\, K_r \qquad (3)$$

L'estimation est particulièrement bonne à faible module d'Young, typiquement 1 MPa.. Lorsque l'élastomère est relativement rigide, typiquement 30 MPa, l'énergie liée au cisaillement devient non négligeable en grandes déformations. Il est important de remarquer que le module influence la tendance. En effet, on observe une saturation de l'énergie élastique en plasticité aux petites valeurs de E_r (K_r / $E_r \approx 10^3$) mais pas aux relativement grandes valeurs (K_r / $E_r < 10^2$). L'énergie élastique est directement liée au module de compressibilité K_r, mais le rapport K_m / K_r influence la part relative d'énergie associée à la particule. L'énergie stockée par particule est moindre aux fortes fractions volumiques de particules.

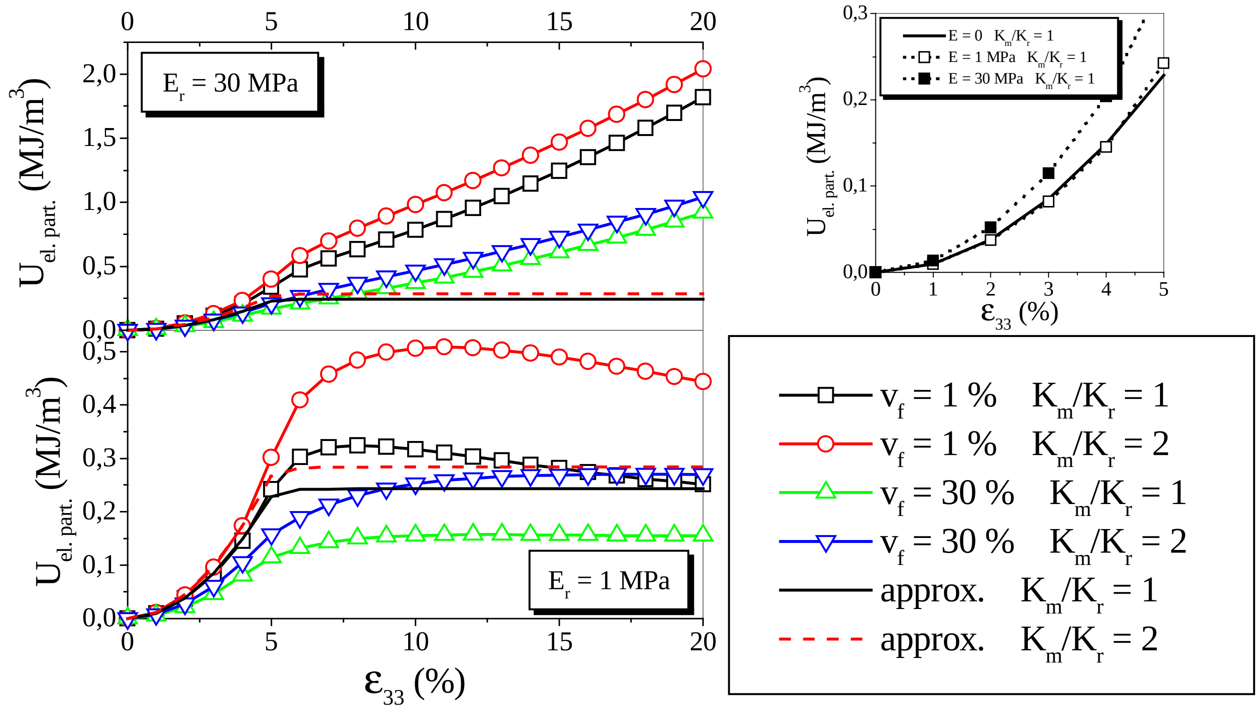


Fig. 6. Evolution de l'énergie élastique dans la particule en fonction de la déformation en traction uniaxiale. Les résultats qualifiés "approx." proviennent de l'éq. 3.

