

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Adhésion et Adhérence des Matériaux

Maëlen AUFRAY

Cours niveau ingénieur

2023

# Sommaire

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- 1 Définitions
- 2 Les théories de l'adhésion
- 3 Les tests d'adhérence
- 4 Classes d'adhésifs
- 5 Réalisation de collages
- 6 Bibliographie

## Contact

- Laboratoire CIRIMAT,  
Équipe Surface : réactivité, protection (SURF)
- Bureau 2-r1-4
- E-mail : [maelenn.aufray@ensiacet.fr](mailto:maelenn.aufray@ensiacet.fr)
- Site web : [http ://maelenn.aufray.free.fr](http://maelenn.aufray.free.fr)

# Sommaire

## Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- 1 Définitions
- 2 Les théories de l'adhésion
- 3 Les tests d'adhérence
- 4 Classes d'adhésifs
- 5 Réalisation de collages
- 6 Bibliographie

# Définitions

## Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## Adhésion

Ensemble des phénomènes physico-chimiques qui se produit lorsque l'on met en contact intime deux matériaux. Les différentes théories de l'adhésion prévoient l'établissement de liaisons ou d'interactions spécifiques.

## Adhérence

Force ou énergie nécessaire pour séparer deux matériaux réunis par une surface commune.

# Adhésion

## Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

Adhésion = terme utilisé dans de multiples domaines

⇒ chaque domaine = une théorie

⇒  $\exists$  plusieurs modèles complémentaires  
(et parfois contradictoires)

⇒ Étude des différents modèles dans le cas  
d'un substrat recouvert d'un revêtement quelconque

# Sommaire

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- 1 Définitions
- 2 Les théories de l'adhésion**
- 3 Les tests d'adhérence
- 4 Classes d'adhésifs
- 5 Réalisation de collages
- 6 Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie mécanique*

Théorie de l'ancrage mécanique : Mac Bain, 1926  
(+ ancienne des théories de l'adhésion)

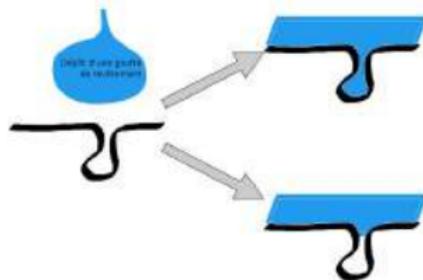
Origine de l'adhésion = ancrage physique du revêtement dans les aspérités présentes à la surface du substrat

⇒ accrochage mécanique entre les deux surfaces

⇒ mécanisme applicable uniquement quand il existe  
un contact intime entre les deux matériaux

+ rugosité importante du substrat

+ revêtement mouille parfaitement la surface du substrat



Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

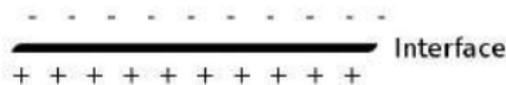
## *La théorie électrique*

La théorie électrique : Deryagin, 1948

A la surface de couches d'oxydes à caractère ionique,  
∃ hétérogénéités chimiques + défauts de surface

⇒ Formation de charges électrostatiques

⇒ Système revêtement/substrat = condensateur plan



*Modèle du condensateur plan*



**B. V. Deryagin, V. P. Smilga**

*Adhesion fundamentals and practice*

Elsevier, 1970, pp.152-163

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie électrique*

Tribo-électricité (électricité statique produite par frottement)  
de quelques matériaux modèles

---

### Positive

Verre  
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)  
Polyamide (PA)  
Chlorure de sodium (NaCl)  
Laine  
Soie  
Coton  
Élastomères de polyuréthane (PU)  
Polystyrène (PS)  
Polymère époxyde  
Polyéthylène (PE)  
Polychlorure de vinyle (PVC)  
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)

---

### Négative



J. Henniker, Nature 196 (1962), p. 474

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie de la diffusion*

### La théorie de la diffusion : Voyuskii (1971)

- ⇒ L'adhésion résulte de l'interdiffusion des molécules ou des chaînes d'un des prépolymères dans l'autre
- ⇒ Pas d'interface entre les deux matériaux ⇒ interphase
- ⇒ Adhésion contrôlée par les phénomènes de diffusion
- ⇒ S'applique aux matériaux polymères compatibles (c.a.d. lorsque au moins un monomère est soluble dans l'autre)



S. S. Voyuskii, *Rubber. Chem. Technol.* 30 (1971) pp. 449-455

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie de la diffusion*

- Processus thermiquement activé
- Dépendant du temps
- Dépendant de la pression d'assemblage
- Régi par les lois de Fick



Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

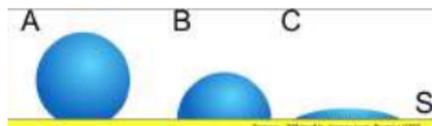
# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

La théorie thermodynamique : Sharpe et Schonhorn (1970)  
= Théorie du mouillage

⇒ Adhésion attribuée aux forces intermoléculaires (liaisons chimiques de type Van der Waals)

Rq : Ces liaisons intermoléculaires sont faibles et non dirigées ⇒ Bon contact entre les deux surfaces nécessaire !



H. Schonhorn

*Adhesion fundamentals and practice*

Elsevier, 1970, pp.12-20

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

### Différents types de liaisons et caractéristiques

type de liaison	nom des liaisons	descriptif de la liaison	énergie ( $kJ.mol^{-1}$ )	distance d'interaction
Inter-atomiques	métallique	Mise en commun de tous les $e^-$ de valence	110 à 350	0,1 à 0,3 nm
	covalente	2 $e^-$ attirent à la fois les 2 noyaux (très directionnelle)	200 à 800	0,1 à 0,2 nm
	ionique	Forces électrostatiques entre ions $<0$ et $>0$ (non directionnelle)	355 à 1050	0,1 à 0,2 nm
Inter-moléculaires (ou de Van der Waals)	liaison hydrogène	Interatomique OU intermoléculaire. Liaison entre un atome électronégatif et un atome d'hydrogène (non seul)	10 à 40	0,25 à 0,5 nm
	Debye	Entre 1 molécule possédant un moment dipolaire permanent et 1 molécule non polaires	$\sim 2$	0,4 à 0,5 nm
	Keesom	Entre 2 molécules possédant un moment dipolaire permanent	4 à 21	$\sim 0,3$ nm
	London	Entre molécules ne possédant pas de dipôle permanent	4 à 42	0,3 à 0,4 nm

# Les théories de l'adhésion

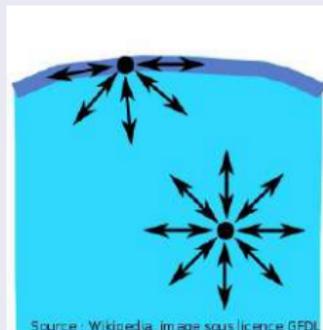
## *La théorie thermodynamique*

### Énergie de surface

Énergie nécessaire pour rompre les interactions interatomiques et/ou intermoléculaires

N.B. Les énergies de liaison sont  $< 0$

⇒ Les atomes de surface ont moins de voisins que les atomes dans le volume (possèdent une énergie supérieure)



Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

digression sur les notions de surface, énergie de surface et tension de surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Notion de surface, interface

Dans le langage usuel, la surface d'un matériau est sa frontière avec l'atmosphère ou tout milieu gazeux ou liquide. C'est la partie visible du matériau.

N.B. En science des matériaux, la surface a une définition plus générale : c'est la frontière entre deux milieux homogènes. Une surface a une certaine épaisseur, qui correspond à un gradient de propriétés. Pour un polymère, suivant les propriétés envisagées, l'épaisseur peut varier, du nanomètre pour la couche contaminée à la dizaine de micromètres pour la morphologie cristalline.

# Les théories de l'adhésion

digression sur les notions de surface, énergie de surface et tension de surface

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## énergie de surface

Les propriétés de surface diffèrent de celles du volume. Cela est dû à la force thermodynamique qui conduit à ce que l'énergie de surface soit la plus faible possible. La région de surface est sujette aux forces intermoléculaires provenant seulement de dessous la surface. Cette inégalité d'interactions avec l'environnement moléculaire voisin conduit au concept d'énergie de surface  $\gamma$ . Cette dernière est définie comme le travail dépensé pour créer une surface unitaire.

# Les théories de l'adhésion

digression sur les notions de surface, énergie de surface et tension de surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## tension de surface

La tension de surface  $\sigma$  est reliée au changement de l'énergie libre d'Helmholtz  $dF^\sigma$  associé à une augmentation unitaire d'aire  $d\Omega$ . La relation entre  $\gamma$  et  $\sigma$  est établie comme suit : l'énergie pour augmenter l'aire d'un solide isotrope de  $d\Omega$  est  $\gamma d\Omega$  et le travail requis doit être égal à l'accroissement de la surface totale  $\Omega$  multipliée par  $\sigma$  :

$$\gamma d\Omega = dF^\sigma = d(\Omega\sigma)$$

$$\text{où } \gamma = \frac{d(\Omega\sigma)}{d\Omega}$$

$$\text{soit } \gamma = \sigma + \Omega \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

# Les théories de l'adhésion

digression sur les notions de surface, énergie de surface et tension de surface

## Cas des liquides

Chaque extension de la surface devra correspondre à un flux moléculaire des régions de volume sous-jacentes vers la surface, et cela sans changement de composition, ce qui entraîne que :

$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 0$  Ainsi, l'énergie de surface  $\gamma$  est égale à la tension de surface  $\sigma$ .

## Cas des solides

La surface est déformée par extension, causant un changement dans la densité de surface (et l'orientation), donc  $(\frac{d\sigma}{d\Omega})$  est différent de zéro. En général pour un solide, l'énergie de surface n'est pas égale à la tension. Cet aspect est particulièrement important, car souvent la différence est négligée dans la littérature.

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

digression sur les notions de surface, énergie de surface et tension de surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## équilibre thermodynamique

Créer une interface entre deux phases coûte de l'énergie : s'il s'agit d'une phase condensée et d'une phase gazeuse les molécules de la phase condensée ne satisfont plus aussi bien leurs interactions cohésives avec leurs voisines en surface qu'en volume. S'il s'agit de deux phases condensées A et B, il en est de même, car en général les interactions de paires AB sont moins favorables que les interactions AA ou BB.

