
CONCLUSION

L'objectif de ce travail de thèse était de développer un modèle mécanique permettant de prévoir la durabilité des assemblages collés, et capable de prendre en compte des paramètres physico-chimiques qui caractérisent le comportement particulier de l'adhésif polymère et son évolution dans le temps.

L'étude bibliographique a permis de sélectionner un modèle de zone cohésive qui semble constituer un point de départ intéressant pour le développement de cet outil théorique prédictif. Il s'agit du modèle du premier gradient de l'endommagement qui fournit une description de l'état du joint adhésif en tout point et à tout instant, à travers une équation d'évolution de l'interface faisant intervenir :

- une variable d'endommagement b (caractéristique de la proportion de liens adhésifs intacts à l'interface),
- le déplacement relatif des deux substrats collés u ,
- cinq coefficients théoriques caractéristiques du comportement de l'adhésif :
 - l'énergie d'adhésion substrat/adhésif w ,
 - l'énergie de cohésion interne de l'adhésif C_{coe} ,
 - la raideur macroscopique du joint adhésif k ,
 - un paramètre traduisant la dissipation d'énergie par rupture des liaisons adhésives C_{vit} ,
 - un paramètre énergétique relatif aux facteurs externes non mécaniques A .

Une première partie du travail a consisté à identifier les mécanismes de vieillissement des adhésifs époxydes sous forme d'échantillons massiques ou sous forme de joints adhésifs dans des assemblages collés.

Nous avons montré que la cinétique lente de polymérisation et le vieillissement physique sont les deux principaux facteurs susceptibles de faire évoluer la microstructure de l'adhésif dans des conditions dites standards (20°C, 50% H.R.). Une approche expérimentale associée à des modélisations phénoménologiques simples a permis de décrire la cinétique de vieillissement physique et l'évolution des propriétés viscoélastiques des adhésifs en fonction du temps.

Lors des vieillissements en milieux aqueux, nous avons vu que la cinétique d'absorption dépend fortement de la composition des adhésifs (présence de charges et de plastifiants) et de la nature de la solution d'immersion. Dans tous les cas, cette cinétique peut être décrite par un modèle basé sur un couplage des théories d'absorption par diffusion fickienne et par relaxation des contraintes de gonflement. Ce vieillissement humide s'accompagne d'un phénomène de plastification, qui conduit à une chute importante des propriétés mécaniques de l'adhésif (rigidité et contrainte à la rupture) ainsi qu'à une diminution de la température de transition vitreuse T_g . L'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la durée de vieillissement semble pouvoir être décrite par une loi de comportement de type exponentielle, tandis que l'évolution de T_g semble bien décrite par un modèle entropique.

La comparaison des phénomènes de vieillissement des adhésifs massiques avec ceux des joints adhésifs met en évidence des différences de cinétiques qui

peuvent être attribuées à une répartition particulière des contraintes dans le polymère confiné au sein des joints ou à des effets d'interface. Néanmoins, les approches théoriques développées pour les adhésifs massifs semblent rester valides pour les joints à condition d'ajuster les variables des modèles.

La partie centrale de ce travail de thèse a été consacrée à la mise au point de l'outil de modélisation mécanique basé sur la théorie du premier gradient de l'endommagement.

Dans un premier temps, le modèle de base a été confronté à l'expérience dans le cadre d'essais de traction homogène sur assemblages collés non vieillis (paramètre $A = 0$ et $C_{coe} = 0$). Cette configuration particulière permet en effet de résoudre le problème mécanique de manière analytique en simplifiant considérablement les équations d'évolution de l'interface dans le modèle. Les expériences ont mis en évidence des phénomènes de fluage et un raidissement du joint en début d'essai qui n'étaient pas prévus par la théorie, et qui semblent associés au comportement viscoélastique de l'adhésif. Ce constat nous a amené à raffiner le modèle en introduisant une nouvelle variable (temps de recouvrance t) qui permet de prendre en compte les phénomènes de dissipation d'énergie par glissement des chaînes. Cette variable étant reliée à la raideur de l'échantillon k , le nombre de constantes indépendantes du modèle reste inchangé. Le modèle ainsi optimisé a permis de décrire de manière satisfaisante le comportement expérimental des assemblages collés en traction homogène, et nous avons pu déterminer les valeurs des coefficients C_{vit} , k , t , et w caractérisant le comportement du joint adhésif non vieilli.

Dans un second temps, une configuration expérimentale en conditions non homogènes a été proposée, afin d'achever la validation du modèle : il s'agit d'un essai de traction sur éprouvettes avec joints à double recouvrement. Une première série d'essais a montré que le comportement du joint est similaire à celui observé en traction homogène (raidissement en début d'essai et phénomènes de relaxation). Des expériences complémentaires sont encore nécessaires, mais il semble d'ores et déjà que le modèle optimisé puisse prendre en compte l'ensemble des mécanismes impliqués, et permette ainsi d'identifier la dernière variable du modèle C_{coe} , liée au laplacien de la variable d'endommagement.

Plusieurs perspectives semblent se profiler à l'issue de ce travail :

- Il semble d'abord souhaitable de poursuivre la validation du modèle dans la configuration d'essai non homogène. Il est nécessaire pour cela, de finaliser la résolution numérique du problème mécanique avec gradient d'endommagement. Par ailleurs, des expériences complémentaires en torsion homogène permettraient de vérifier que le comportement du joint adhésif est bien isotrope.
- Il serait également intéressant, dans le cadre d'une étude ultérieure, d'adapter le modèle optimisé à la description du comportement d'assemblages collés vieillis (paramètre relatif à l'énergie non mécanique $A \neq 0$). On pourra par exemple regarder si l'introduction d'une loi d'évolution pour le paramètre A est suffisante pour valider le modèle dans ce cas de figure, ou s'il faut considérer des lois d'évolution indépendantes pour tous les paramètres du modèle, ce qui augmenterait considérablement la complexité du problème.