La Fig. 7 recense les variations d'énergie lorsque l'élastomère subit une cavitation en fonction de la déformation à laquelle se produit la cavitation, $\varepsilon_{cav.}$. Pour $v_f = 30$ % une striction apparaît au niveau de l'équateur de la particule, ce qui explique l'inversion de tendance entre 20 % et 30 %. Les variations d'énergies élastiques dans la particule et la matrice, respectivement $\Delta U_{\text{él. part.}}$ et $\Delta U_{\text{él. mat.}}$, ainsi que l'incrément de déformation plastique lié à la cavitation, $\Delta U_{pl.}$, saturent peu après ε_y, quelle que soit la fraction volumique en particules. Les variations d'énergies sont plus grandes aux faibles fractions volumiques, mais il faut remarquer que la morphologie induite par le V.E.R. favorise les effets d'écran en ce qui concerne les interactions entre particules. Ceci est aussi visible sur les Fig. 3 et 4 puisque la dépression moyenne dans la particule d'élastomère diminue lorsque la fraction volumique de particules augmente.

D'autre part, pour ce modèle pseudo-périodique, toutes les particules s'endommagent en même temps. La cavitation de chaque particule ne peut donc consommer que l'énergie de la cellule élémentaire de taille finie, alors qu'une particule isolée peut consommer la variation d'énergie liée à la perturbation quelle engendre dans un milieu quasi-infini. La réalité est autre puisque les particules dans les polymères chocs ne sont pas organisées. Les interactions mécaniques tendent à déclencher la cavitation dans les particules pour un niveau de sollicitation différent [10] [16]. Les résultats obtenus pour un V.E.R. doivent donc être considérés avec discernement. Néanmoins, l'incrément d'énergie plastique dissipée, $\Delta U_{pl.}$, devant être soustrait de l'énergie disponible pour créer une nouvelle surface ($U_{cav.} = - \Delta U_{\text{él. part.}} - \Delta U_{\text{él. mat.}} - U_{pl.}$) l'influence de la fraction volumique sur le bilan d'énergie demeure relativement modérée, comme le montre la Fig. 8. L'énergie de cavitation atteint sa valeur maximale pour une déformation de l'ordre de 1.5 fois ε_y et varie approximativement du simple au double pour des fractions volumiques comprises entre 30 % et 1 %.

La déformation à laquelle se produit la cavitation influence peu le comportement global du V.E.R. La Fig. 9 montre qu'en effet le comportement en traction se résume essentiellement à deux courbes contrainte-déformation. L'une concerne un V.E.R. poreux (particule endommagée) et l'autre un V.E.R. contenant une particule saine. La cavitation fait passer le comportement global d'une courbe à l'autre. La Fig. 10, qui présente les isovaleurs de la déformation plastique équivalente dans le V.E.R. pour trois déformations à la cavitation différentes, montre que les champs locaux sont proches, que la cavitation ait lieu en phase élastique ou plastique.