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

### Illustrations de la tension superficielle des liquides

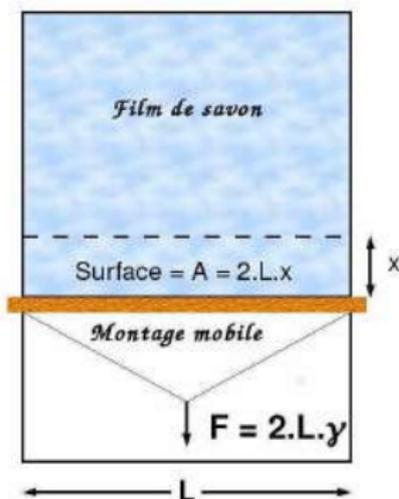


Liquides : tension superficielle  $\equiv$  énergie libre par unité de surface

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

### Énergie de surface et tension superficielle des liquides



N.B. Le facteur 2 tient compte des 2 faces du film de savon

Tension superficielle = force par unité de longueur ( $\sigma$  en  $J.m^{-2}$ )

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

### Tension superficielle de quelques liquides

Matériau	Température [°C]	$\gamma_1$ [ $mJ.m^{-2}$ ]
Au	1040	1000
Hg	20	484
PbO	900	132
Verres	1000	225-290
TiO <sub>2</sub>	1500	500
FeO	1420	585
Cr <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1500	570
SiO <sub>2</sub>	1800	307
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2080	700

Matériau	Température [°C]	$\gamma_1$ [ $mJ.m^{-2}$ ]
SiC	1500	2030
Éthanol	20	21,4
Décane	20	24
Acétone	20	24
Éthylèneglycol	20	47,9
Diiodométhane	20	50,8
Formamide	20	58,3
Glycérine	20	64
H <sub>2</sub> O	20	72,8



A. Adamson

*Physical chemistry of surfaces, 5<sup>e</sup> edition*

Wiley, 1990

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### énergie de surface des liquides

$$\gamma_L = \gamma_L^D + \gamma_L^{nD}$$

$\gamma_L^D$  : énergies de surface Dispersives

⇒ Liaison type London entre 2 molécules non-polaires

$\gamma_L^{nD}$  : énergies de surface non-Dispersives (cad polaires)

⇒ Liaison H, dipolaires (Debye, Keesom), acido-basique

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Tension superficielle de quelques liquides [ $mJ.m^{-2}$ ]

Liquide	$\gamma_1$	$\gamma_1^D$	$\gamma_1^{nD}$
H <sub>2</sub> O	72,8	21,8	51
Glycérine	63,8	37±4	30
Formamide	58,3	39,5±7	26
Éthylèneglycol	48,3	29,3	19
Octane	21,8	21,8	0
Hexane	18,4	18,4	0

N.B. Les mesures devraient être effectuées à température constante (pas le cas de l'éthylèneglycol)

⇒  $\gamma_1$  ↘ lorsque T et P ↗



Jacques Cognard  
*Science et technologie du collage*

Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000, 322p.

# Les théories de l'adhésion

## La théorie thermodynamique

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

### Méthode de mesure de la tension superficielle des liquides - Capillaire

$$\gamma_L = \frac{r \cdot \rho \cdot h \cdot g}{2 \cos \theta} \text{ en } [N \cdot m^{-1}]$$

avec  $r$  = rayon du capillaire [m]

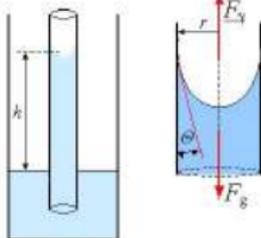
$\rho$  = masse volumique du liquide [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

N.B. on considère  $\rho_{air} \ll \rho_{liq}$

$h$  = hauteur du liquide [m]

$g = 9,81 \text{ m} \cdot s^{-2}$  (accélération de la pesanteur)

$\theta$  = angle de contact entre liquide et capillaire [ $^\circ$ ]



N.B. La loi de Jurin donne la hauteur à laquelle un liquide monte dans un tube capillaire

# Les théories de l'adhésion

Loi de Jurin

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Démonstration de la loi de Jurin

Il faut faire un bilan de FORCES ...

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

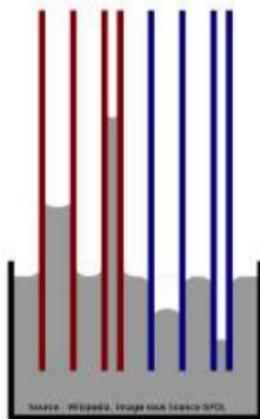
Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Petite digression sur les ménisques



Ménisque : surface courbe d'un liquide apparaissant en réponse à la surface du contenant

Ménisque convexe ( $\theta > 90^\circ$ )

⇒ force de cohésion > force d'adhésion

Ménisque concave ( $\theta < 90^\circ$ )

⇒ force d'adhésion > force de cohésion

Ex : Capillaires rouges et bleus en verre

⇒ lesquels contiennent du mercure ? de l'eau ?

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

Méthode de mesure de la tension superficielle des liquides -  
Anneau (tensiomètre du Nouy)



$$\gamma_L = \frac{i.F}{4.\pi.R} \text{ en } [N.m^{-1}]$$

avec R = rayon de l'anneau [m]

F = force appliquée pour relever l'anneau [N]

i = facteur de correction lié à la forme de l'anneau



# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

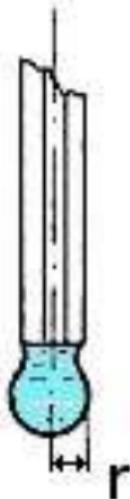
Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

Méthode de mesure de la tension superficielle des liquides -  
Goutte tombante (Tate - 1864)



$$\gamma_L = \frac{m.g}{2.\pi.r.F} \text{ en } [N.m^{-1}]$$

avec m = masse de la goutte [kg]

r = rayon du capillaire [m]

g = 9,81  $m.s^{-2}$  (accélération de la pesanteur)

f = facteur de correction

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

### Équilibre énergétique à l'interface substrat/liquide

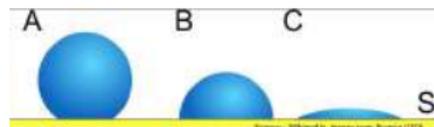
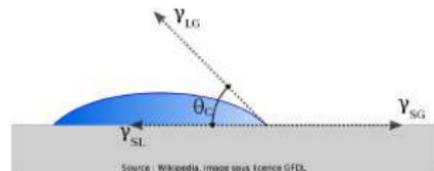
#### Angle de contact

Angle dièdre formé par deux interfaces contiguës à leur intersection apparente

⇒ rend compte de l'aptitude d'un liquide à s'étaler sur une surface par mouillabilité

⇒ mesure de l'angle de la tangente du profil d'une goutte déposée sur le substrat, avec la surface du substrat

⇒ En utilisant  $\neq$  liquides de référence, possibilité de déterminer l'énergie de surface



# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

### Équilibre énergétique à l'interface substrat/liquide

#### Équation de Young (1805)

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cdot \cos \theta_C \text{ et } \gamma_{SG} = \gamma_S - \pi_e$$

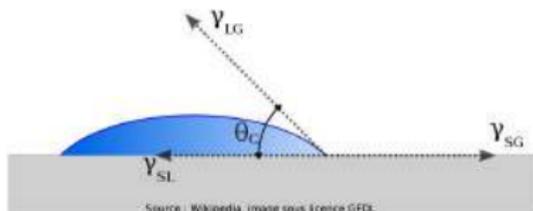
$\gamma_{SG}$  : tension superficielle de (S) en présence de la phase gazeuse (G) saturée  
N.B. si  $\pi_e = 0$ ,  $\gamma_{SG} = \gamma_S$

$\gamma_{SL}$  : tension interfaciale entre (S) et (L)

$\gamma_{LG}$  : tension superficielle de (L) en présence de sa vapeur (G) =  $\gamma_L$

$\pi_e$  : pression d'étalement ( $\searrow$  de  $\gamma_S$  due à la vapeur adsorbée de L)

N.B.  $\pi_e \approx 0$  pour les polymères



# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Équation de Dupré

$$W_{SL} = -\Delta G_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL}$$

$W_{SL}$  : énergie réversible d'adhésion ( $=W_A$ )

En considérant deux phases (S) et (L) en état de contact et en équilibre

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Équation de Dupré-Young

$$W_{SL} = \gamma_L(1 + \cos \theta_C)$$

Toujours avec l'approximation  $\pi_e \approx 0$

(liquide de haute énergie sur solide de basse énergie)

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Équation de Good-Girifalco-Fowkes

$$W_{SL} = W_{SL}^D + W_{SL}^{nD} \implies W_{SL} = 2(\gamma_L^D + \gamma_S^D)^{1/2} + W_{SL}^{nD}$$

$W_{SL}$  : énergie réversible d'adhésion

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

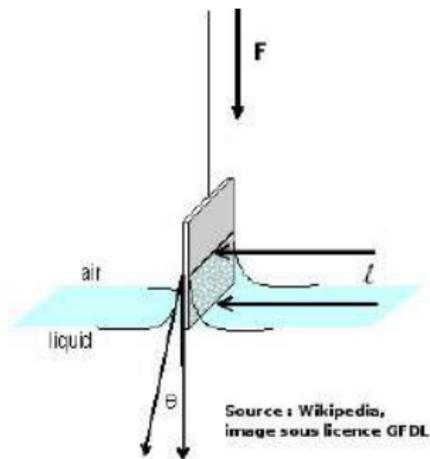
Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Méthode de mesure de la tension superficielle des solides - Lame de Wilhelmy



En pratique, utilisation de Pt  
⇒ caractérisation du liquide !

N.B. Lors de l'utilisation de cette  
technique, présence d'un hystérésis par  
comparaison entre immersion et  
émersion !

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

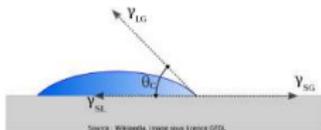
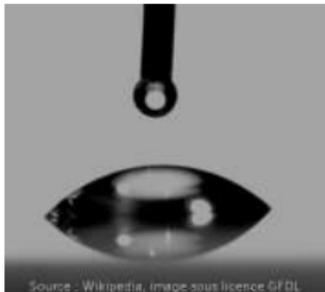
Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

Méthode de mesure de la tension superficielle des solides -  
Goutte sessile (goutte posée)



Rappel : équation de Young-Dupré  
$$W_{SL} = \gamma_L(1 + \cos \theta_C)$$

# Les théories de l'adhésion

digression sur l'équation de Young

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

Lorsqu'on dépose une goutte de liquide sur un substrat solide, que le liquide mouille ou non le solide, la partie mouillée est délimitée par une ligne de contact (L) qui est, vue du dessus, un cercle. Les 3 phases sont en contact sur cette ligne. Chaque interface a une certaine énergie libre par unité d'aire ( $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{SV}$  et  $\gamma_{LV}$ ).

N.B. Ces paramètres décrivent les interfaces loin de la ligne de contact, car au voisinage de cette ligne, il existe une zone de coeur où la structure peut être complexe.

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Cas des polymères

⇒ prise en compte de l'échelle moléculaire

#### Paramètres influençant l'angle de mouillage

- Réorganisation de la surface à l'échelle moléculaire
- Cristallinité de surface
- Rugosité
- Déformation de la surface
- Gonflement, pénétration . . .

