

# Adhésif époxyde structural à deux composants 3M

---

Rendement par rapport  
aux attaches mécaniques

## Résumé

De nombreux facteurs économiques et de rendement, notamment les économies de poids et d'énergie, les réductions des coûts liés à la main-d'œuvre, les améliorations esthétiques et la hausse de l'utilisation de composites et d'autres matériaux qui se prêtent mal aux méthodes de liaison traditionnelles, amènent les clients à envisager l'utilisation d'adhésifs structuraux pour remplacer les méthodes de liaison traditionnelles. Le présent document fournit un contexte pour aider à réussir la transition entre la liaison mécanique et la liaison adhésive.

## Introduction

Les méthodes traditionnelles utilisées pour joindre des pièces comprennent la soudure, le rivetage et l'utilisation d'écrous, de boulons et d'autres attaches mécaniques. Les ingénieurs de conception et de production sont à l'aise avec ces méthodes et sont maintenant mis au défi en raison de nouveaux facteurs qui rendent les limites de ces méthodes moins acceptables. La nécessité de réduire le poids afin de diminuer la consommation de carburant et d'énergie, ainsi que les émissions concomitantes, constitue un facteur clé dans de nombreuses industries, en particulier dans la fabrication de machines et d'équipements autoalimentés qui utilisent des moteurs à combustion interne ou des piles comme source d'alimentation. Ceci peut être accompli en remplaçant des pièces d'acier relativement lourdes par de l'aluminium, des composites ou des plastiques plus légers, en réduisant le nombre d'attaches mécaniques utilisées ou en utilisant de la tôle plus mince. Ces changements remettent en question les méthodes de liaison traditionnelles, puisque les matériaux, les plastiques et les composites différents ne peuvent tout simplement pas être soudés; les pièces de tôle plus minces, quant à elles, seront plus sujettes à la distorsion et à la déchirure aux points concentrés où les attaches (rivets et boulons) sont placées à travers la pièce. La distorsion et le déchirement du métal en raison de charges lourdes ou de la fatigue peuvent

entraîner la réduction de la fiabilité et de la longévité, et / ou la formation d'espaces entre les attaches. Les métaux peuvent également être endommagés par les processus de liaison traditionnels; le soudage de métal de faible épaisseur, par exemple, peut provoquer une déformation à la chaleur ou un perçage par brûlure. Un joint lié à l'aide d'un adhésif offre une belle surface propre, ce qui permet une préparation minimale de la surface avant la finition finale. Enfin, les adhésifs peuvent être appliqués à l'avance dans les endroits qui sont inaccessibles pour les attaches mécaniques durant l'assemblage final; de plus, les adhésifs permettent de nouvelles conceptions qui peuvent réduire davantage le poids, les coûts et la main-d'œuvre.

Les avancées en matière d'adhésifs sont rendues telles qu'ils constituent des solutions de rechange appropriées pour les méthodes de liaison traditionnelles dans de nombreuses applications, notamment la fabrication de panneaux métalliques dans la fabrication de portes et d'ascenseurs, ainsi que la fixation de panneaux dans la fabrication de matériel agricole, d'autobus, de camions et de trains, etc. Pour modifier des adhésifs avec succès, les ingénieurs de conception et de production doivent tenir compte d'un certain nombre de facteurs, comme indiqué ci-dessous.



# Sélection de l'adhésif

Une variété de formules d'adhésifs structuraux sont offertes sur le marché. Elles varient d'adhésifs « instantanés » au cyanoacrylate aux pellicules époxydes à un composant (thermodurcissables). Bien que tous les adhésifs aient leur utilité, ils ne sont pas tous adaptés au remplacement des soudures / attaches mécaniques lorsqu'une résistance structurale est nécessaire dans un environnement de contraintes dynamiques (c.-à-d. résistance aux chocs et aux vibrations continues). Pour ces applications exigeantes, le nombre de formules d'adhésifs convenables est limité.

