



## Coopération scientifique Québec / Wallonie-Bruxelles

# APPROCHE FONDAMENTALE DU CONCEPT DE COMPATIBILITÉ DANS LA RÉPARATION DU BÉTON



- |                |   |
|----------------|---|
| L. Courard     | Université de Liège, Belgique           |
| B. Bissonnette | Université Laval, Canada                |
| A. Garbacz     | Warsaw University of Technology, Poland |
| A.M. Vaysburd  | Vaycon Consulting, USA                  |



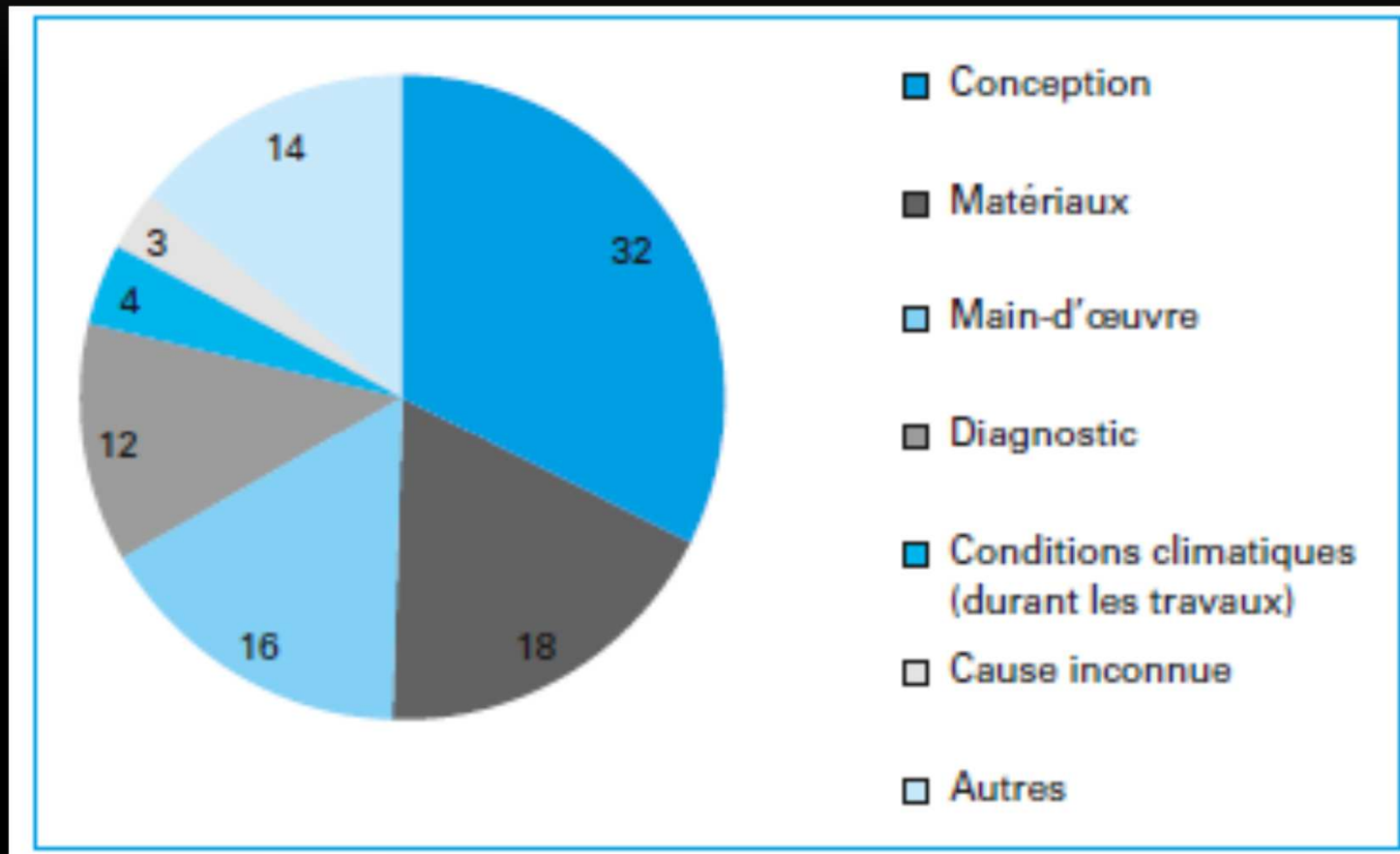
... est-ce une  
réparation?



*Quelque part...*



# Causes des échecs dans les réparations (Tilly, 2004)



d'après *Réparation des ouvrages en béton armé – Partie 1 : pathologies et diagnostic*. L. Courard et B. Bissonnette. Techniques de l'ingénieur. (novembre 2016)



# Paramètres affectant les réparations

(Silfwerbrand, 2004)

- Concrete properties
- Removal deteriorated concrete
- Cleaning after removal
- Surface properties
- Surface preparation
- Bonding agents
- Mechanical devices across the interface
- Concrete placement
- Concrete curing
- Time dependance
- Traffic, ..

Facteurs  
prédominants



**Méthode de préparation  
du béton support**

**Absence de laitance**

**Propreté avant placement  
de la réparation**

**Compaction du produit de  
réparation**

**Cure du produit de  
réparation**

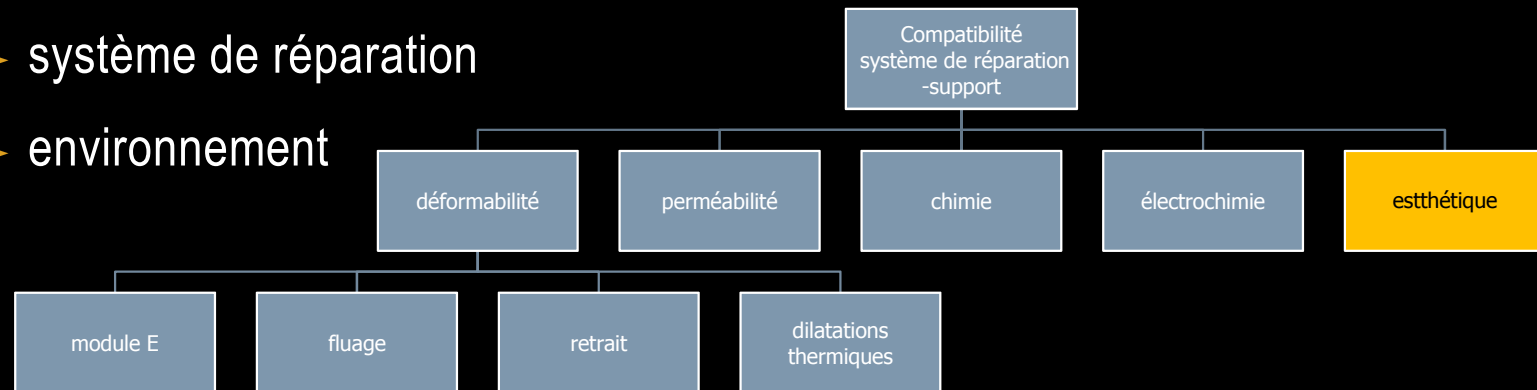


# Principes de compatibilité

- Mariage à 3...