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### En pratique ... Approche de Fowkes

$$\gamma_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - 2\sqrt{\gamma_S^D \cdot \gamma_L^D} - I_{SL}^{nD}$$

Si il n'existe pas de composante non-dispersive,  $I_{SL}^{nD} = 0$

⇒ Cas d'un solide dispersif avec liquide quelconque ou liquide dispersif avec solide quelconque

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

En pratique . . . Approche de Owens et Wendt

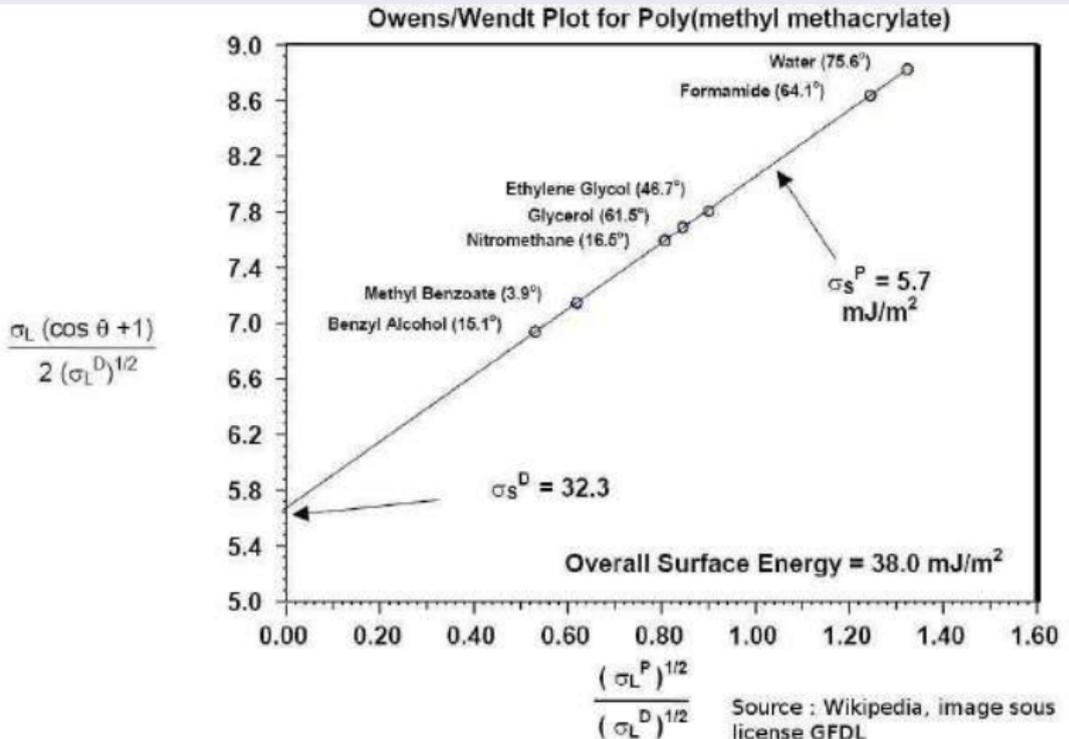
$$W_{SL} = 2\sqrt{\gamma_S^D \cdot \gamma_L^D} + 2\sqrt{\gamma_S^{nD} \cdot \gamma_L^{nD}}$$

→ utilisation de 2 liquides pour obtenir un système de 2 équations à 2 inconnues

# Les théories de l'adhésion

## La théorie thermodynamique

### En pratique ... Approche de Owens et Wendt



Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### En pratique . . . Approche de Neumann

$$\cos \theta = \frac{(0,015 \cdot \gamma_{SG} - 2,00) \sqrt{\gamma_{SG} \cdot \gamma_{LG}} + \gamma_{LG}}{\gamma_{LG} (0,015 \sqrt{\gamma_{SG} \cdot \gamma_{LG}} - 1)}$$

**Attention : domaine de validité restreint !**

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

En pratique . . . Approche de Wu

$$\gamma_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - 4 \frac{\gamma_L^D \cdot \gamma_S^D}{\gamma_L^D + \gamma_S^D} - 4 \frac{\gamma_L^{nD} \cdot \gamma_S^{nD}}{\gamma_L^{nD} + \gamma_S^{nD}}$$

→ utilisation de 2 liquides pour obtenir un système de 2 équations à 2 inconnues

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### En pratique ... Approche de Zisman

$$\cos \theta = 1 + b(\gamma - \gamma_C)$$

$\gamma_C$  : énergie de surface critique de la phase solide  
(calculé par extrapolation pour  $\theta = 0$ )

$b$  : constante empirique

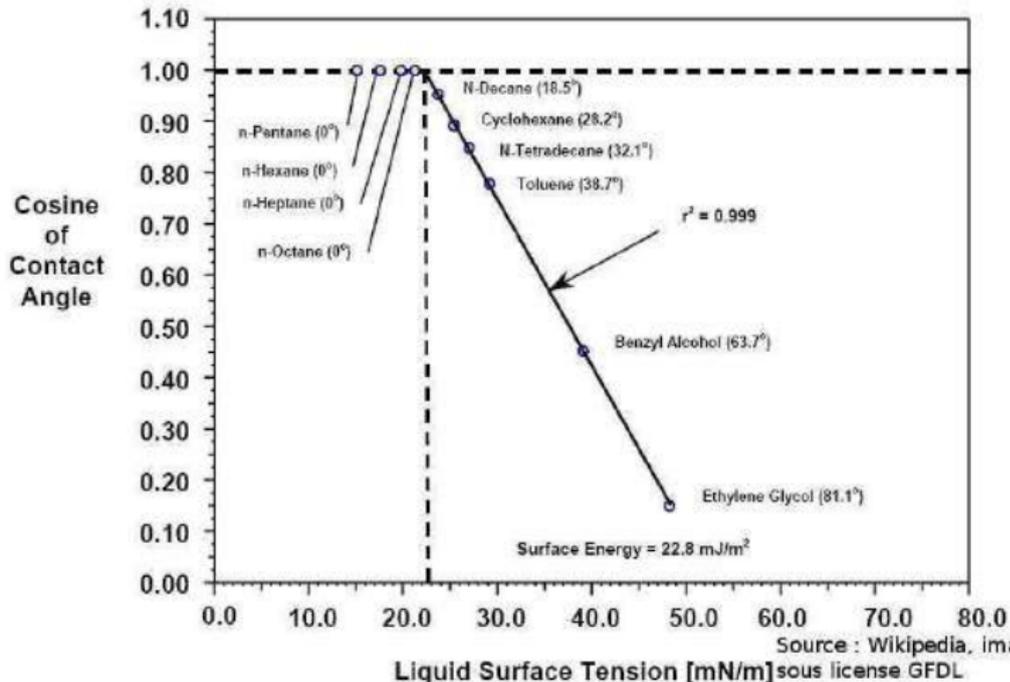
**ATTENTION** : utilisation de liquides non polaires seulement !

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

### En pratique ... Approche de Zisman

Zisman Plot for a Low Density Polyethylene Film



Source : Wikipedia, image

Liquid Surface Tension [mN/m] sous licence GFDL

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie thermodynamique*

### Quelques exemples d'énergies de surface de polymères

Énergie en $mJ.m^{-2}$	$\gamma_S^D$	$\gamma_S^{nD}$	$\gamma_S^{totale}$
Poly-tetrafluoroéthylène (PTFE)	18,9	2,5	21,4
Poly-propylène (PP)	30,1	0	30,1
Poly-éthylène (PE)	33	4,3	33,3
Poly-méthacrylate de méthyl (PMMA)	26	5	37,3
Poly-chlorure de vinyl (PVC)	40,2	10,5	50,7



A. Carré and J. Vial, 1988

J. Chimie Phys.

85, pp. 621-626

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie des couches de faible cohésion*

La théorie des couches de faible cohésion (=weak boundary layers) : Bikerman

⇒ Remarquée lors de l'analyse des zones de rupture des joints collés

⇒ Les forces interfaciales sont toujours plus fortes que la force de cohésion d'une des nombreuses couches composant l'assemblage

⇒ La rupture aura toujours lieu dans la couche dont la force de cohésion est la plus faible

⇒ La composition de cette couche peut varier. Les causes de cette variation sont nombreuses

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

### Contenu de la couche de faible cohésion

- Air : le polymère ne mouille pas assez le substrat
- Substances étrangères : additifs, pollution de surface  
...
- Produits de réaction
- Défauts du substrat : discontinuités morphologiques  
(zones cristallines/amorphes) ...

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

La théorie chimique : Buchan et Rae  $\Rightarrow$  Adhésion basée sur la formation de liaisons chimiques iono-covalentes

$\Rightarrow$  Liaisons sont parmi les plus fortes (jusqu'à  $1000 \text{ kJ.mol}^{-1}$ )  $\gg$  liaisons type Van der Waals

Distance d'interaction entre atomes (0,15 à 0,24 nm)  $\Leftrightarrow$  bon mouillage

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

Cas des interactions acide/base = Cas particulier de la théorie chimique

∃ plusieurs définitions

### Brönsted

- Acide = donneur de proton
- Base = capteur de proton

ex :  $\text{R-NH}_3$  = base de Brönsted

### Lewis (notion + large)

- Acide = accepteur de doublet d' $e^-$
- Base = donneur de doublet d' $e^-$

ex :  $\text{AlCl}_3$  = acide de Lewis

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

### Échelle de Drago

$$-\Delta H_{AB} = E_A \cdot E_B + C_A \cdot C_B$$

$\Delta H_{AB}$  : énergie de réaction entre base et acide organiques en solution dans un solvant neutre

C : coef. exprimant la tendance à former 1 liaison covalente [ $\sqrt{kJ \cdot mol^{-1}}$ ]

E : coef. exprimant la tendance à former 1 liaison électrostatique [ $\sqrt{kJ \cdot mol^{-1}}$ ]

$$\Rightarrow \text{Fowkes} : W_{AB} = -f \cdot n \cdot \Delta H_{AB}$$

avec f=facteur de conversion d'enthalpie en énergie libre de surface

n=nombre de groupes fonctionnels acide ou basique par unité de surface



R. S. Drago, L. B. Parr, C. S. Chamberlain, 1977

Journal of the American Chemical Society

99(10), pp.3203-3209

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

### Échelle de Gutmann

$$\Delta H_{AB} = \frac{AN_1 \cdot DN_2 + AN_2 \cdot DN_1}{100}$$

$\Delta H_{AB}$  : énergie de liaison

DN : Nombre donneur d'électrons

AN : Nombre accepteur d'électron



V. Gutmann, 1978

The donor-acceptor approach to molecular interactions

Plenum press, New York and London, 145p.

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

### Cas des oxydes-caractère acido-basique d'une surface

- $I_s$  (point isoélectrique) =  $IEPS$  (Iso Electric Point for the Surface)
- $PCN$  (Point de Charge Nulle) =  $PZC$  (Point of Zero Charge)
- $\Rightarrow$  pH de la solution aqueuse dans laquelle le solide existe sous un potentiel électrique neutre



J. Bolger

Acid-base interaction between oxide surfaces and polar organic compounds

in Adhesion aspect of organic coatings, K.L. Mittal (ed), Plenum Press, 1983, pp. 3-18

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Approche de Bolger

Bolger a classé les interactions acide-base en définissant un paramètre  $\Delta$  :

$$\Delta_A = I_s - pK_a(A)$$

$$\Delta_B = pK_a(B) - I_s$$

$\Delta_A$  ou  $\Delta_B > 0 \Rightarrow$  Interactions ioniques

$\Delta_A$  ou  $\Delta_B \ll 0 \Rightarrow$  Interactions faibles (forces de dispersion)

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

Oxyde/Hydroxyde d'aluminium

PZC

$\text{Al}_2\text{O}_3$  amorphe

7,5-8,0

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

6,6-9,2

$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

7,4-8,6

$\alpha\text{-AlOOH}$

5,0-9,1

$\gamma\text{-AlOOH}$

6,5-8,8

$\text{Al}(\text{OH})_3$

5,4-9,3

Surface	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$
Is	2	8	12



G. A. Parks

The Iso-Electric points of solid oxides, solid hydroxides and aqueous hydroxo complex systems

Chem. reviews, 65(2), 1965, pp.177-198

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Cas des oxydes - exemple

- IEPS du CuO = 9,5
- PI (poly-imide) acide

⇒ PI adhère à la surface de cuivre !

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie chimique*

### Classification des polymères par leurs propriétés acido-basiques

Neutre	Acide	Basique	Amphotère
PE	PVDF	PS	Poly-carbonates
PP	PI	POM	PVC
PTFE	PVC chlorés	PMMA	PU
		Poly-esters	Poly-époxydes



Jacques Cognard

*Science et technologie du collage*

Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000, 322p.

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie rhéologique*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

La théorie rhéologique prend en compte les phénomènes de dissipation d'énergie au cours des tests mécaniques (par exemple le test de pelage), et donc déformations viscoélastiques ou plastiques dissipatives. Cette théorie va ainsi essayer de les quantifier afin de pouvoir revenir à l'énergie d'adhésion. Elle s'applique plutôt dans le cas des élastomères et a été initiée par A. N. Gent, R. P. Petrich, et J. Schultz au début des années 1970.