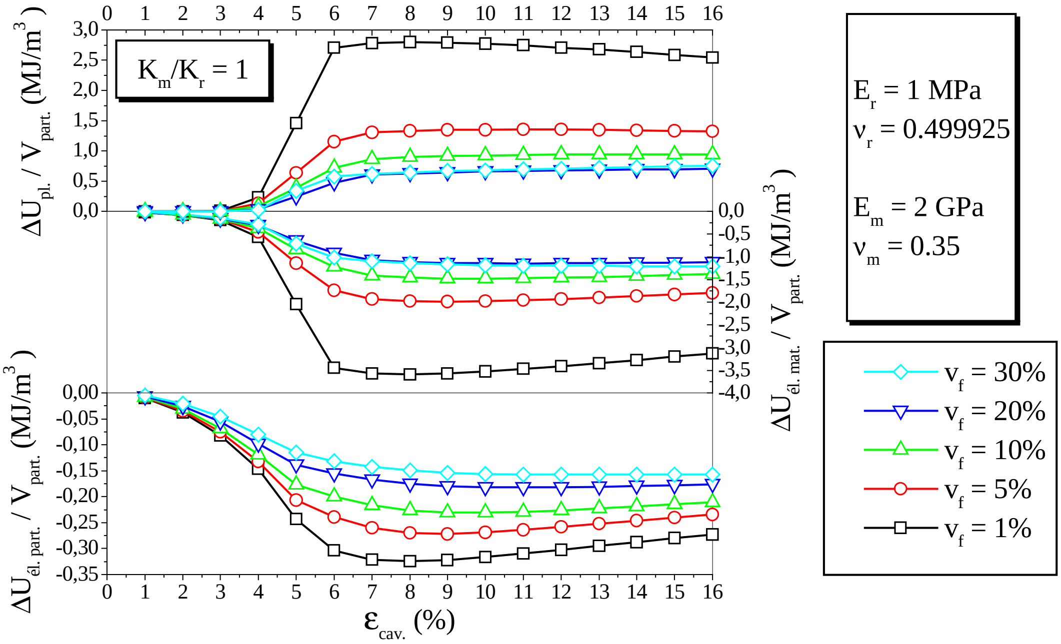


Fig. 7. Evolution des variations d'énergies, normées par le volume de la particule, en fonction de la déformation en traction uniaxiale à laquelle se produit la cavitation, pour diverses fractions volumiques de particules. (bas) Energie élastique dans la particule. (milieu) Energie élastique dans la matrice. (haut) Energie dissipée en plasticité dans la matrice.

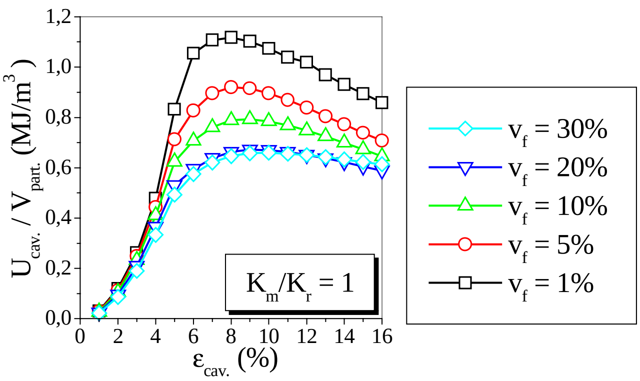


Fig. 8. Evolution de l'énergie disponible pour la cavitation, normée par le volume de la particule, en fonction de la déformation en traction uniaxiale à laquelle se produit la cavitation, pour diverses fractions volumiques de particules ($E_m = 2$ GPa, $\nu_m = 0.35$, $\varepsilon_y = 5$ % et $E_r = 1$ MPa).

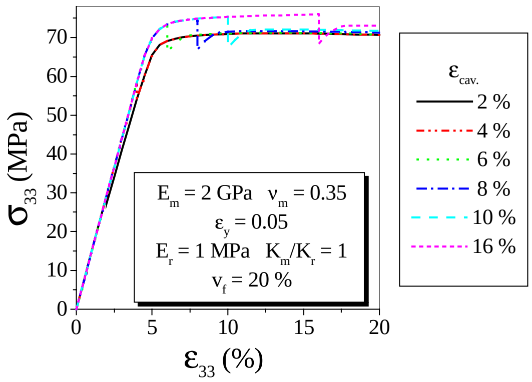
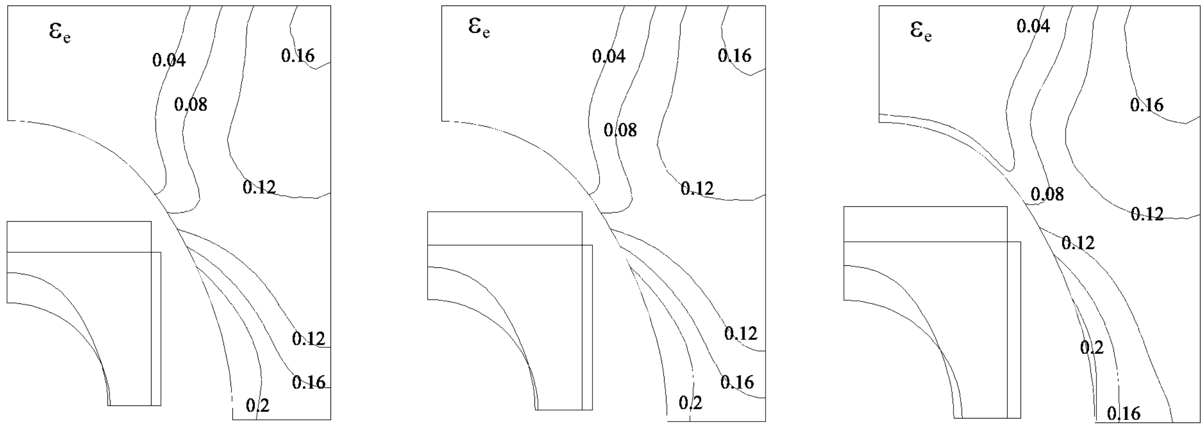