- ✦ support
- ✦ système de réparation
- ✦ environnement

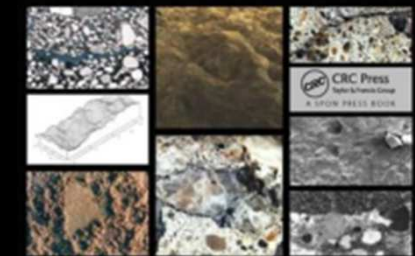


... la compatibilité (*tolérance*) devient **appétence** :  
*tendance intrinsèque à remplir un besoin...*



# Principes pour une réparation durable

- Sélection appropriée des matériaux
- Utilisation des matériaux suivant les règles de l'art
- Préparation des surfaces
- Techniques d'application
- Mûrissement de la réparation
- Contrôle qualité





# Principes de compatibilité

- Compatibilité chimique
  - Contenu en alcali (RAG): réparation avec matériaux à faible teneur en alcali si béton support avec granulats potentiellement réactifs
  - Contenu en  $C_3A$ 
    - Ciment type *High Sulphate Resistant*
  - Teneur en chlorures
    - Protection des armatures
    - Matériaux de réparation à pH élevé



# Principes de compatibilité

- Compatibilité électrochimique
  - Résistivité électrique
  - pH



*La réparation d'une partie seulement d'une large zone anodique peut augmenter le rapport cathode/anode et accélérer considérablement le processus de corrosion à la périphérie de la zone réparée.*





# Principes de compatibilité

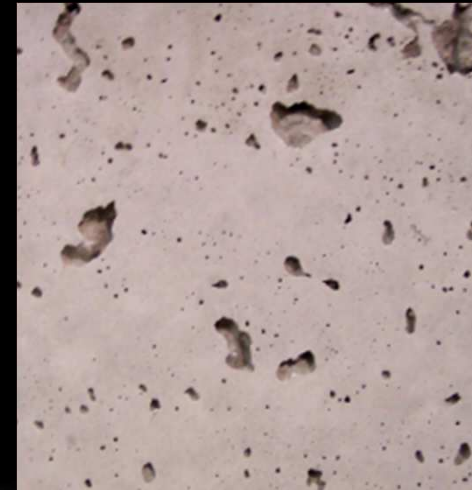
## ■ Compatibilité esthétique

### □ Couleur

- Composition chimique des constituants
- Porosité du béton de peau
- Conditions de mise en place

### □ Texture

- Propriétés physiques de la peau
- Vides, bulles et fissures





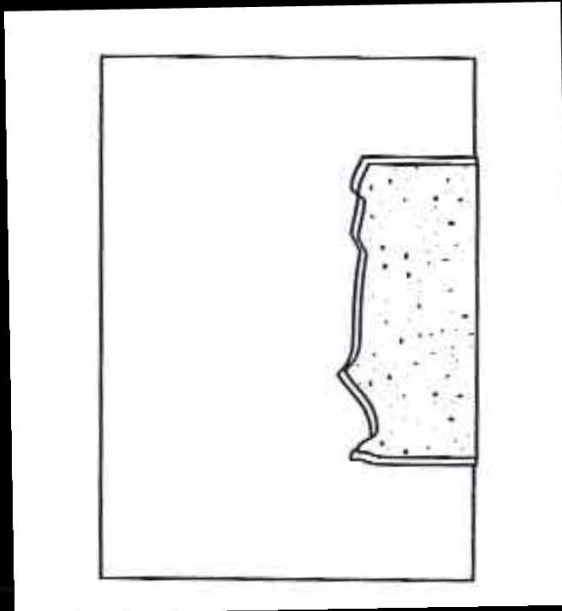
# Compatibilité dimensionnelle

- Facteurs influençant la stabilité dimensionnelle
  - Coefficient de dilatation thermique
  - Module d'élasticité
  - Fluage
  - Retrait de séchage
- Changements volumétriques → cisaillement aux interfaces