# Les théories de l'adhésion

## *La théorie de la dissipation moléculaire*

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

La théorie de la dissipation moléculaire considère la dissipation d'énergie dans la force nécessaire à la rupture d'un assemblage. En effet, il a été démontré que l'énergie mesurée augmente avec la masse moléculaire entre les noeuds de réticulation d'un réseau polymérique. Cet effet va à l'encontre de la théorie rhéologique, lorsque la vitesse de sollicitation est quasi-nulle (effet entropique). Cet effet est attribué à une variation d'entropie liée à l'orientation de chaînes au cours de la séparation des substrats. Cette théorie a été initiée par G.J. Lake et A.G. Thomas en 1967.

# Sommaire

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

**Les tests  
d'adhérence**

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- 1 Définitions
- 2 Les théories de l'adhésion
- 3 Les tests d'adhérence**
- 4 Classes d'adhésifs
- 5 Réalisation de collages
- 6 Bibliographie

# Définitions

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

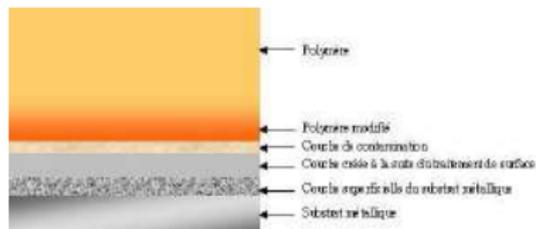
Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

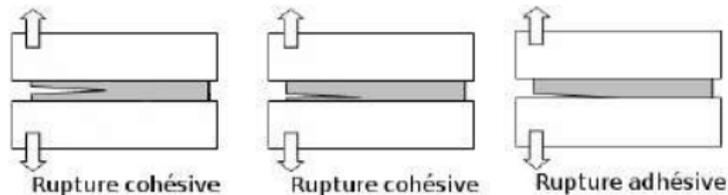
Bibliographie

## Interface / Interphase

Une interface est une surface séparant deux milieux (2 matériaux) dont les propriétés physiques ou chimiques changent brusquement. Une interphase est une interface d'épaisseur non nulle (éventuellement avec gradient de propriétés)



# Définitions



Source : Wikipedia, image sous licence GFDL

## Rupture adhésive

Rupture à l'interface substrat/revêtement.

## Rupture cohésive

Rupture dans un des matériaux et non à l'interface.

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

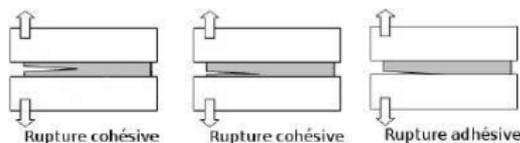
Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Définitions



Source : Wikipedia, image sous licence GFDL

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

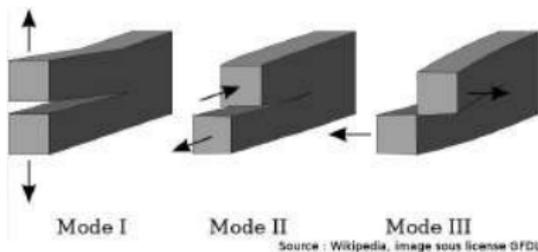
## Étude du faciès de rupture

C'est l'étude des deux surfaces présentes après la rupture : cette étude permet entre autre de déterminer si la rupture est adhésive ou cohésive et donc si le test effectué était vraiment un test d'adhérence !

## Initiation / Propagation

À savoir absolument identifier lors des tests d'adhérence, en comparant les données expérimentales (courbes/valeurs mesurées) au faciès de rupture.

# Les tests d'adhérence



## Les différents modes de rupture

- Clivage (I)
- Cisaillement longitudinal (II)
- Cisaillement transversal (III)

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Les tests d'adhérence

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

∃ Nombreux tests d'adhérence

⇒ Liste suivante non exhaustive !



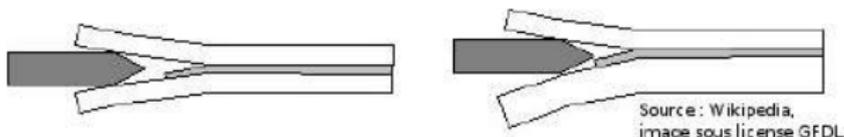
[S. Benayoun et J.-J. Hantzpergue](#)

Les tests d'adhérence appliqués aux revêtements minces : une  
synthèse bibliographique

[Matériaux et Techniques, vol.92\(10-12\), 2004, pp. 23-31](#)

# Les tests d'adhérence - Clivage

Double levier symétrique et asymétrique à déplacement constant



**Clivage en coin = double levier à déplacement constant**

Essai simple, peu coûteux

Essai à déplacement constant

∃ normes (essai symétrique) :

ASTM D 3762-79/83, AFNOR T 76-114, ISO 15107:1998, ISO 10354-1992

Définitions

Les théories de l'adhésion

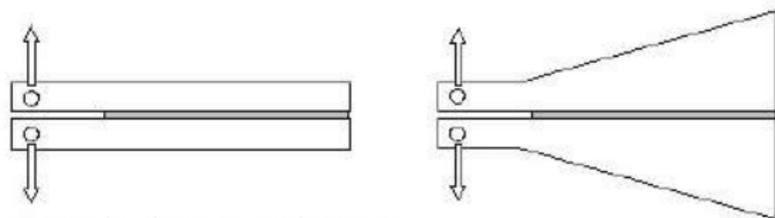
Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les tests d'adhérence - Clivage

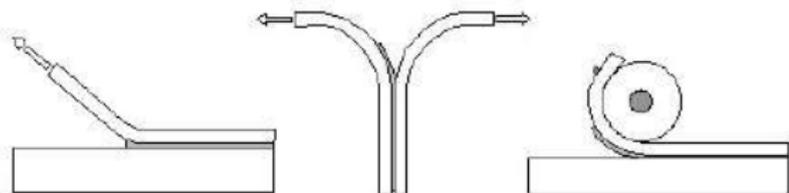


Source : Wikipedia, image sous license GFDL

**Double levier (TDCB = Tapered double cantilever beam)**

- ≡ différentes géométries
- ≡ norme ASTM

# Les tests d'adhérence - Pelage



Source : Wikipedia, image sous license GFDL

## L'énergie de pelage dépend :

- de l'angle de pelage
  - de la vitesse de pelage
- ∃ norme ISO 8510-1990 (pelage en L)  
norme ISO 11339-1993 (pelage en T)  
norme ISO 4578-1997 (dispositif à galets)

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les tests d'adhérence - Pelage

Définitions

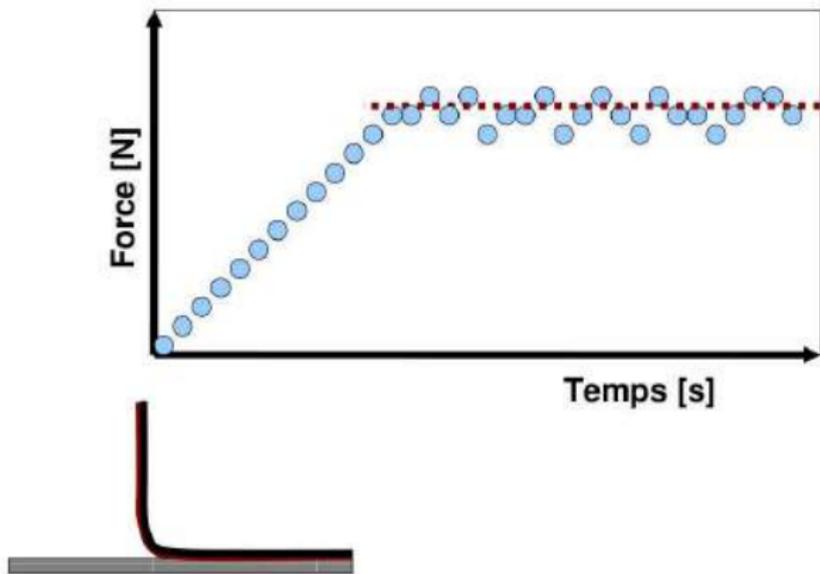
Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

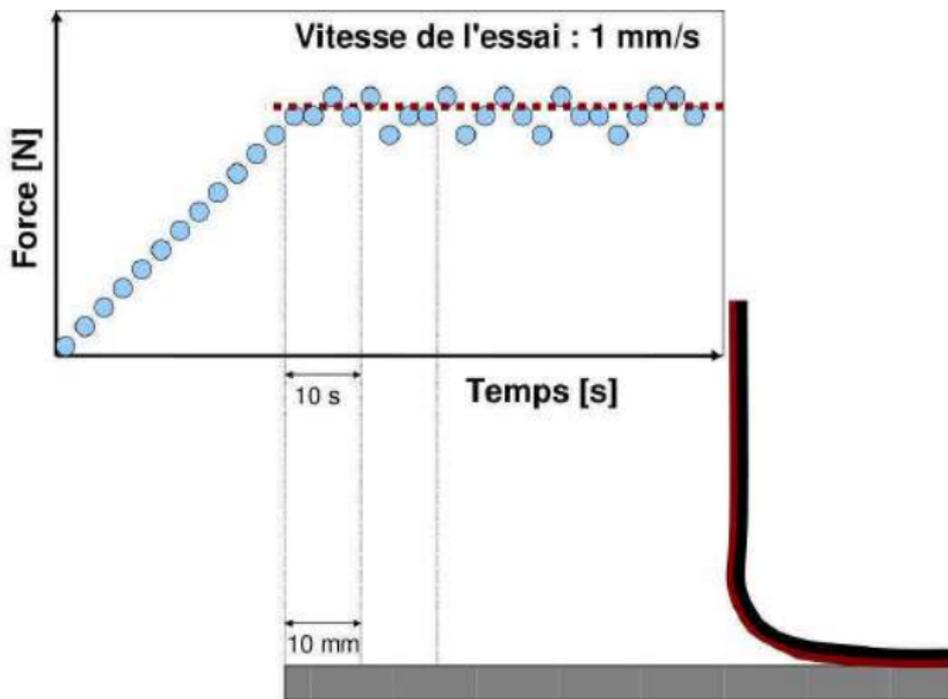
Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie



# Les tests d'adhérence - Pelage



Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Les tests d'adhérence - Pelage

Définitions

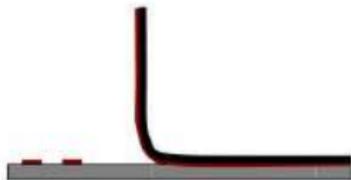
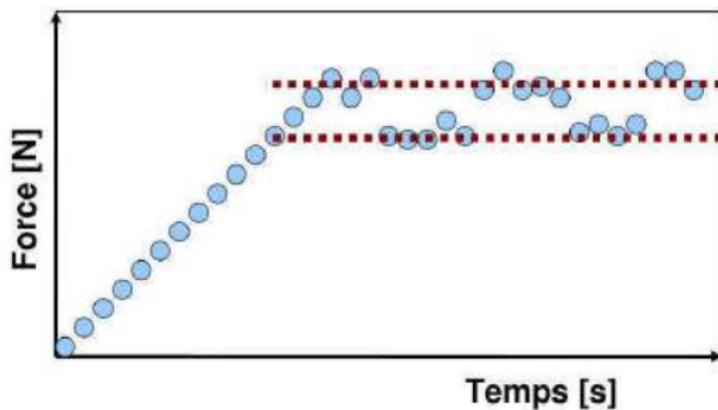
Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