Fig. 9. Evolution de l'énergie disponible pour la cavitation, normée par le volume de la particule, en fonction de la déformation en traction uniaxiale à laquelle se produit la cavitation, pour diverses fractions volumiques de particules (E_m = 2 GPa, ν_m = 0.35, ε_y = 5 % et E_r = 1 MPa).



ε_{33} = 20 %, $\varepsilon_{cav.}$ = 2 % ε_{33} = 20 %, $\varepsilon_{cav.}$ = 6 % ε_{33} = 20 %, $\varepsilon_{cav.}$ = 16 %

Fig. 10.Isovaleurs de la déformation plastique équivalente dans la matrice pour une déformation moyenne de 20% et une déformation à laquelle se produit la cavitation de 2% (cavitation en phase élastique), 6% (cavitation au niveau du coude de plasticité du V.E.R.) et 16% (cavitation en phase de plasticité généralisée).

6. DISCUSSION

Pour la morphologie quasi-périodique définie par le V.E.R. de la Fig. 1, il apparaît peu probable que la cavitation a lieu au-delà du seuil d'écoulement plastique global. Si la cavitation est pilotée par le bilan énergétique de l'éq. (2), et pour un comportement de la matrice élastique-plastique-parfait, en traction uniaxiale elle se produira préférentiellement pendant la phase pseudo-élastique du chargement (Fig. 3 et 8). On ne peut cependant pas étendre cette conclusion pour une répartition aléatoire des particules. En effet, les écoulements plastiques modifient les tenseurs de localisation obtenus par l'élasticité. La redistribution des efforts au niveau microscopique a plutôt tendance à uniformiser les sollicitations dans les particules. On constate en effet expérimentalement de nombreuses cavitations au niveau du coude plastique de la courbe contrainte-déformation en traction uniaxiale [8]. La formation de bande de cisaillement correspond effectivement à la formation de bandes de trous lorsqu'il y a plasticité et non craquelage [17].Pour modéliser ce dernier point, il faut se tourner vers des développements spécifiques sur base de la MEF [18] ou de transformées de Fourier [19], permettant de prendre en compte dans une simulation à la fois un comportement non linéaire pour les matériaux et un nombre suffisant d'inclusions. Ces outils n'ont, à ma connaissance, pas encore été exploités pour les polymères.

Il est pertinent de se demander si la nature de l'écoulement dans la matrice influence les tendances générales qui se sont dégagées jusqu'ici. Nous avons pu vérifier expérimentalement que des essais de fluage sur un PMMA choc pouvaient présenter différentes cinétiques de cavitation. La Fig. 11 illustre les résultats d'un modèle par EF en traction uniaxiale pour une particule isolée dans une matrice dont le comportement en fluage est décrit par une loi de Norton. La contrainte hydrostatique dans la particule d'élastomère est corrélée à la contrainte macroscopique et son évolution connaît aussi une saturation. On retrouve effectivement que l'évolution de la dépression hydrostatique dans l'élastomère, liée à la cinétique de cavitation, dépend de la contrainte macroscopique imposée. Il semble donc que la nature de l'écoulement, plastique ou visqueux, ne soit pas un des paramètres clefs de la cavitation.