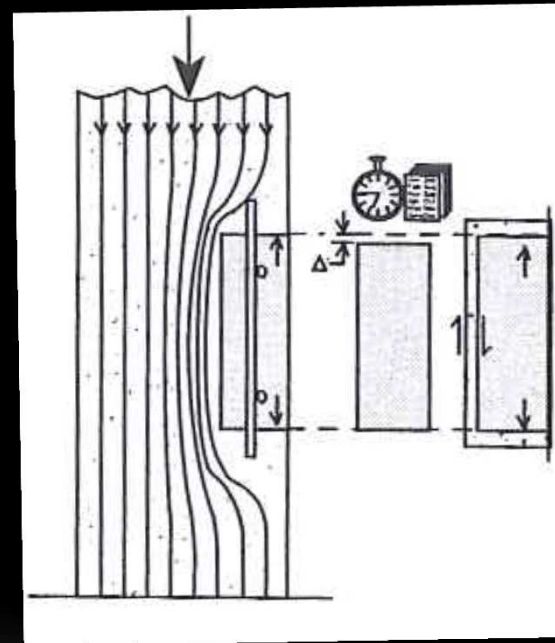


# Principes de compatibilité

- Compatibilité dimensionnelle
  - Décollement
  - Fissuration



*Délamination et perte d'adhérence*

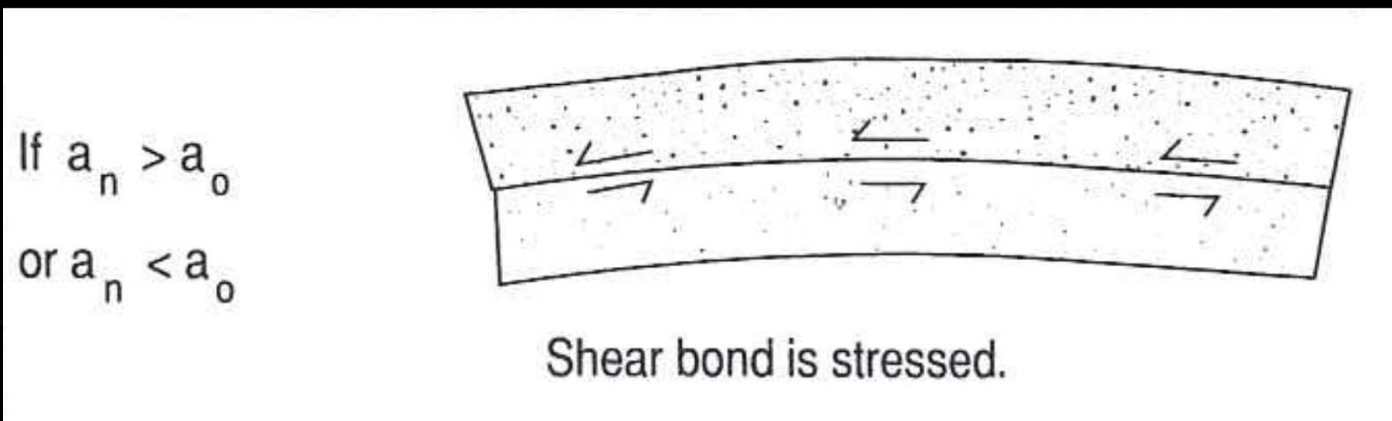
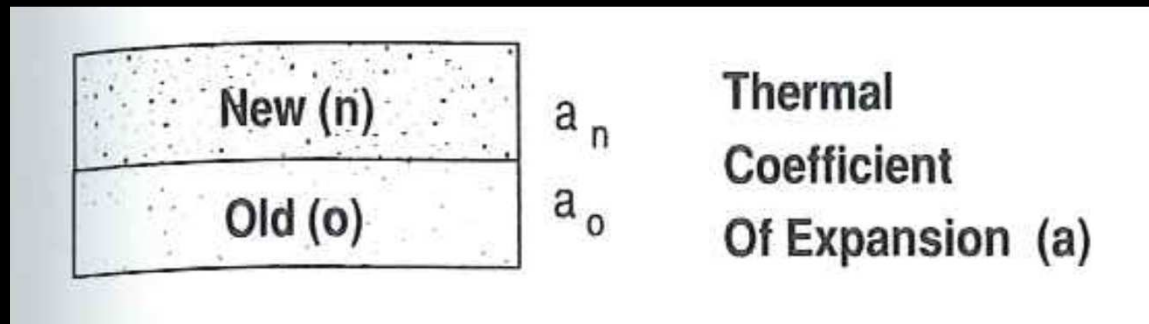


*Retrait de séchage → fissuration et réduction de volume → mauvais transfert de charge*



# Compatibilité dimensionnelle

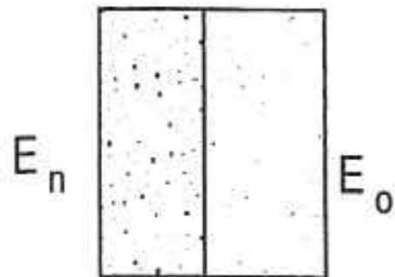
- Coefficient de dilatation thermique





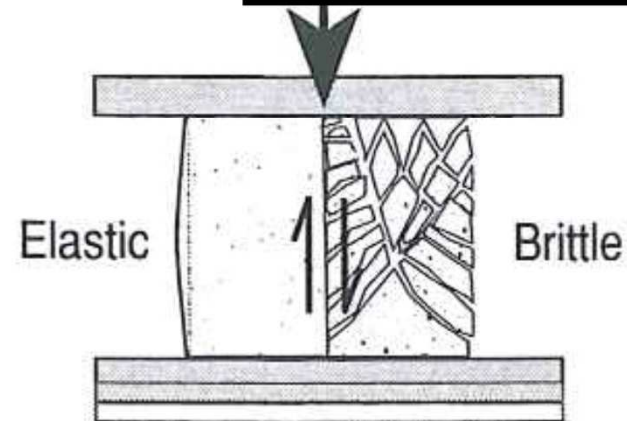
# Compatibilité dimensionnelle

- Module d'élasticité



Modulus Of  
Elasticity (E)

If  $E_n > E_o$   
or  $E_n < E_o$

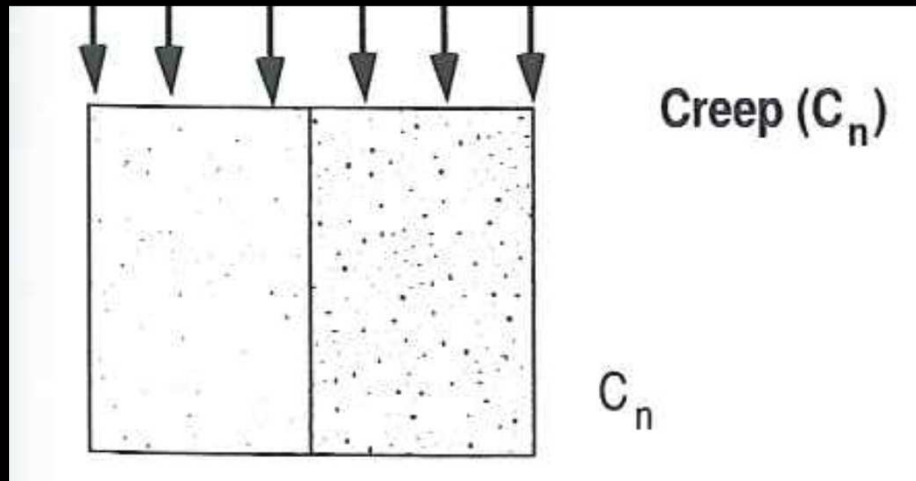


Shear bond is stressed.  
Brittle material may become overstressed.