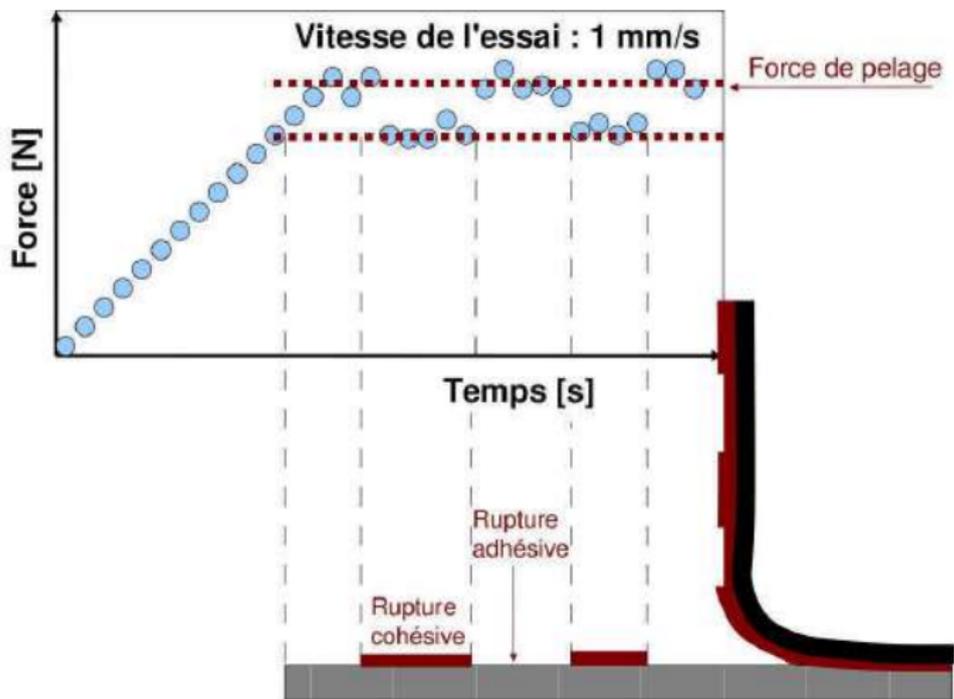
Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie



# Les tests d'adhérence - Pelage



Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les tests d'adhérence - Flexion

Définitions

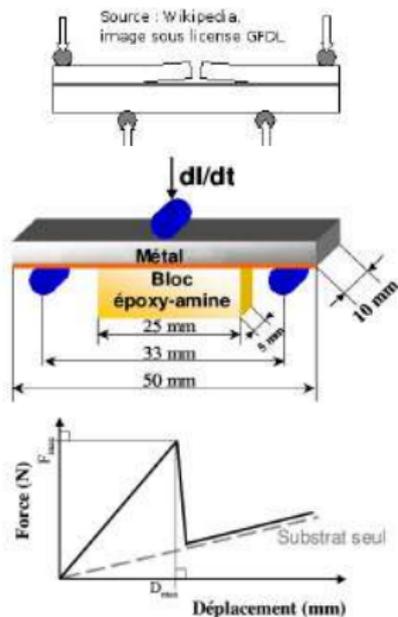
Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie



Test de flexion 4 points

Test de flexion 3 points  
(norme ISO 14679-1997)

Courbe de flexion 3 points

# Les tests d'adhérence - exemple

Définitions

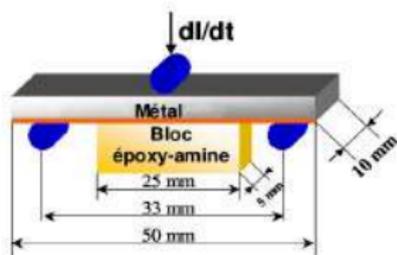
Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

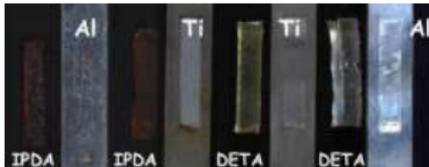
Réalisation de collages

Bibliographie



Exemple d'éprouvettes testées en flexion 3 points

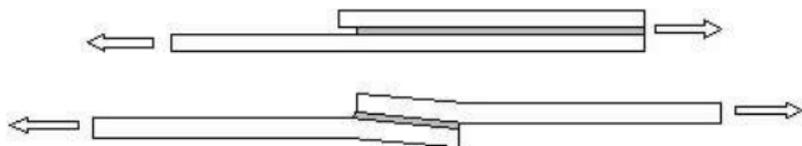
Force maximale à la rupture [N] de film polymère époxyde-amine (DGEBA-IPDA ou DETA) sur métal (Al ou Ti)



IPDA/Al	IPDA/Ti	DETA/Al	DETA/Ti
150	170	190	210

Qu'en déduire ???

# Les tests d'adhérence - Cisaillement



Source : Wikipedia, image sous license GFDL

## Essai en cisaillement largement utilisé

- Géométrie de nombreux collages
- Essai simple (éprouvettes rectangulaires)
- ☐ Normes : ISO 4587-1995, ASTM D 1002-94, NFT 76-107  
Attention : chaque norme possède ses propres paramètres/dimensions

Définitions

Les théories de l'adhésion

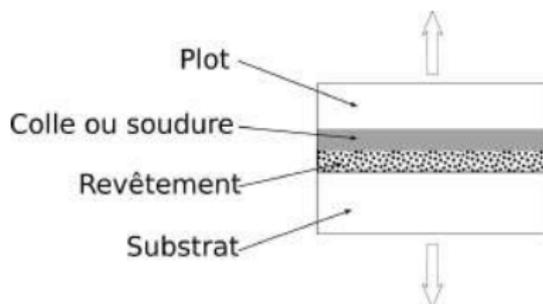
Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Les tests d'adhérence - Traction



## Essai de traction = pull off test

- Essai peu reproductible
- ∃ Norme : ISO 6922-1987

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Les tests d'adhérence - Autres tests

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

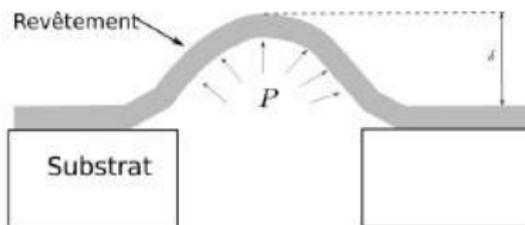
Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

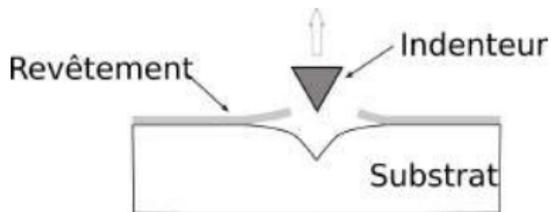
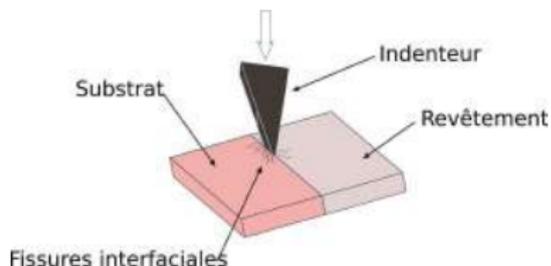
- Test de cloquage ou gonflement



- Test de quadrillage
- Le scratch test
- Torsion

# Les tests d'adhérence - Autres tests

Tests d'indentation :  
indentation sur l'interface et indentation normale



# Sommaire

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- 1 Définitions
- 2 Les théories de l'adhésion
- 3 Les tests d'adhérence
- 4 Classes d'adhésifs**
- 5 Réalisation de collages
- 6 Bibliographie

## Colles et adhésifs

⇒ 2 termes pour une même fonction !

⇒ Ce sont tous des polymères

# Quelques dates . . .

Car les adhésifs sont utilisés depuis des millénaires !

Époque	Matériaux/Adhésif/Applications
Néolithique	Fixation avec du bitume des pointes en os aux tiges des flèches
3000 av. J.-C.	Fabrication et utilisation d'agents adhésifs à base de substances naturelles
2000 av. J.-C.	Les Égyptiens fabriquaient des adhésifs végétaux et animaux
Dédale	Inventeur des adhésifs ou colles : le blanc d'œuf était utilisé comme adhésif pour les dorures des livres, les résines et jus végétaux pour le collage du bois
Chine antique	Les laques et adhésifs servaient pour peindre et traiter la soie
1100 av. J.-C.	Fonte du soufre et puis refroidissement très rapidement de façon à en obtenir la phase élastique. Les lames de couteaux, les flèches et les fers de lance étaient collés à leurs manches en bois au moyen de ce "hot-melt "

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Quelques dates . . .

Époque	Matériaux/Adhésif/Applications
16 <sup>ème</sup> siècle	Invention de l'imprimerie : relance l'intérêt pour les colles et entraîne l'amélioration des adhésifs animaux et végétaux (gomme arabique, sève d'acacia, latex des plantes à caoutchouc, . . .)
vers 1850	Amélioration significative des propriétés des polymères naturels en les modifiant (invention de la vulcanisation du caoutchouc naturel suivie de celle du premier adhésif semi-synthétique : la nitrocellulose ou "celluloïd")
1910	Premiers adhésifs thermofusibles à base de phénol-formaldéhyde (Bakélite), puis d'esters de cellulose pour le collage du bois
1930	Urées-formaldéhyde
1936	Polyesters insaturés, polyépoxydes
1947	Dépôt du brevet sur le procédé de fabrication des cyanoacrylates
1957	Cyanoacrylates produits industriellement
1967	Développement des polyimides

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Formulation

## Base

- Polymère ou mélange de polymères

## Additifs

- Plastifiants
- Tackifiants
- Cires cristallines
- Agents épaississants, fluidifiants, “thixotropants”
- Lubrifiants, agents de démoulage
- Colorants, stabilisants (antioxydants)

## Charges

- Minérales
- Organiques

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Classements

- Type de polymère (TP/TD ou amorphe/semi-cristallin ...)
- Forme (liquide, film, pâte ...)
- Mode de durcissement (thermofusible, solvant, réaction)

## Définitions

- Adhésifs à Mise en Œuvre Physique = AMOP
  - ⇒ Initialement liquides = Colles à solvant
  - ⇒ Initialement solides = Colles thermofusibles et PSA
- Adhésifs à Mise en Œuvre Chimique = AMOC
  - ⇒ Durcissement par réaction de polymérisation

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# AMOP liquides - Colles solubilisées dans l'eau

## AMOP liquides solubles dans l'eau

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

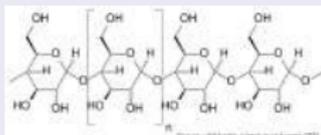
Réalisation de collages

Bibliographie

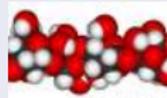
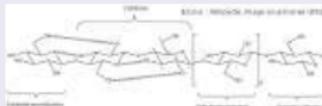
- La colophane



- L'amylopectine



- La cellulose  
(colle pour papiers peints)



- L'albumine, la caséine
- Le bitume
- PEG, Poly(alcool vinylique) . . .

# AMOP liquide - Cas des émulsions

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- PVA = Polyacétate de vinyle
- Acétate de vinyle copolymérisable avec acryliques ou anhydrides
- Emulsions de polyacrylates

# AMOP liquide - Colles à solvant

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## AMOP liquide solubles dans des solutions organiques

- Caoutchouc
- Polyisobutène (PIB)
- Polydiènes
- PU thermoplastiques



# AMOP - Colles contact

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- Polychloroprène
- PU

# AMOP solide - Colles thermofusibles

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- Dérivés du PE :  
copolymérisation  
radicalaire ou greffage
- Polyamides
- Polyesters
- PU



# AMOP solide - Adhésifs sensibles à la pression

## Films et rubans adhésifs

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- **Polyacrylates**  
Scotch de bureau,  
d'emballage
- Polydiènes/polyvinyliques
- SIS = polymère triblocs  
styrène-isoprène-styrène
- SBS = polymère triblocs  
styrène-butadiène-styrène



# AMOC = Adhésifs de réaction

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

Durcissement par réaction de polymérisation

⇒ Polyaddition et polycondensation

# Durcissement par mélange des composants

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Principe

### Réaction chimique classique

⇒ Respecter la stœchiométrie !