Il existe trois principales formules qui confèrent une résistance structurale pour la liaison de grandes surfaces (la résistance structurale est ici définie comme une résistance au cisaillement de l'assemblage en chevauchement supérieure à 1 000 lb/po<sup>2</sup> et mesurée selon les procédures d'essai de résistance au cisaillement de l'assemblage en chevauchement standard). Les uréthanes à deux composants sont formulés pour durcir une fois mélangés et ils durcissent généralement assez rapidement à température ambiante, même dans les plans de collage épais (contrairement aux matériaux d'étanchéité à l'uréthane à un composant qui durcissent lorsqu'ils sont exposés à l'humidité du substrat ou de l'atmosphérique et dont le taux de durcissement est lent). Les uréthanes à deux composants peuvent offrir une telle résistance et leur souplesse leur permet d'offrir une assez bonne résistance aux chocs et au pelage une fois qu'ils ont formé une liaison ferme avec les substrats. Cependant, leur module généralement faible entraîne une moins bonne résistance thermique. Les uréthanes peuvent également nécessiter l'utilisation d'un apprêt sur les surfaces en métal pour maintenir l'adhérence à ces surfaces dans des conditions environnementales rigoureuses, comme une exposition à long terme à l'eau ou à l'humidité.

Les acryliques à deux composants peuvent être formulés pour former une liaison très solide sur les métaux sans l'utilisation d'un apprêt (et parfois même sans retirer les huiles de traitement ou les huiles antirouille se trouvant sur les métaux). Les acryliques présentent un meilleur rendement que les uréthanes à des températures élevées, mais ont tendance à être plus friables, ce qui entraîne une faible résistance au pelage et une faible rétention de la résistance à basse température. Avec certains acryliques, on tente de surmonter ces limites au moyen d'une formulation astucieuse, comme l'inclusion de particules élastomères ou de résine époxyde. Par conséquent, les acryliques et les produits hybrides à base d'acryliques offrant un rendement plus élevé peuvent répondre aux besoins de nombreuses applications où les températures ne sont pas trop extrêmes. De plus, leurs taux de durcissement rapides et leur capacité à se lier fortement aux plastiques sont particulièrement avantageux.

Pour obtenir une meilleure résistance aux vibrations et aux conditions environnementales, les adhésifs époxydes offrent la formule idéale. Cependant, il existe une grande variation parmi les époxydes sur le plan de leur capacité à résister aux contraintes associées aux chocs et aux vibrations, ainsi qu'aux préoccupations relatives aux conditions environnementales. Par ailleurs, ils offrent une résistance structurale très élevée.

Beaucoup de gens ne connaissent que les adhésifs époxydes de première génération, qui ont tendance à être rigides et qui peuvent présenter une moins bonne résistance aux conditions environnementales. Ces époxydes, introduits pour la première fois dans les années 1950, sont semblables aux époxydes de consommation vendus dans les quincailleries ou offerts pour les loisirs. Cependant, l'amélioration continue de la technologie des époxydes a permis de surmonter ces limites.

Dans les années 1970, des adhésifs époxydes dotés d'une souplesse nettement plus grande ont été introduits. Ils fournissent une résistance au pelage grandement améliorée, ainsi qu'une résistance aux chocs, aux contraintes thermiques et à la fatigue améliorée. Les époxydes souples sont aujourd'hui utilisés dans des applications telles que la liaison alvéolée pour les avions et les revêtements de sol de trains afin d'offrir une durée utile prolongée et fiable, même lorsqu'ils sont soumis à des vibrations et à des cycles thermiques répétés.

Dans les années 1980, les époxydes renforcés sont apparus. Contrairement aux époxydes souples, qui reposent sur un module relativement faible pour résister aux chocs et à la fatigue, les époxydes renforcés sont formulés au moyen d'une matrice à module de rigidité plus élevé comprenant de très petites particules (de l'ordre des microns) de caoutchouc. Ces particules absorbent l'énergie attribuable aux contraintes et peuvent empêcher les microfissures de se propager, offrant ainsi une résistance maximale aux chocs et à la fatigue. Les époxydes renforcés sont aujourd'hui utilisés pour les applications les plus exigeantes telles que la liaison sur les tours de téléphonie cellulaire, la liaison d'armements, la fabrication d'équipement sportif (cadres de vélo de montagne en composite et liaison de la tête sur un bâton de golf), etc.

Les époxydes renforcés ne sacrifient pas les propriétés de résistance aux conditions environnementales inhérentes à la catégorie des adhésifs et constituent généralement la meilleure solution de rechange pour les soudures et les attaches mécaniques exigeantes.