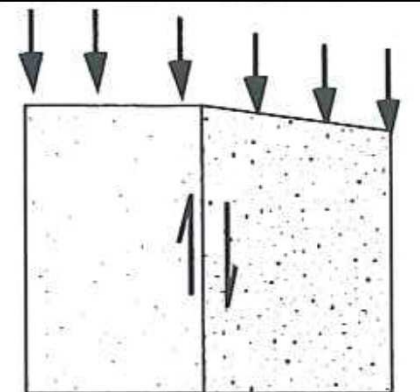
# Compatibilité dimensionnelle

- Coefficient de fluage



If  $C_n > 0$

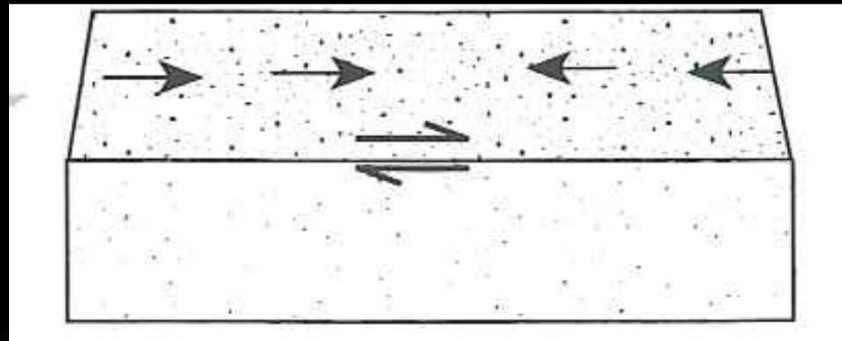
Shear bond is stressed;  
loads carried by repair are reduced.





# Compatibilité dimensionnelle

- Retrait de séchage
  - Evaporation de l'eau
  - Contraintes de traction dans le revêtement
  - Fissures si contraintes de traction  $>$  résistance en traction

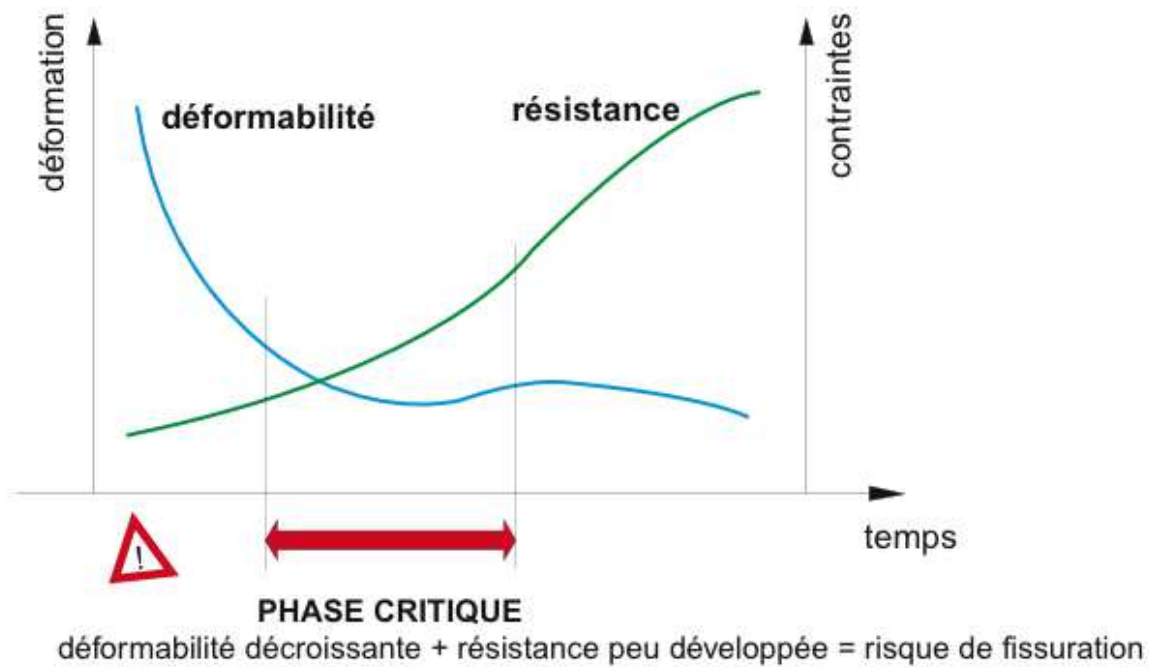


***Le retrait au séchage est un des principaux paramètres contrôlant la durabilité des réparations de surface***



# Déformation - retrait

## 4b2 déformation *retrait*



3b5



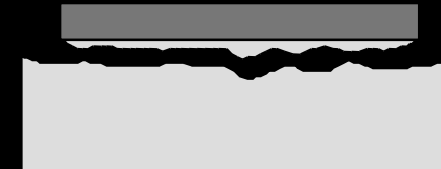


# Compatibilité dimensionnelle (Bissonnette, 2004)

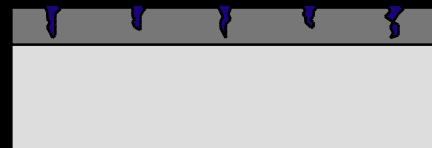
$$\Sigma(\varepsilon) = (\varepsilon_{\text{retrait}} - (\varepsilon_{\text{élastique}} + \varepsilon_{\text{fluage}} + \varepsilon_{\text{microfissuration}}))$$



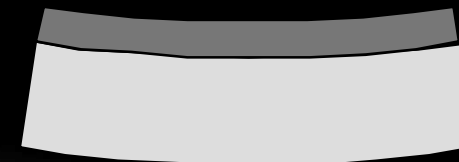
**a) décollement**



**c) délamination**



**b) fissuration**



**d) curling**



# Compatibilité dimensionnelle

- Retrait de séchage
  - Le retrait au séchage est fonction des paramètres de composition du béton et des conditions environnementales

<b>Paramètres de composition</b>	<b>Facteurs environnementaux, géométriques et autres</b>
<i>Teneur en ciment</i>	<i>Humidité relative</i>
<i>Rapport E/C</i>	<i>Durée de séchage</i>
<i>Teneur en eau</i>	<i>Rapport volume/surface</i>
<i>Teneur en granulats</i>	<i>Mûrissement</i>
<i>Âge</i>	



## Compatibilité dimensionnelle

- Comment diminuer le retrait au séchage ?
  - Diminuer la quantité de pâte (augmenter la teneur en granulats)
  - Diminuer la quantité d'eau
  - Assurer un bon mûrissement
  - Diminuer le rapport surface/volume



# Compatibilité dimensionnelle

- Diminuer la quantité d'eau

Water/Cement Ratio

	0.4	0.5	0.6	0.7	
3	.08	.12			
4	.055	.085	.105		High Shrinkage
5	.04	.06	.075	.085	Moderate Shrinkage
6	.03	.04	.055	.065	
7	.02	.03	.04	.05	Low Shrinkage