⇒ Éviter toute formation de bulles (couche de faible cohésion)

# Durcissement par mélange des composants

⇒ Ce sont donc des bicomposants

## Exemples

- Époxydes
- PU
- Polyesters
- Acryliques

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Durcissement par apport de chaleur

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Principe

La réaction de polymérisation ne commence qu'à une température donnée

N.B. Le durcissement par mélange des composants peut être classé dans "Durcissement par apport de chaleur" si  $T_{reaction} = T_{ambiante}$

# Durcissement par apport de chaleur

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## monocomposants

- Époxydes

## bicomposants

- Phénol-formol
- Époxydes
- Phénoliques
- PA

⇒ Adhésifs utilisés essentiellement pour coller des métaux

# Durcissement aux UV

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Principe

- Assemblage de matériaux transparents aux UV  
⇒ Verre, PMMA, PC, POM ...
- Respecter longueur d'onde, temps d'irradiation ...  
⇒ UV-A (380-315 nm) utilisés généralement
- Les UV décomposent un type de molécule pour former des radicaux libres servant d'amorceurs
- Utilisation de masques possible

# Durcissement aux UV

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## monocomposants

- Adhésifs acryliques (les + anciens)
- Polyesters
- PU avec doubles liaisons

# Durcissement à l'humidité de l'air

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Principe

- Humidité de l'air de 65%

⇒ < 40% d'humidité → pas de durcissement

⇒ > 80% d'humidité → durcissement trop brutal

# Durcissement à l'humidité de l'air

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Exemples (monocomposants)

- PU et Silicones (polysiloxane)
- Base ester de l'acide cyanoacrylique

# Durcissement par effet catalytique et sous exclusion d'air/oxygène

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## Principe

- Effet catalytique par contact métallique  
⇒ Collage des métaux exclusivement !
  
- Domaines d'application :  
freinage, collage, étanchéification

# Durcissement par effet catalytique et sous exclusion d'air/oxygène

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

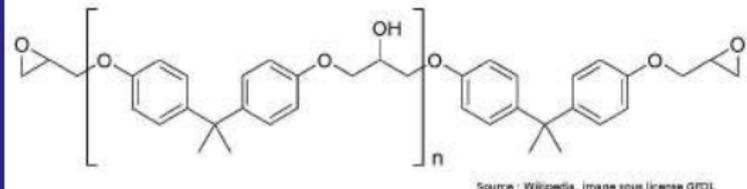
Réalisation de  
collages

Bibliographie

## monocomposants

- Diacrylate

# Exemple d'adhésifs de réaction - Poly-époxydes



- Monomères ou oligomères terminés par des fonctions oxirane  
⇒ DGEBA ou Novolaque
- Co-monomère : amines, anhydrides

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

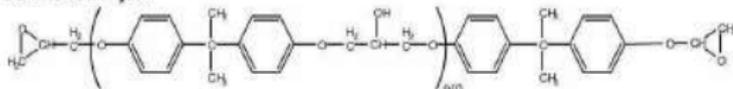
Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Exemple d'adhésifs de réaction - Poly-époxydes

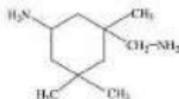
## Exemples de monomères

**Nom usuel :** DiGlycidyl Ether du Bisphenol A  
**Nom chimique :** Bis (4 - (2, 3 - époxypropoxy) phényl) propane  
**Abréviation :** DGEBA  
**Formule chimique :**



**Etat à 25° C :** liquide transparent  
**Masse Molaire :** 348,52 g.mol<sup>-1</sup>  
**Fonctionnalité :** 2  
**T<sub>g0</sub> :** -21,2°C  
**Densité :** 1,17 g.cm<sup>-3</sup>  
**Viscosité :** 4 à 6 Pa.s à 25 °C

**Nom usuel :** Isophorone Diamine  
**Nom chimique :** 3-aminométhyl-3,5,5-triméthylcyclohexylamine  
**Abréviation :** IPDA  
**Formule chimique :**



**Etat à 25° C :** liquide transparent  
**Isomères :** mélange de 25% cis et 75% trans environ  
**Masse Molaire :** 170,3 g.mol<sup>-1</sup>  
**Fonctionnalité :** 4  
**Densité :** 0,92 g.cm<sup>-3</sup>  
**Température de fusion :** 10 °C  
**Température d'évaporation :** 275 °C  
**Viscosité :** 0,028 Pa.s à 25 °C

**Nom usuel :** Diethylenetriamine  
**Nom chimique :** Diethylenetriamine  
**Abréviation :** DETA  
**Formule chimique :**



**Etat à 25° C :** liquide transparent  
**Masse Molaire :** 103,17 g.mol<sup>-1</sup>  
**Fonctionnalité :** 5  
**Densité :** 0,955 g.cm<sup>-3</sup>  
**Température de fusion :** -35 °C  
**Température d'évaporation :** 199 °C à 209 °C  
**Viscosité :** 0,071 Pa.s à 25 °C

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Exemple d'adhésifs de réaction - Poly-époxydes

Définitions

Les théories de l'adhésion

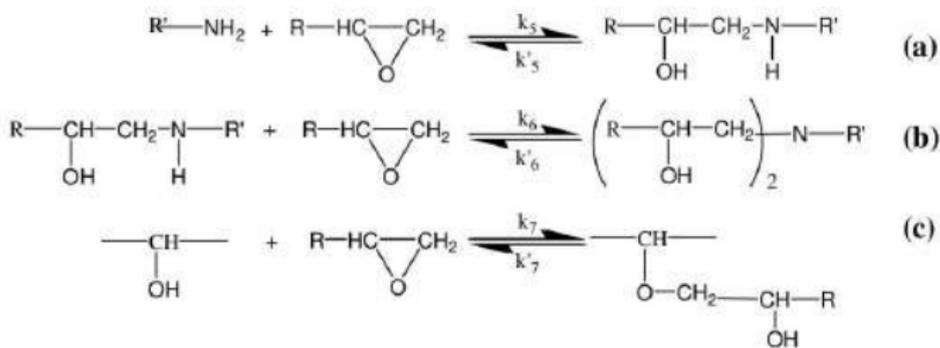
Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## Réactions époxyde-amine : polyaddition



# Exemple d'adhésifs de réaction - Poly-époxydes

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- Cas des époxydes monocomposant : Pas de réaction d'homopolymérisation de monomères époxydes mais blocage du co-monomère (amine)
  - par un complexe sensible à la chaleur.
  - par l'état cristallin de co-monomère à  $T_{amb}$
  
- Co-monomère le plus utilisé : la dicyandiamide (Dicy)

# Exemple d'adhésifs de réaction - Poly-époxydes

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- **ATTENTION** : les époxydes sont très allergisants !
- Certaines amines peu sympathiques ...
- Par contre, pas de solvant volatils
- Nombreuses utilisations

# Exemple d'adhésifs - PU

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- Réaction d'un di-isocyanate avec un produit hydroxylé (polyester-polyol, ou polyéther-polyol de  $f \geq 2$ )
- Thermoplastiques formés si  $f=2$  (TPU)
- Thermodurcissables si  $f>2$  (PUR)
- AMOP et AMOC

# Exemple d'adhésifs - PU

Définitions

Les théories de l'adhésion

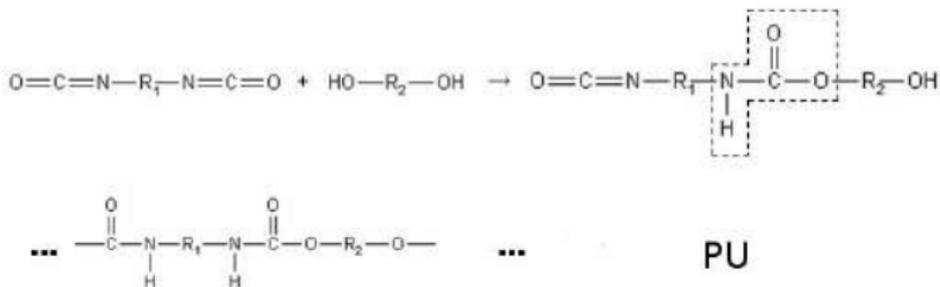
Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## Polymérisation par polycondensation



# Exemple d'adhésifs - PU

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

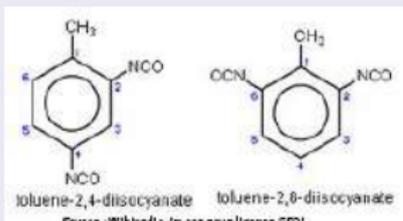
Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## Monomères Diisocyanate courants

- TDI = Toluène Diisocyanate



- MDI = Diphényl Méthane Diisocyanate
- IPDI = Isophorone Diisocyanate
- HDI = 1-6 hexane diisocyanate

# Exemple d'adhésifs - PU

Formulation :

## Mélange fréquent de différents types de monomères

- Segments mous :  
diisocyanate + polyester-diol et/ou polyéther-diol
- Segments durs :  
diisocyanate + amine et/ou polyol court

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Exemple d'adhésifs - PU

Cas des PU monocomposants :

- di-isocyanate réagit avec l'humidité de l'air

## Réaction parasite avec l'eau



Puis : isocyanate + amine  $\rightarrow$  urée

- ou di-isocyanate bloqué par un agent complexant

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Exemple d'adhésifs - PU

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## PU très réactifs

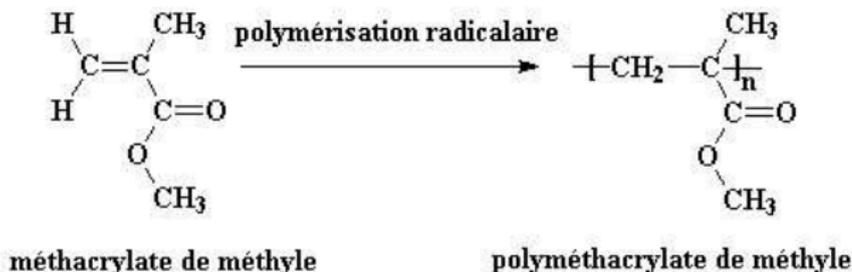
- Groupes isocyanates capables de réagir avec de nombreux substrats
- Liaisons H possibles

# Exemple d'adhésifs - Acryliques

∃ adhésifs acryliques TP et TD

⇒ Font partie de la classe des vinyliques

Exemple de polymérisation du PMMA



Source : Wikipedia, image sous licence ODFL

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Exemple d'adhésifs - Acryliques

Définitions

Les théories de l'adhésion

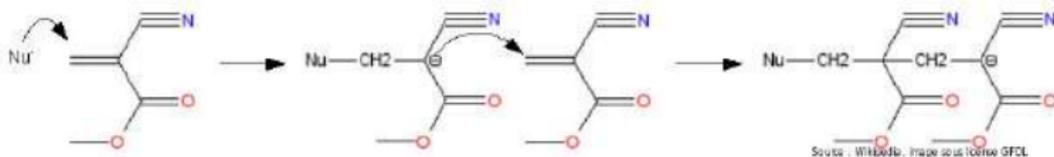
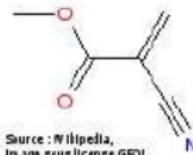
Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## Cas particulier des colles cyanoacrylates



# Exemple - Acryliques : Cas particulier des colles anaérobies

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

## Composition :

- monomère (*MMA et/ou PU-acrylate*)
- initiateur (*peroxide*)
- + catalyseur ...