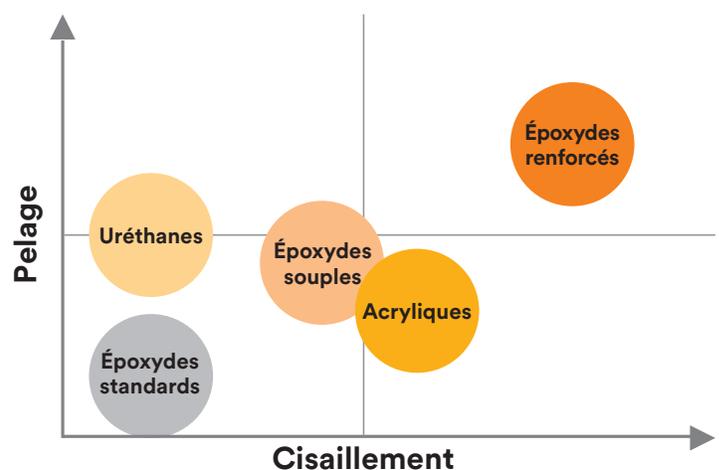


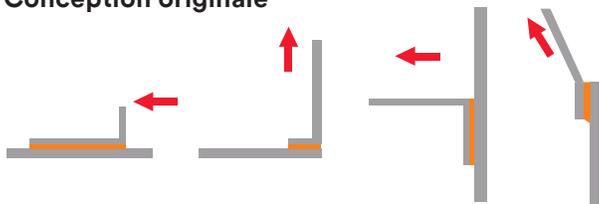
Figure 1. Relation relative entre les divers adhésifs structuraux à deux composants en comparant leur résistance au pelage et leur résistance au cisaillement.

# Conception pour les joints liés à l'aide d'un adhésif

## Configuration des joints

Les adhésifs structuraux sont les plus résistants dans des contextes de cisaillement et de traction (particulièrement en présence de compression) et présentent une plus faible résistance dans des contextes de pelage et de clivage lorsque toute la force exercée sur la liaison est concentrée sur le bord d'attaque de la séparation. Par conséquent, il est utile de concevoir des joints où les forces de cisaillement et de traction prédominent, plutôt que de concevoir des joints où les forces de pelage et de clivage sont prédominantes. L'illustration ci-dessous montre quelques exemples de joints dont la conception a été repensée de manière à offrir une puissance d'adhérence maximale. Les clients aux besoins complexes, notamment les fabricants automobiles et les fabricants d'équipement lourd, utiliseront des techniques de modélisation informatique pour évaluer la contrainte exercée sur les joints dans diverses conceptions, de manière à optimiser la conception finale.

### Conception originale



### Conception repensée

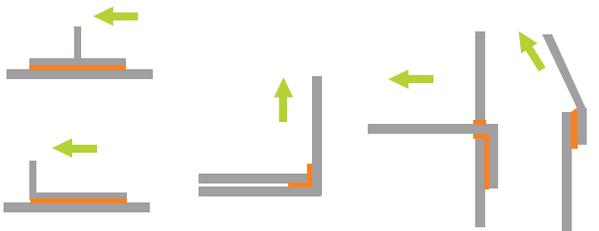


Figure 2. Quelques exemples de joints dont la conception a été repensée de manière à ce que la liaison adhésive se situe dans les contextes privilégiés.

## Préparation des surfaces

Les pièces à lier doivent également être propres. S'il y a une couche de matériau faiblement lié sur une surface (qu'il s'agisse d'oxydation, de rouille, d'huile ou de saleté), l'adhésif ne pourra pas, en général, atteindre la pièce de métal, ce qui entraînera une défaillance de la liaison. Les adhésifs peuvent adhérer suffisamment à certaines surfaces (notamment la calamine qui se forme sur l'acier) pour faire décoller complètement cette surface du métal qui se trouve en dessous. Par conséquent, les contaminants ou les couches de matériau faiblement lié doivent être enlevés avant la liaison, généralement à l'aide de dégraissants à base de solvant et d'un abrasif de manière éliminer l'oxydation.