# Compatibilité dimensionnelle

- Assurer un bon mûrissement

**Tableau 1** Durée minimale de protection du béton frais, en jours, pour les classes d'exposition autres que X0 et XC1.

Température à la surface du béton (t), en °C	Développement de la résistance r ( $f_{cm2}/f_{cm28}$ )			
	Rapide $r \geq 0,50$	Moyen $r = 0,30$	Lent $r = 0,15$	Très lent $r < 0,15$
	Période minimale de cure, en jours (*) (**)			
$t \geq 25$	1	1,5	2	3
$25 > t \geq 15$	1	2	3	5
$15 > t \geq 10$	2	4	7	10
$10 > t \geq 5$	3	6	10	15

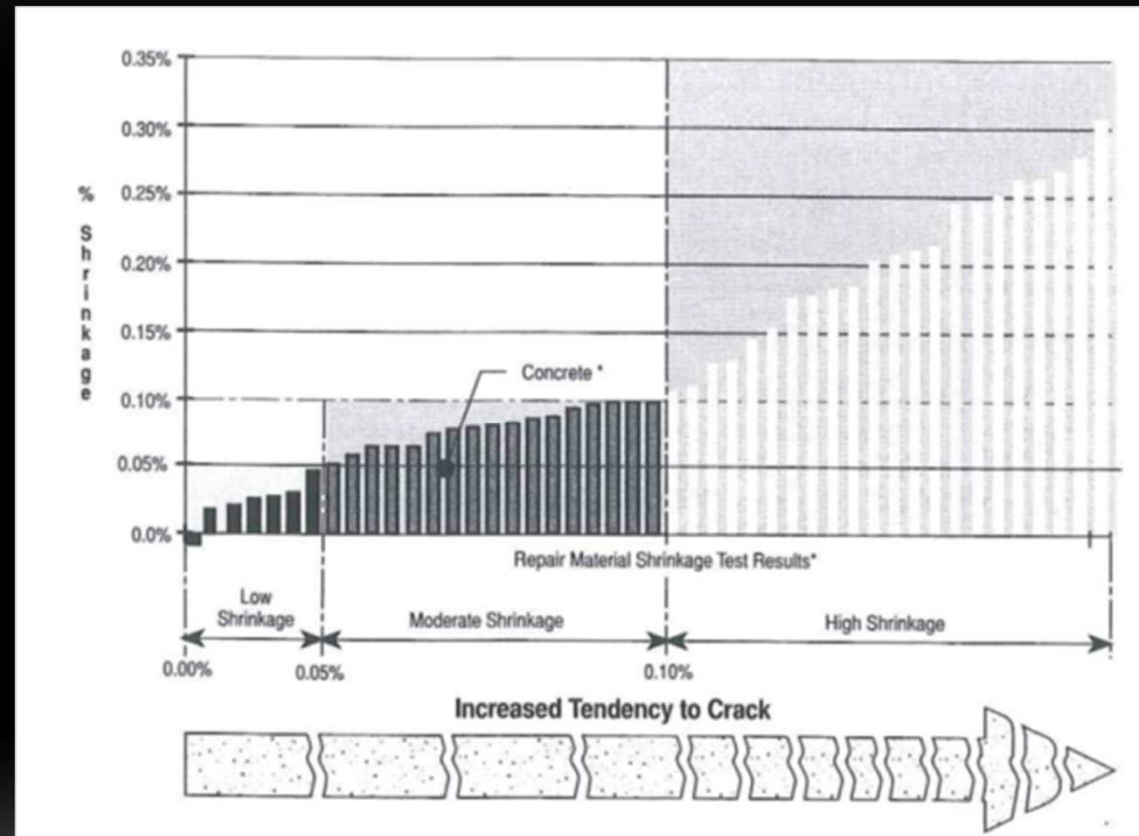
(\*) Une interpolation linéaire entre les valeurs indiquées dans les colonnes est autorisée.

(\*\*) La norme NBN B 15-001 demandait de doubler la durée minimale de cure lorsqu'une résistance à l'usure du béton était requise. Cette recommandation ne figure cependant pas dans la norme NBN ENV 13670-1.



# Compatibilité dimensionnelle

- Choix des matériaux vs retrait
  - Matériaux avec faible retrait de séchage (<0.05%)
  - Gros granulats (si épaisseur suffisante)



# PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ADHÉRENCE

---



# Paramètres affectant les réparations

(Silfwerbrand, 2004)

- Concrete properties
- Removal deteriorated concrete
- Cleaning after removal
- Surface properties
- Surface preparation
- Bonding agents
- Mechanical devices across the interface
- Concrete placement
- Concrete curing
- Time dependance
- Traffic, ..

Facteurs  
prédominants



**Méthode de préparation  
du béton support**

**Absence de laitance**

**Propreté avant placement  
de la réparation**

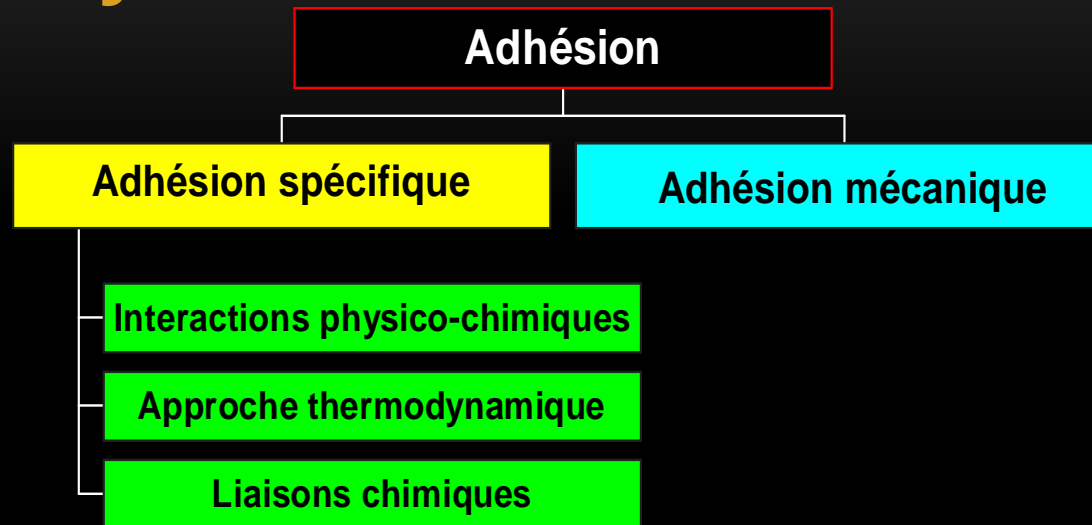
**Compaction du produit de  
réparation**