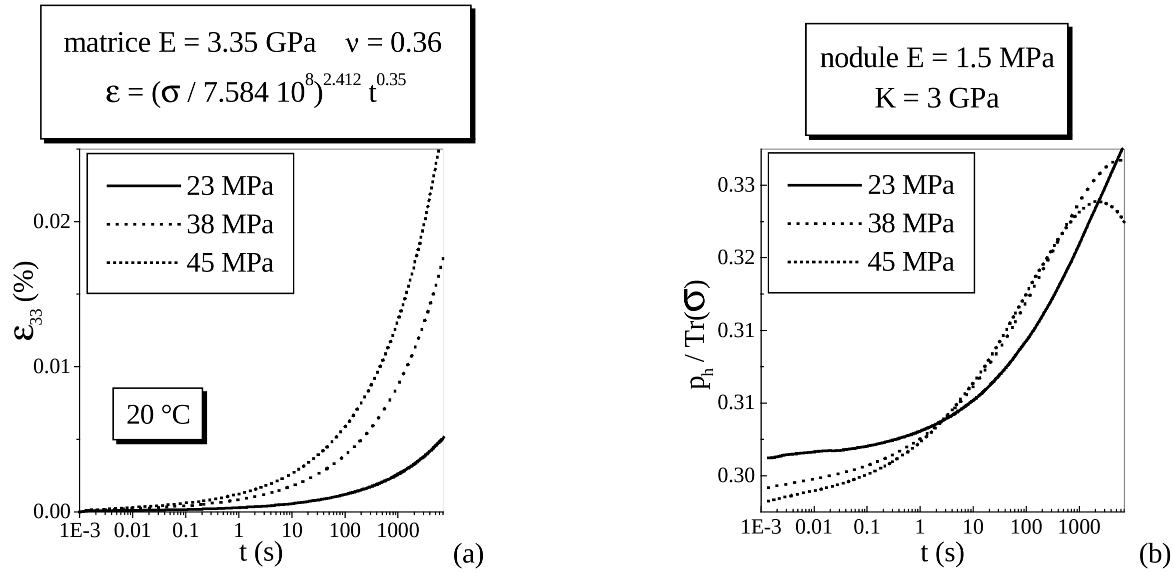


Fig. 11. (a) Evolution de la déformation en fluage d'une matrice en polymère amorphe et (b) évolution de la dépression hydrostatique dans une particule d'élastomère lorsque la matrice flue.

7. CONCLUSION

L'estimation élastique de la dépression dans les particules d'élastomères [4] pour la traction uniaxiale est, en première approximation, satisfaisante à condition de prendre comme référence la contrainte appliquée. Il faut en effet relativiser les effets de la plasticité par rapport aux interactions mécaniques [5]. La présence de plasticité, à elle seule, ne permet pas d'expliquer le fort blanchiment qui se produit au seuil d'écoulement à certaines vitesses de déformation et températures. Il semble que cela soit les interactions mécaniques en présence de plasticité qui permettent d'expliquer les "avalanches" de cavitation qui forment les bandes de dilatation.

Selon la vitesse de déformation et la température, la cavitation apparaît pour un niveau de contrainte différent. Cependant l'analyse reste simple puisque l'histoire de la cavitation n'influence que peu l'évolution de la plasticité. Les résultats obtenus autorisent donc d'éviter, pour des simulations futures, des instabilités numériques en considérant que la cavitation à lieu dans la phase élastique, c'est à dire de considérer un V.E.R. contenant une cavité au début du chargement.

8. RÉFÉRENCES

[1] Lazzeri, A. et Bucknall, C. B., *Dilatational Bands in Rubber-Toughened Polymers*, J. Mat. Sci., 28, (1993), p. 6799-6808.

[2] Dompas, D. et Groeninckx, G., *Toughening Behaviour of Rubber-Modified Thermoplastic Polymers Involving Very Small Rubber Particles: 1. A Criterion for Internal Rubber Cavitation*, Pol. 35, (1994), p. 4743-4749.