## Considérations relatives au traitement

Les méthodes de production doivent également être prises en compte dans le choix final d'un adhésif structural. Il y a trois paramètres critiques de l'adhésif qui doivent être pris en considération : la durée d'application (ou temps entre le mélange de l'adhésif et la fermeture du joint), la résistance à vert ou la prise complète (temps requis pour que l'adhésif se gélifie dans un état d'autofixation permettant de procéder à d'autres traitements) et le temps de durcissement final (temps au bout duquel l'adhésif a atteint un durcissement essentiellement final). Ces durées varient en fonction de la composition chimique et la formulation précise de l'adhésif, ainsi qu'en fonction de la température ambiante ou de la température d'application. Bien que le processus d'application réel des adhésifs structuraux soit assez rapide par rapport au soudage, l'adhésif structural aura besoin d'une période de fixation pour qu'une résistance suffisante se développe, permettant ainsi au joint adhésif de résister à d'autres contraintes pendant le traitement des pièces en aval. Cette durée peut être aussi courte que 15 minutes à température ambiante ou elle peut prendre plusieurs heures. La durée peut être raccourcie en appliquant de la chaleur (des lampes à induction ou des lampes chauffantes, des pistolets ou des couvertures pour les grandes pièces, ou encore des fours pour les petites pièces). Elle peut également être contrôlée grâce à la composition chimique de manière à obtenir un temps de manipulation précis. De plus, lorsqu'un adhésif à deux composants est mélangé, il commence à durcir ou à « gélifier ». Il existe donc une durée limitée entre le mélange de l'adhésif et le moment où les deux surfaces à lier doivent être assemblées. Si l'adhésif est dans un état mélangé trop longtemps avant l'assemblage des surfaces à lier, l'adhésif « n'imprégnera » pas la surface en raison d'une gélification excessive; il ne pourra donc pas entrer directement en contact avec la surface, ce qui diminuera considérablement la force d'adhérence finale.

Enfin, les adhésifs à deux composants durcissent par réaction chimique, et non par séchage (comme pour les adhésifs de contact) ou par refroidissement (comme pour les adhésifs thermofusibles). Les réactions chimiques se produisent plus vite à des températures élevées qu'à des températures basses. Ainsi, la température de l'usine de production et des substrats à lier doit être prise en compte lors de la conception du processus de production. Si les températures varient considérablement (par exemple, variations entre l'hiver et l'été), il se peut que le processus de production ou que l'adhésif utilisé doive être modifié.

## Essai des joints et contextes de défaillance

La conception et la production sont validées par l'application statistique de méthodes d'essai destructif conçues pour reproduire les forces primaires exercées sur les joints réels. De telles méthodes d'essai sont peu coûteuses et peuvent être utilisées dans diverses conditions environnementales. Elles peuvent inclure le cisaillement de l'assemblage en chevauchement, les chocs, le pelage et de nombreuses autres méthodes propres à l'application.

L'essai de conception le plus commun est l'essai de cisaillement de l'assemblage en chevauchement en tenant compte des substrats, de la préparation des surfaces et des méthodes de liaison. La méthode D1002 de l'ASTM peut, en général, être facilement personnalisée pour générer des données d'essai permettant de valider une conception proposée. (En raison de la résistance élevée des liaisons sur les substrats métalliques très résistants, les essais de résistance à la traction à plat peuvent être plus complexes et coûteux à concevoir et sont souvent remplacés par des essais de cisaillement de l'assemblage en chevauchement, à moins qu'une faible charge de rupture ne soit anticipée en fonction de la résistance interne d'un substrat [p. ex., un substrat en plastique ou un substrat stratifié]). L'essai de cisaillement de l'assemblage en chevauchement est probablement le moyen le plus commun d'évaluer l'adhérence de divers produits à une variété de substrats. Il est également possible d'effectuer des essais de résistance des attaches mécaniques et des soudures, qui peuvent être préparés en créant un chevauchement suffisant entre les plaques métalliques pour qu'on puisse y placer les attaches. Des résultats comparatifs peuvent être obtenus en utilisant des méthodes standards et peuvent démontrer la force de rupture des époxydes renforcés par rapport aux époxydes rigides, ainsi que par rapport aux méthodes de fixation mécanique et aux soudures (voir la figure 3).