**Cure du produit de  
réparation**





# Objectif: adhésion



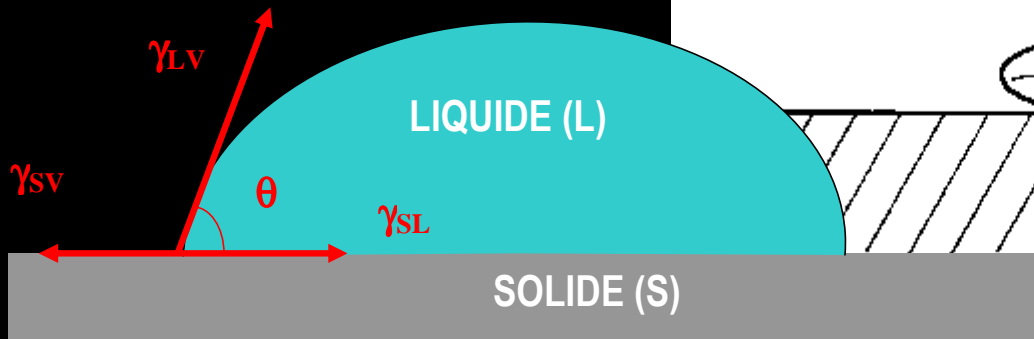
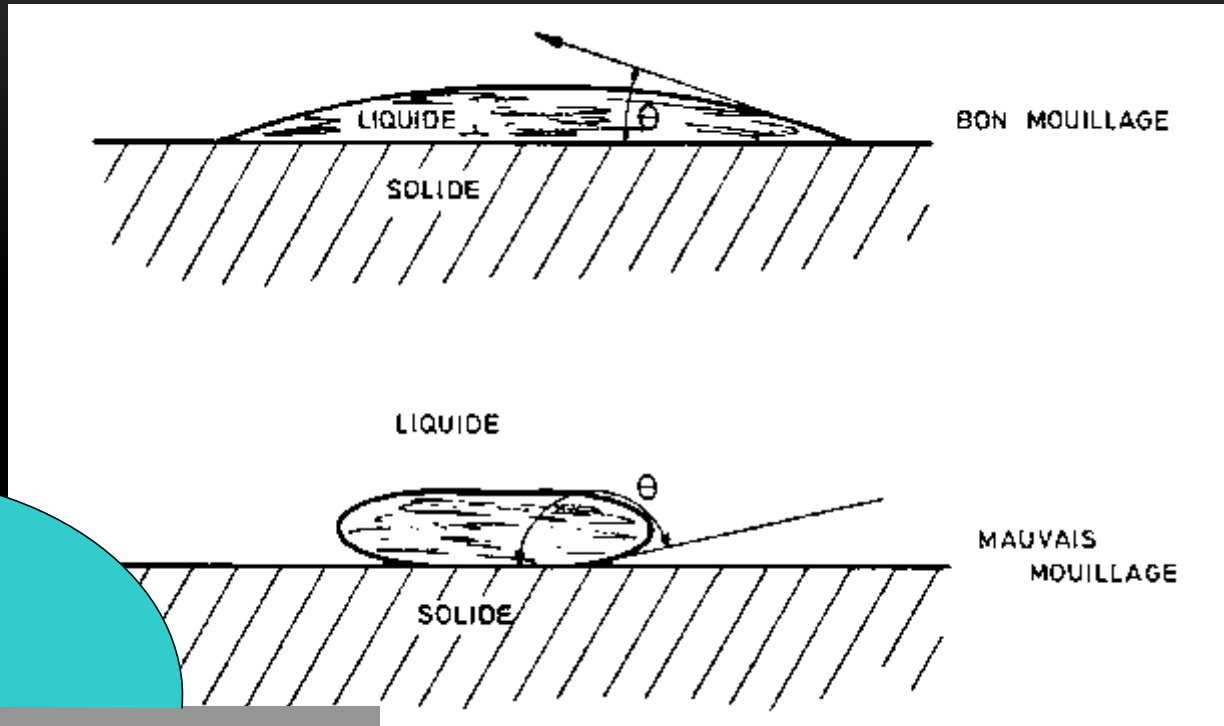
Condition 1 : étalement et mouillabilité

Condition 2 : interactions physico-chimiques

Condition 3 : interpénétration mécanique



# CONDITION 1 : étalement

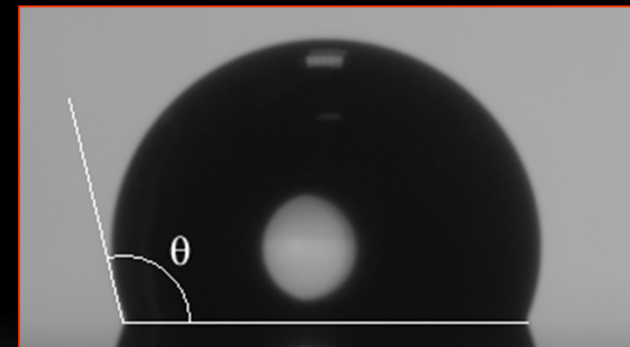
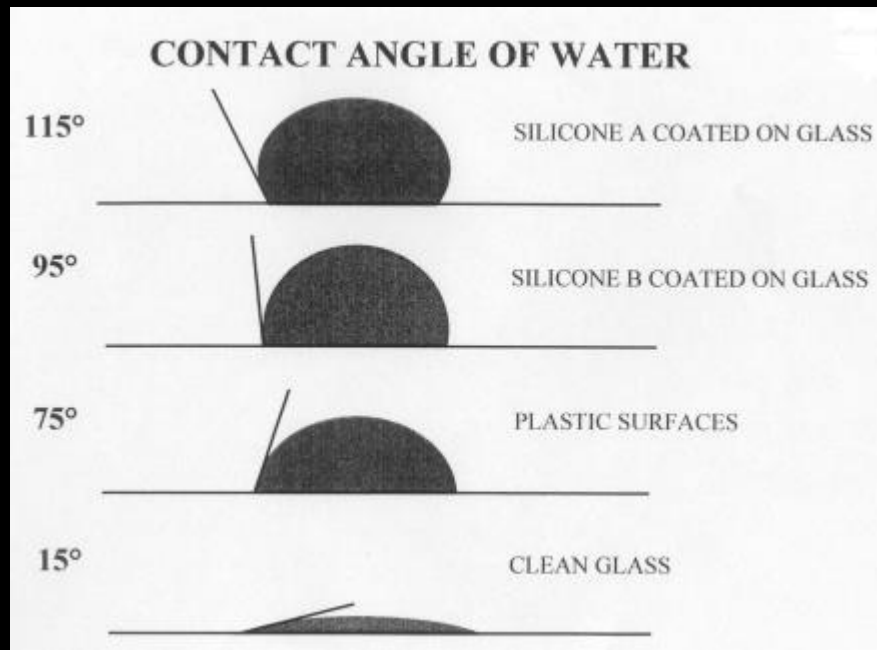