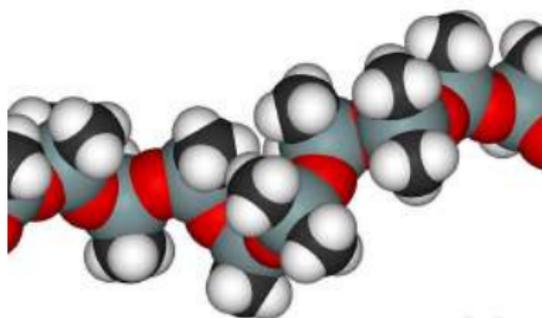
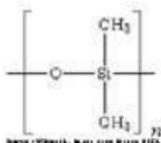
⇒ Formation de radicaux initiée par une réaction redox des ions métalliques

# Exemple d'adhésifs - Silicones

Silicone = Polysiloxane

⇒ Composés inorganiques formés d'une chaîne silicium-oxygène (...-Si-O-Si-O-Si-O-...) sur laquelle des groupes se fixent, sur les atomes de silicium

⇒ Exemple : le PDMS



Source : Wikipedia,  
image sous license GFDL

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

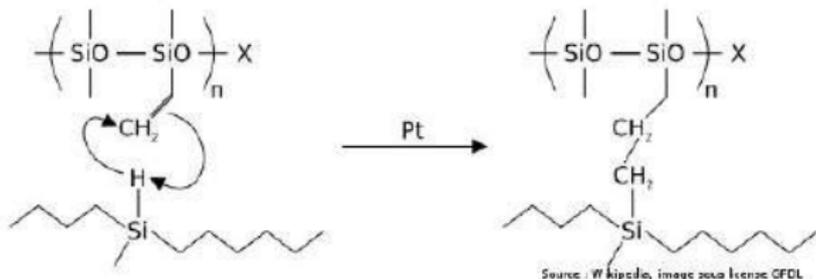
Réalisation de  
collages

Bibliographie

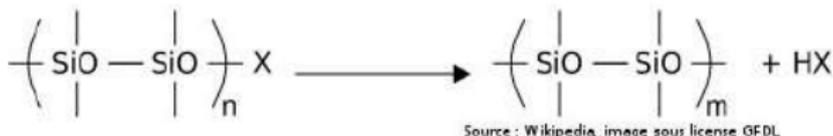
# Exemple d'adhésifs - Silicones

Plusieurs polymérisations possibles :

- Polyaddition



- Polycondensation



Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Exemple d'adhésifs - Silicones

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

Cas particulier des colles MS-polymère

⇒ Marque déposée par Kaneka

⇒ MS-polymère = modified-silicone polymer =  
Silyl-terminated polyether (STP)

⇒ Combine les propriétés des PU et des silicones

# Annexe - Liste non-exhaustive d'adhésifs

Nom	Acronyme	Classe
Acétate de cellulose	CA	Ester de cellulose
Nitrate de cellulose = nitrocellulose	CN	Ester de cellulose
Phénol-formaldéhyde	PF	polymère phénolique
Polyamide	PA	Polyamide
Polycarbonate	PC	Polyester
Polydiméthylsiloxane	PDMS	Polysiloxane
polyétheréthercétone	PEEK	Polycétone
Polyéthylène	PE	Polyoléfine
Polyéthylène oxyde	PEO	Polyéther
Polyéthylène glycol	PEG	Polyéther
Polyéthylène téréphtalate	PET	Polyester
Polyimide	PI	Polyimide
Polyisocyanate	PIC	Polyamide
Polyacrylonitrile	PAN	Polymère vinylique
Polybutadiène	PBD	Polymère diène
Polyacrylate de méthyle	PMA	Polymère vinylique
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	Polymère acrylique
Polyoxyméthylène	PMO	Polyéther
Polypropylène	PP	polyoléfine
Polysiloxane	silicones	Polymères inorganique
Polystyrène	PS	Polymère vinylique
Polytétrafluoroéthylène	PTFE	Polymère vinylique
Polyacétate de vinyle	PVAc	Polymère vinylique
Polychlorure de vinyle	PVC	Polymère vinylique
Polyépoxydes	EP	Polyépoxydes
Polyuréthanes réticulés	PUR	Polyuréthanes
Polyuréthanes thermoplastiques	TPU	Polyuréthanes

# Annexe - Propriétés de quelques adhésifs

Nom	Acronyme	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)
Polyéthylène	PE-LD	-100	120
Polyéthylène	PE-HD	-70	135
Polyoxyméthylène	POM		175 à 180
Polypropylène	PP	-30	165
Polyamide	PA-12	40 à 80	180
Polyamide	PA-11	40 à 80	186
Polyamide	PA-6	40	220 à 230
Polyamide	PA-66	50	260
Polyacétate de vinyle	PVAc	30	
Polychlorure de vinyle	PVC	85	190
Polystyrène	PS	100	
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	105	
Polycarbonate	PC	155	235
Polyéthylène téréphtalate	PET	69	256
Polytétrafluoroéthylène	PTFE	-20	327
polyétheréthercétone	PEEK	143	335



Jacques Rault

*Les polymères solides*

Cépaduès-éditions, 2002, 254p.

# Bibliographie - Première partie

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie



Jacques Cognard

*Science et technologie du collage*

Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000, 322p.



E. H. Schindel-Bidinelli

*Pratique du collage industriel*

Lavoisier, Ted et Doc, 1992, 246p.

# Bibliographie - Première partie

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie



Philippe Cognard

Collage des matériaux. Mécanismes : Classification des colles  
Techniques de l'ingénieur : BM 7 615



Stéphanie Clouet et Frédéric Fortier

Les rubans adhésifs  
Techniques de l'ingénieur : BM 7 612



Éric Papon

Chimie et mise en œuvre des adhésifs  
12<sup>èmes</sup> Journées d'Étude sur l'adhésion, Session de formation, 2003



H. HAIDARA

Mécanismes fondamentaux du mouillage et de l'adhésion  
12<sup>èmes</sup> Journées d'Étude sur l'adhésion, Session de formation, 2003

# Sommaire

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- 1 Définitions
- 2 Les théories de l'adhésion
- 3 Les tests d'adhérence
- 4 Classes d'adhésifs
- 5 Réalisation de collages**
- 6 Bibliographie

# Avantages du collage

## Avantages du collage

- Assemblage de matériaux fragiles
- Assemblage de matériaux différents
- Assemblage de matériaux minces
- Répartition des contraintes
- Conservation des dimensions
- Réduction du nombre de pièces
- Étanchéité, Esthétique, lutte contre la corrosion, isolation ...
- Rattrapage des tolérances
- Répartition des contraintes

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Inconvénients du collage

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Inconvénients du collage

- Limite de température
- Vieillessement
- Fiabilité
- Sensibilité à l'environnement (H<sub>2</sub>O)
- Démontage
- Contrôle non destructif
- Préparation de surface

# Vocabulaire technique

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Grammage

Quantité d'adhésif déposé par unité de surface

## Pégosité (Tack)

Faculté d'un adhésif de maintenir ensemble instantanément deux supports (=adhérence instantanée).

## Encollage

Phase du collage pendant laquelle on applique l'adhésif sur le ou les supports.

## Fluage

Déformation irréversible progressive d'un matériau soumis de façon prolongée à une contrainte. Pour les adhésifs, écoulement visqueux du joint de colle en service.

## Thixotropie

Propriété qu'ont certains fluides de passer d'un état visqueux à un état liquide lorsqu'on les agite et de retrouver leur état initial après un temps de repos.

## Durée de vie en pot

Durée de conservation admise pour une colle mélangée à son durcisseur au-delà de laquelle les collages deviennent moins bons, généralement par suite d'un épaissement exagéré.

## Durée de prise

Durée de maintien de deux surfaces encollées l'une contre l'autre pour avoir une résistance suffisante du collage au cours des manipulations d'usage.

## Temps d'assemblage ouvert

Durée qui s'écoule entre l'application de l'adhésif et la mise en contact intime des substrats avec ou sans pression.

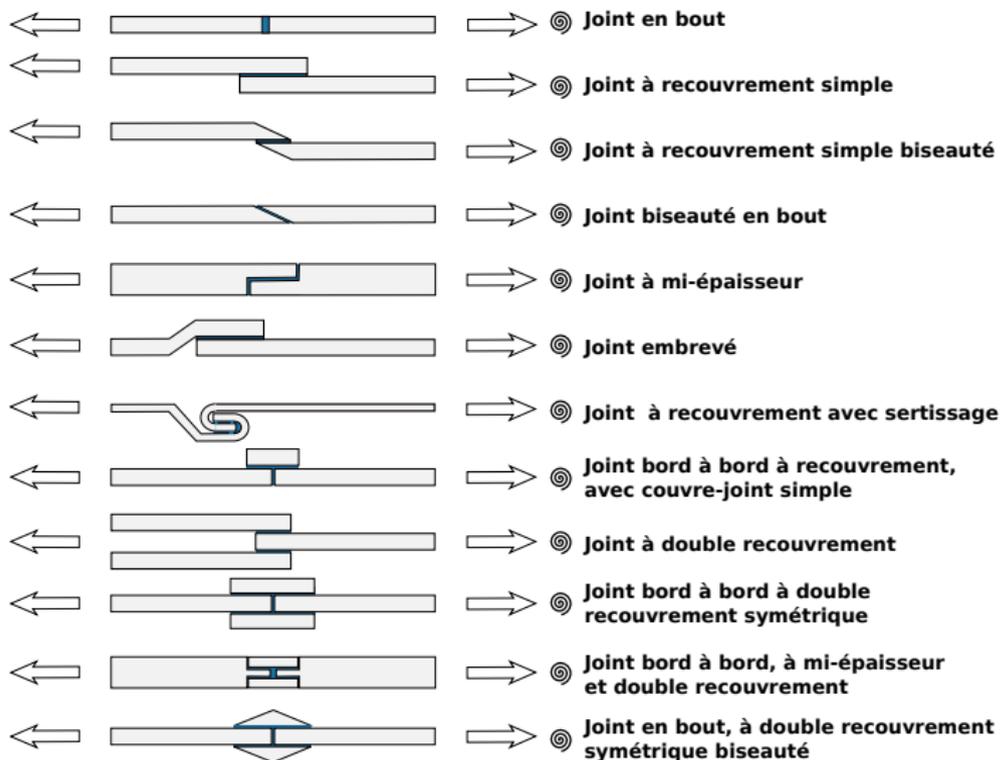
## Temps de travail

Durée s'écoulant entre le moment où l'on peut commencer l'affichage ou l'assemblage et le moment où celui-ci devient inefficace.

## Temps de gommage

Durée s'écoulant entre le moment de l'encollage ou de réactivation de l'adhésif et celui où l'on peut procéder à l'affichage ou à l'assemblage.

# Forme des joints



Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Bibliographie - Première partie

⇒ Dimensionnement à ne pas négliger !

- Analyses uniaxiales
  - Théorie de Volkersen
  - Théorie de Demarkles
  - Théorie de Erdogan et Ratwani
- Analyses biaxiales
  - Théorie de Goland et Reissner
  - ...
- Approches numériques
  - Utilisation des éléments finis
  - ...



Éric Paroissien

Contribution aux assemblages hybrides boulonnés/collés  
Application aux jonctions aéronautiques

Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, 287p., 2006.