### Résistance au cisaillement de l'assemblage en chevauchement de l'aluminium 6061-T6

Valeurs en lb/po<sup>2</sup>

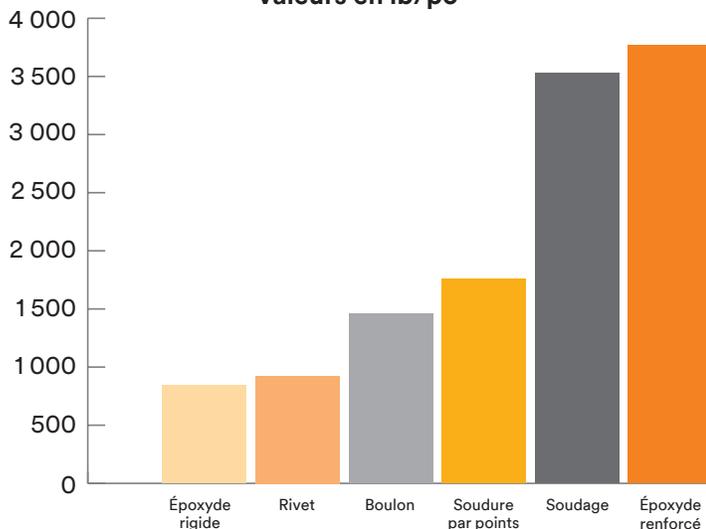


Figure 3. Les résines d'époxyde renforcé peuvent atteindre ou dépasser la force de rupture par cisaillement finale des méthodes de liaison traditionnelles.

Cependant, ce que les essais de cisaillement de l'assemblage en chevauchement standard n'indiquent pas, c'est la résistance aux chocs des différentes conceptions. D'autres méthodes d'essai peuvent être élaborées pour vérifier la résistance aux chocs et à la fatigue. Bien que certaines soient assez sophistiquées et demandent beaucoup de temps (p. ex., la méthode D3166 de l'ASTM), un simple essai peut souvent fournir une comparaison frappante. Par exemple, une simple machine d'essai aux chocs de pendule peut illustrer la capacité relative de différentes méthodes de liaison à absorber la force des chocs (voir la figure 4).

L'essai de résistance au pelage constitue une autre méthode courante utilisée pour les substrats souples. Il existe différents types d'essais de résistance au pelage, notamment la méthode d'essai D3167 de l'ASTM de résistance au pelage du rouleau flottant et la méthode d'essai D1876 de l'ASTM de résistance au pelage en T.



Figure 4. Liaison de l'époxyde renforcé par rapport à la liaison d'une soudure par points, aluminium T6061, d'essai aux chocs de pendule (poids de 1,36 kg [3 lb] sur un bras articulé de 50,8 cm [20 po]) [Youtube.com/watch?v=CPR28olqf5Y](https://www.youtube.com/watch?v=CPR28olqf5Y)

Lorsque des substrats sont liés avec des adhésifs, l'adhésif peut être appliqué pour couvrir l'ensemble du joint, ce qui permet d'éliminer toute concentration de force (comme cela se produit lorsque des rivets ou des boulons sont utilisés le long d'un joint). La propagation de la contrainte le long du joint peut réduire la distorsion du métal soumis à une contrainte et améliorer la force de rupture finale. Si un joint est soumis à une contrainte de façon répétée, la diffusion de la contrainte sur toute la longueur du joint peut offrir une meilleure résistance à la fatigue et prolonger la longévité de la pièce. Cet effet peut être démontré à l'aide d'une machine d'essai de résistance à la traction servant à comparer les joints liés avec un adhésif à ceux liés avec des attaches mécaniques (voir la figure 5). Un autre avantage indirectement démontré ici est que les feuilles d'acier plus minces peuvent être liées sans distorsion du métal (distorsion causée par la concentration des contraintes qui se produit avec les rivets, les boulons et les soudures par points). L'adhésif permettra à la contrainte d'être répartie uniformément sur une plus grande surface de métal plus mince. Un métal plus mince peut ainsi être utilisé pour réduire le poids sans sacrifier la résistance ou la résistance à la fatigue.



Figure 5. Défaillance de l'aluminium T6061 de 1,6 mm (0,063 po) d'épaisseur et des rivets lors de l'application de la force de traction par rapport à l'aluminium lié avec un adhésif.

Pratiquer une soudure tout le long d'un joint augmentera la résistance; cependant, le soudage peut avoir d'autres effets indésirables (notamment des coûts de main-d'œuvre et d'énergie élevés, ainsi qu'une distorsion / un affaiblissement du métal causé par la chaleur du soudage). Le soudage et les attaches mécaniques peuvent également nécessiter plus de finition pour répondre aux exigences esthétiques de la pièce finie. Les essais indiquent que la force de rupture exceptionnelle des adhésifs structuraux hauts de gamme peut même correspondre à celle du soudage en continu complet, sans la distorsion ou l'affaiblissement attribuable à la chaleur. Dans l'essai illustré à la figure 3 ci-dessus, la pièce échantillon soudée s'est brisée au bord de la soudure, vraisemblablement en raison de l'affaiblissement thermique de l'aluminium dans cette zone. La comparaison avec une pièce d'aluminium non soudée indique que le métal affaibli a perdu plus de 40 % de sa résistance à la traction.