$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$$

Meilleure mouillabilité du solide  
par le liquide si l'angle de  
contact est FAIBLE

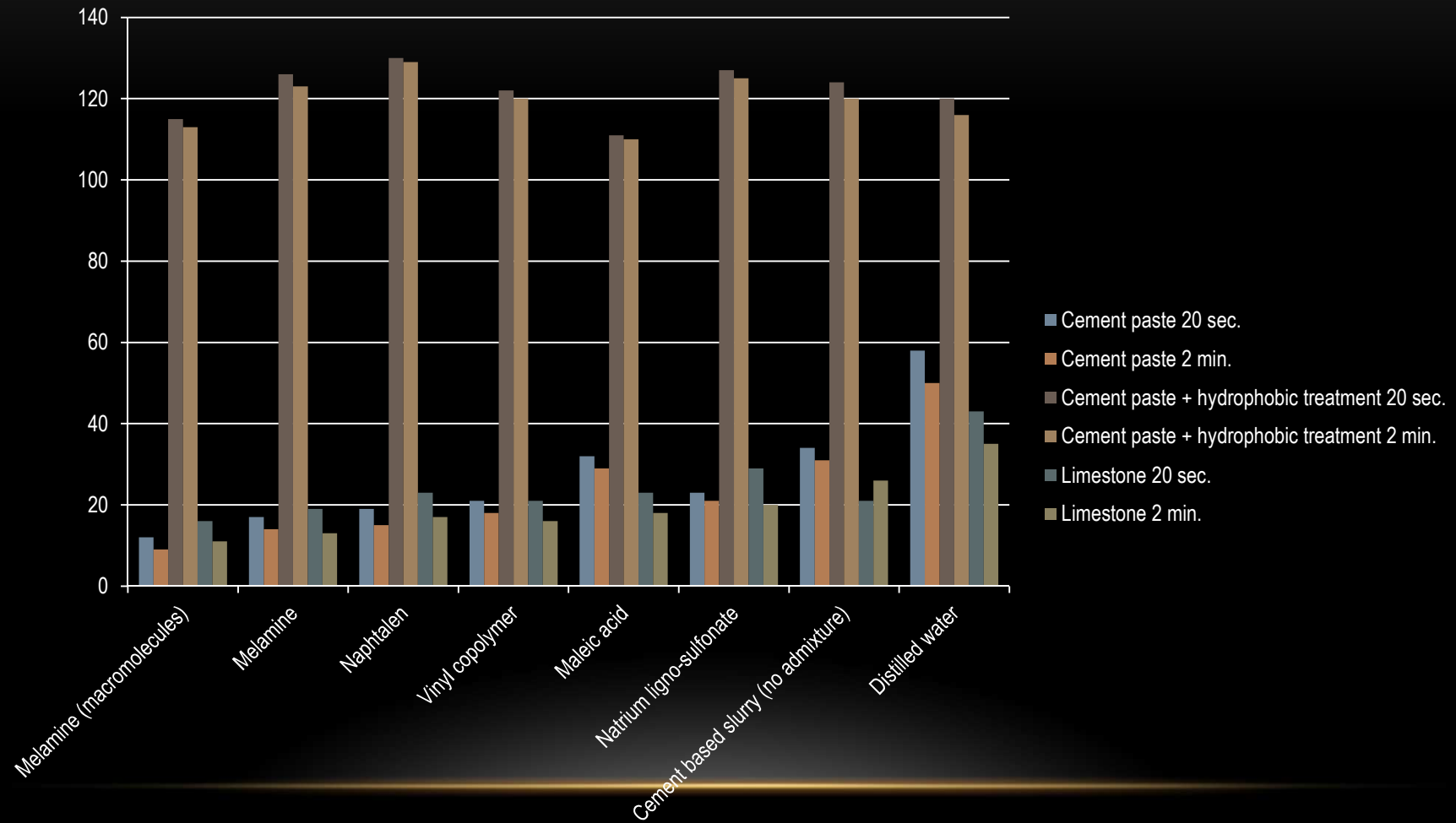


# Angle de contact





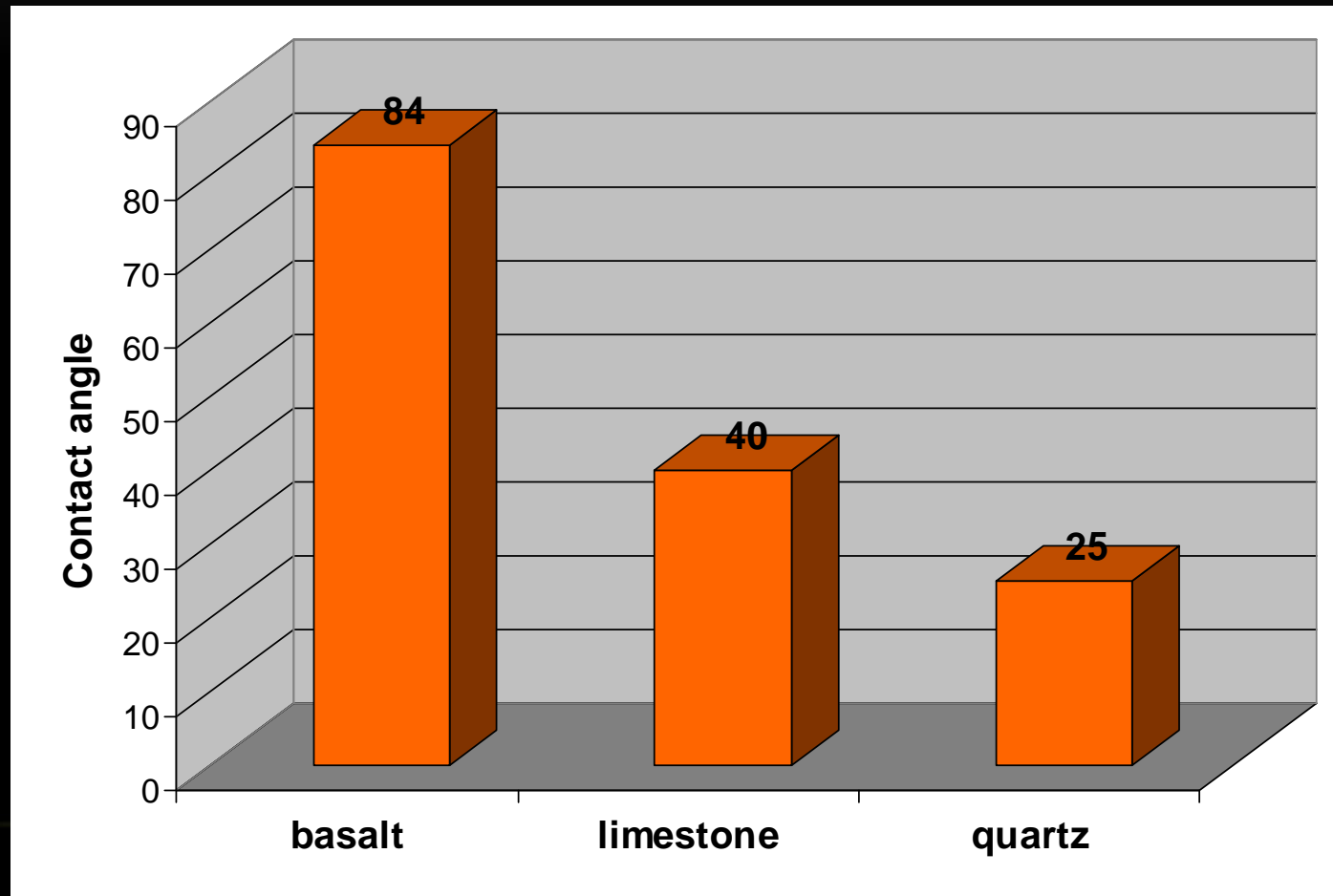
# Angle de contact





# Angle de contact

- Résine époxy sur *granulats* (Fiebrich, 1994)