# Conception des joints-Dimensionnement

## Analyses uniaxiales

### Théorie de Volkersen

Analyse de l'état de contraintes dans un joint à simple recouvrement

$$T(x) = 0,5 \frac{\eta_V}{b} \frac{\cosh(\eta_V(0,5L-x))}{\sinh(0,5\eta_V L)} f$$

avec

- $\eta_V = \sqrt{\frac{2G}{ee_1 E_1}}$
- $T(x)$  : contrainte de cisaillement dans l'adhésif (MPa)
- $\eta_V$  : constante de Volkersen ( $mm^{-1}$ )
- $G$  : module de Coulomb de l'adhésif (MPa)
- $e$  : épaisseur de l'adhésif (mm)
- $e_1 = e_2$  : épaisseur des substrats (mm)
- $E_1 = E_2$  : module d'Young des substrats (MPa)
- $b$  : profondeur de la jonction (mm)
- $L$  : longueur du recouvrement (mm)
- $x$  : abscisse dans une base orthonormale
- $f$  : charge appliquée selon x (N)

$$T_{max} = \frac{\eta_V L}{2 \tanh(\eta_V L)} T_{moy} \text{ avec } T_{moy} = \frac{f}{bL} \Rightarrow T_{opt} = \frac{2}{\eta_V}$$



O. Volkersen 1938 et 1965

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Conception des joints-Dimensionnement

## Analyses uniaxiales

Demarkles améliore l'analyse précédente en tenant compte des déformations de cisaillement des substrats

$$T(x) = \frac{\eta_D L}{\sinh(\eta_D L)} \left[ \frac{e_2 \cosh(\eta_D x) + e_1 \sinh(\eta_D L - \eta_D x)}{e_1 + e_2} \right] T_{moy}$$

$$\text{avec } \eta_D = \sqrt{\frac{2G_1 G(e_1 + e_2)}{Ee_1 e_2 (2G_1 e + G(e_1 + e_2))}}$$

ici,  $e_1$  peut être différent de  $e_2$



L. R. Demarkles

Investigation on the use of rubber analogue in the study of the stress distribution in riveted and cemented joint

NASA, Technical Notes N° 3413, 1955.

# Conception des joints-Dimensionnement

## Analyses uniaxiales

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Analyse de Erdogan et Ratwani

⇒ Analyse de l'assemblage collé de 2 substrats en escalier puis biseautés

⇒ flexion des substrats négligée : seuls les efforts normaux dans les substrats et la contrainte adhésive de cisaillement sont considérés

⇒ Calcul des contraintes de cisaillement de l'adhésif et application au cas du simple recouvrement



F. Erdogan and M. Ratwani

Stress Distribution in Bonded Joints

Journal of Composite Materials, Vol. 5, pp. 378-393, 1971.

## Limite des analyses uniaxiales

Elles négligent le fait que pour une jonction à simple recouvrement, le chargement est excentré, et qu'il existe donc un moment fléchissant, qui a pour effet de faire tourner le joint. Cette rotation est à l'origine de l'apparition de contraintes normales de pelage dans l'épaisseur du joint en plus des contraintes de cisaillement.



Éric Paroissien

Contribution aux assemblages hybrides boulonnés/collés  
Application aux jonctions aéronautiques

Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, 287p., 2006.

# Conception des joints-Dimensionnement

## Analyses biaxiales

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

### Analyses biaxiales

⇒ Prise en compte de la flexion des substrats due à l'excentricité de chargement : introduction d'un moment de flexion en bord de joint

⇒ L'adhésif est représenté par une infinité de ressorts travaillant en cisaillement et une infinité de ressorts travaillant en traction-compression ( $\perp$ )

# Conception des joints-Dimensionnement

## Analyses biaxiales

### Analyse de Goland et Reissner

#### Analyse en 2 temps

- 1 détermination de la répartition du chargement sur la section rectangulaire du joint
- 2 détermination des contraintes dans la colle

⇒ Solutions pour 2 cas particuliers

- Fine couche de colle + rigidité similaire colle/substrats
- Fine couche de colle + ses déformations ne sont pas négligeables



M. Goland and E. Reissner

The stress in cemented joints

Journal of applied mechanics, pp.A17-A26, 1944

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Conception des joints-Dimensionnement

Approches analytiques vs approches numériques

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Approches analytiques

- ⊕ Solutions prêtes à l'emploi
- ⊕ Solutions nombreuses
- ⊖ Validité des hypothèses simplificatrices ???

## Approches numériques

- ⊕ Permettent d'éviter certaines hypothèses simplificatrices
- ⊖ Maillage fin nécessaire
- ⇒ Temps de calcul important

# Conception des joints-Dimensionnement

## Utilisation d'éléments finis dans l'étude des contraintes adhésives d'une jonction collée

- Substrats élastiques
  - Théorie des poutres
  - Structure substrat/adhésif/substrat → éléments finis à 4 noeuds
  - Déplacements nodaux interpolés par des fonctions classiques
  - Calcul de la matrice de rigidité
- ⇒ Résultats en accord avec le modèle biaxial de Goland et Reissner



S. Amijima, T. Fujii

A microcomputer program for stress analysis of adhesive-bonded joints

# Conception des joints

- Choix de la forme du joint
- Choix du son mode d'application
- Choix de l'adhésif
- Préparation de la surface
- Collage
  - Encollage
  - Mise en place du joint
- Séchage/polymérisation

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Préparation de la surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

- Lavage/Dégraissage
- Traitement mécanique
- Traitement thermique
- Traitement chimique
- Traitement électrique
- Revêtement/primaire

# Préparation de la surface

## Lavage/Dégraissage

Il nettoie la surface sans modifier ses caractéristiques de mouillabilité

- Solvants  
On utilise généralement des dérivés d'hydrocarbures ou de chlore. On choisit le solvant suivant les éléments contaminants.
- Saponification  
destruction des graisses animales et végétales par la réaction (graisse plus base donnent glycérine plus savon)

⇒ Dégraissage par immersion, essuyage, ...

⇒ Rinçage indispensable

# Préparation de la surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Traitement mécanique

- Sablage  
projection d'une poudre abrasive.
- Abrasion par ponçage/polissage
- Ultrasons

⇒ Voie sèche, ou humide

⇒ Protection de la surface créée nécessaire

# Rugosité

## Définitions

## Les théories de l'adhésion

## Les tests d'adhérence

## Classes d'adhésifs

## Réalisation de collages

## Bibliographie

- $R_p$  : Pic maximal observé sur la longueur analysée. Si l'on pose un repère cartésien dont l'axe des abscisses est aligné sur la ligne centrale de la surface à mesurer, le pic maximal, lu sur l'axe des ordonnées, pourra également être noté  $R_p = y_{max}$
- $R_c$  : Creux maximal observé sur la longueur analysée.  $R_c = |y_{min}|$
- $R_t$  : Rugosité totale. Elle correspond à la somme du pic maximal et du creux maximal observé sur la longueur analysée.  $R_t = R_p + R_c$
- $R_a$  : Écart moyen, ou moyenne arithmétique des distances entre pics et creux successifs. "Ra" correspond à la différence entre cette distance moyenne et la "ligne centrale". Ce paramètre "moyen" permet de donner une indication générale résumant les autres paramètres de rugosité d'une surface donnée, et est par conséquent fréquemment utilisé.  $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$
- $R_q$  : Moyenne arithmétique des distances entre pics et creux successifs  $R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$

# Préparation de la surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Traitement thermique

⇒ Un traitement d'une heure à 300 °C est souvent très efficace pour le collage.

# Préparation de la surface

## Traitement chimique

⇒ Permet d'éliminer la couche d'oxydes recouvrant certains métaux

- Fer et alliages  
traitement acide. Il y a risque de fragilisation pour les aciers ayant subi un traitement thermique pour augmenter la dureté.
- Acier inox  
il faut reformer la couche de passivation détruite par traitement mécanique. Le traitement est à base de  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , ...
- Cuivre et alliages  
traitement au chlorure ferrique +  $\text{HNO}_3$  ou  $\text{HCl}$ , au mélange sulfochromique Ce traitement est délicat car le collage doit suivre immédiatement le décapage.
- Aluminium et alliages  
il existe diverses méthodes dont une conservation de la couche d'oxydes et dégraissage de la surface, un décapage chimique suivi d'un décapage électrochimique, ...

Définitions

Les théories de l'adhésion

Les tests d'adhérence

Classes d'adhésifs

Réalisation de collages

Bibliographie

# Préparation de la surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

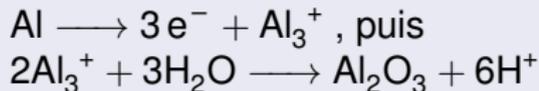
## Traitement électro-chimique

- Anodisation

- à la cathode



- à l'anode



- Équation bilan



# Préparation de la surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Traitement électrique

- Plasma (état de la matière)  
⇒ pour métaux et polymères
- mais aussi traitement corona
- Laser
- ...

# Préparation de la surface

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

## Fonctions d'un primaire

- Boucher les pores
- Améliorer la mouillabilité
- Protéger la surface

# Règles d'assemblage : Encollage et application

Les facteurs d'influence sont :

- La viscosité, rhéologie, thixotropie
- La nature chimique : le matériau des applicateurs peut attaquer les colles et inversement.
- Adhésifs mono ou bi-composants : problème de conservation, de préparation et de quantité nécessaire.
- Adhésifs hot melts : Problèmes de mise en œuvre.
- Durée de prise, nettoyage, sécurité.

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Mise en œuvre : Assemblage et durcissement

Les paramètres importants sont :

- L'épaisseur du joint
- La pression exercée
- La montée en température
- Le maintien en position des éléments à assembler  
On peut employer pour l'assemblage un outillage spécial (serre-joints, presse à rouleaux, ...)
- Éventuellement, mise à l'étuve

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie

# Sommaire

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

**Bibliographie**

- 1 Définitions
- 2 Les théories de l'adhésion
- 3 Les tests d'adhérence
- 4 Classes d'adhésifs
- 5 Réalisation de collages
- 6 Bibliographie**

# Bibliographie

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie



Jacques Cognard

*Science et technologie du collage*

Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000, 322p.



K. L. Mittal

*Adhesion measurement of films and coatings*

VSP, Utrecht, 1995, 456p.



Evelyne Darque-Ceretti et Eric Felder

*Adhésion et adhérence*

Sc.et Techniques L'ingenieur, CNRS Eds, 2003, 512p.

# Bibliographie

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie



Philippe Cognard

Collage des matériaux. Mécanismes : Classification des colles  
Techniques de l'ingénieur : BM 7 615



Stéphanie Clouet et Frédéric Fortier

Les rubans adhésifs

Techniques de l'ingénieur : BM 7 612



Bernard Le Neindre

Tensions superficielles et interfaciales

Techniques de l'ingénieur : K 475



H. Haidara

Mécanismes fondamentaux du mouillage et de l'adhésion

12<sup>èmes</sup> Journées d'Étude sur l'adhésion, Session de formation, 2003

# Associations diverses

- <http://www.feica.com>  
FEICA : Association of European adhesives and sealants manufacturers
- <http://www.fipec.org>  
FIPEC : Fédération des industries des peintures, encres, couleurs, colles et adhésifs
- <http://www.aficam.fr>  
AFICAM : Association Française des Industries Colles & Adhésifs et Mastics,
- <http://www.creacol.fr>  
CRÉACOL : Transfert de technologie auprès des entreprises Spécialiste de l'Assemblage par Collage

Définitions

Les théories  
de l'adhésion

Les tests  
d'adhérence

Classes  
d'adhésifs

Réalisation de  
collages

Bibliographie