Une comparaison plus poussée de la résistance spécifique du joint lié montre l'avantage des adhésifs non seulement sur le plan de la résistance, mais aussi sur le plan de la réduction du poids.

	Époxyde rigide	Rivet	Boulon	Soudure par points	Soudage	Époxyde renforcé
Résistance du joint	840	920	1 457	1 700	3 500	3 768
Poids relatif (approximatif)	1,03	1,05	2,02	1,00	1,06	1,03
Résistance spécifique (résistance / poids relatif)	816	880	721	1 761	3 327	3 658

## Résumé

Comme discuté ci-dessus, diverses motivations poussent de nombreuses entreprises, qui autrefois comptaient sur des méthodes de liaison standards telles que le soudage, le brasage, le rivetage et le boulonnage, à envisager l'utilisation d'adhésifs structuraux renforcés à rendement élevé. De tels adhésifs peuvent offrir des avantages significatifs en matière de réduction globale des coûts et du poids, ainsi que la possibilité de lier des substrats différents et de créer des joints dotés d'une bonne répartition des contraintes et d'une bonne résistance concomitante à la fatigue et à la traction. Les adhésifs renforcés peuvent également améliorer l'esthétique et éliminer les coûts élevés de main-d'œuvre liés à la finition, notamment le ponçage du laitier attribuable au soudage par points. Choisir le bon adhésif est primordial et les ingénieurs devraient travailler en étroite collaboration avec leur fournisseur de matériaux pour sélectionner le bon produit. De plus, certaines conceptions de joint repensées et certains ajustements sur le plan du traitement de la production peuvent grandement nuire au succès final du projet. Cependant, comme on peut le démontrer de façon empirique, les adhésifs structuraux peuvent, lorsqu'ils sont utilisés correctement, atteindre ou dépasser le rendement des méthodes de liaison traditionnelles telles que la soudure, le rivetage et le boulonnage.

**Renseignements techniques :** Les renseignements techniques, les recommandations et les autres énoncés fournis aux présentes sont basés sur des essais et des expériences que 3M juge dignes de confiance, mais dont l'exactitude et l'exhaustivité ne sont pas garanties.

**Utilisation du produit :** De nombreux facteurs indépendants de la volonté de 3M peuvent affecter l'utilisation et le rendement d'un produit 3M dans le cadre d'une application donnée. Comme l'utilisateur est parfois seul à connaître ces facteurs et à y exercer un quelconque pouvoir, il incombe à l'utilisateur d'établir si le produit 3M convient à l'usage auquel il le destine et à la méthode d'application prévue.

**Garantie, limite de recours et dénegation de responsabilité :** À moins qu'une garantie additionnelle ne soit spécifiquement énoncée sur l'emballage ou la documentation applicables du produit 3M, 3M garantit que chaque produit 3M est conforme aux spécifications applicables au moment de son expédition. 3M N'OFFRE AUCUNE AUTRE GARANTIE OU CONDITION EXPLICITE OU IMPLICITE, Y COMPRIS, MAIS SANS S'Y LIMITER, TOUTE GARANTIE OU CONDITION IMPLICITE DE QUALITÉ MARCHANDE OU D'ADAPTATION À UN USAGE PARTICULIER, OU TOUTE GARANTIE OU CONDITION IMPLICITE DÉCOULANT DE LA CONDUITE DES AFFAIRES, DES PRATIQUES COURANTES ET DES USAGES DU COMMERCE. Si le produit 3M n'est pas conforme à cette garantie, le seul et unique recours est, au gré de 3M, d'obtenir le remplacement du produit 3M ou le remboursement de son prix d'achat.

**Limitation de la responsabilité :** Sauf si la loi l'interdit, 3M ne saurait être tenue responsable des pertes ou dommages directs, indirects, spéciaux, fortuits ou conséquents découlant de l'utilisation de ce produit, quelle que soit la théorie juridique dont on se prévaut, y compris celles de responsabilité contractuelle, de violation de garantie, de négligence ou de responsabilité stricte.