[3] Bucknall, C. B., Karpodinis, A. et Zhang, X. C., *A Model for Cavitation in Rubber-Toughened Plastics*, J. Mat. Sci., **29**, (1994), p. 3377-3383.
[4] Fond, C., Lobbrecht, A. et Schirrer, R., *Polymers Toughened with Rubber Microspheres; an Analytical Solution for Stresses and Strains in the Rubber Particles at Equilibrium and Rupture*, Int. J. Fract., (1996), **77**, p. 141-159.
[5] Fond, C., *Endommagement des Polymères "Choc" : Modélisation Micromécanique et Comportements à la Rupture*, thèse d'habilitation à diriger des recherches, (2000), Université Louis Pasteur, Strasbourg.
[6] Géhant, S., Schirrer, R. et Fond, C., *Polymères Chocs : Dépression Hydrostatique dans des Inclusions Sphériques d'Elastomère au-delà du Seuil de Plasticité de la Matrice,* Colloque "Eléments Finis Polymères", Ecole des Mines de Nancy, 3 et 4 novembre 1997.
[7] Frank, O. et Lehmann, J., *Determination of Various Deformation Processes in Impact-Modified PMMA at Strain Rates up to 10^5 %/min*, Colloid & Polymer Sci., **264**, (1986), p. 473-481.
[8] Schirrer, R., Fond, C., et Lobbrecht, A., *Volume Change and Light Scattering During Mechanical Damage in PMMA (Polymethylmethacrylate) Toughened with Core Shell Rubber Particles*, J. Mat. Sc., (1996), **31**, p. 6409 - 6422.
[9] Béguelin Ph, *Approche Expérimentale du Comportement Mécanique des Polymères en Sollicitation Rapide*, Ph. D. Thesis, (1996), 1572, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
[10] Géhant, S. et Schirrer, R, *Multiple Light Scattering and Cavitation in Two Phase Tough Polymers,* J. Polym. Sci. b. Polym. Physics, **37**, 2, (1999), p. 113-126.
[11] Fond, C., *Domaines d'Elastomère dans une Matrice Polymère : Cavitation et Plasticité en Relation avec la Morphologie - Annexes*, thèse d'habilitation à diriger des recherches, (2000), Université Louis Pasteur, Strasbourg.
[12] Nagtegall, J. C. et Parks, D. M., *On Numerically Accurate Finite Element Solutions in the Fully Plastic Range*, Computer Meth. Appl. Mech. Eng., **4**, (1974), p.153-178.
[13] Hugues, T. J. et Malkus, D. S., *A General Penalty / Mixed Equivalence Theorem for Anisotropic Incompressible Finite elements*, Ed. S. N. Atluri & O. C. Zienckiewicz, Hybrid and Mixed Finite element Method, John Wiley & sons, (1983), p.487-495.
[14] Eshelby, J. D., *The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems*, Proc. Roy. Soc. Lond. A, **241**, (1957), p. 376-396.
[15] Eshelby, J. D., *The Elastic Field Outside an Ellipsoidal Inclusion*, Proc. Roy. Soc. Lond. A, **252**, (1959), p. 561-569.
[16] Géhant, S., Fond, C. et Schirrer, R., *Damage in Rubber-Toughened Polymers: Micromechanical Simulations of Cavitation Involving Interactions Between Randomly Distributed Rubber Particles*, Euromech 402, Micromechanics of Fracture Processes, 25-27 October 1999, Seeheim, Germany.
[17] Cheng, C., Hiltner, A., Baer, E., Soskey, P. R. et Mylonakis, S. G., *Cooperative Cavitation in Rubber-Toughened Polycarbonate*, J. Mater. Sci., **30**, (1995), p.587-595.
[18] Böhm, H. J., Antretter, A., Eckschlager, A. et Han, W., *Arrangement Effects on Initiation of Particle Failure in Composite Materials with Ductile Matrix*, Euromech 402, Micromechanics of Fracture Processes, 25-27 October, 1999, Seeheim, Germany.
[19] Moulinec, H. et Suquet, P., *A Numerical Method for Computing the Overall Response of Nonlinear Composites with Complex Microstructures*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 157 (1998), 69-94.