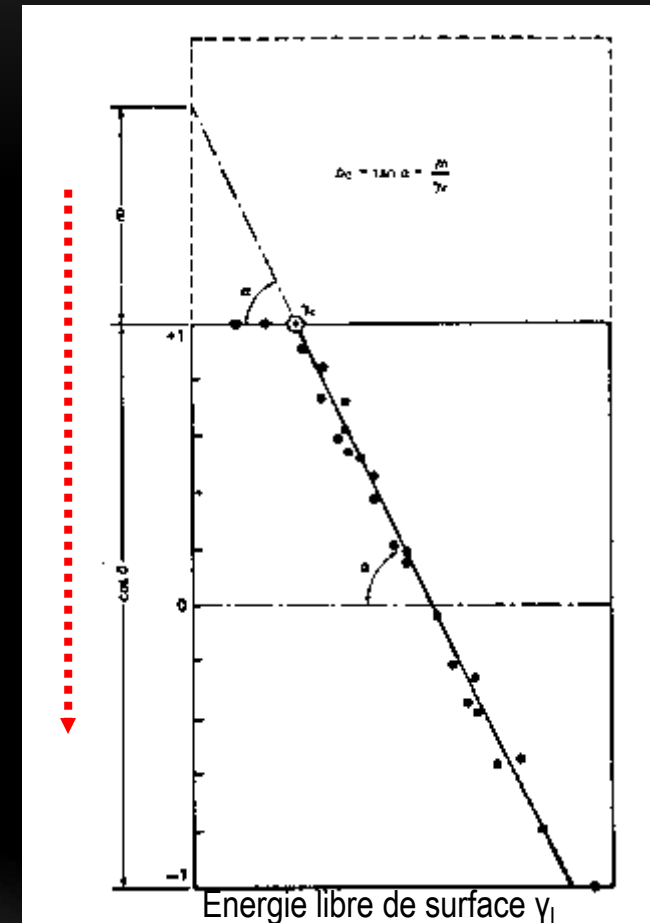




# Energie de surface critique

Energie libre de surface maximum du liquide qui s'étale à la surface d'un solide

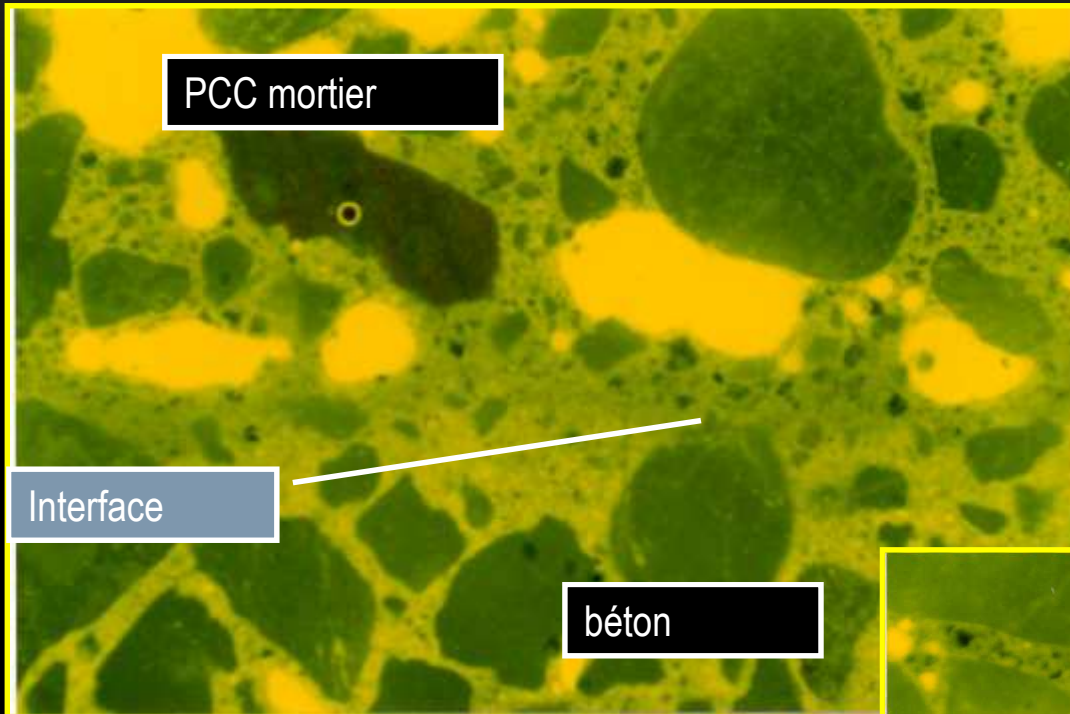
Support	Energie critique de surface (mN/m)
Pâte de ciment	25.5
Calcaire	42.5
Résine époxy (EP)	43-44
Chlorure de polyvynile (PVC)	39
Polyéthylène (PE)	31
Téflon (PTFE)	18.5





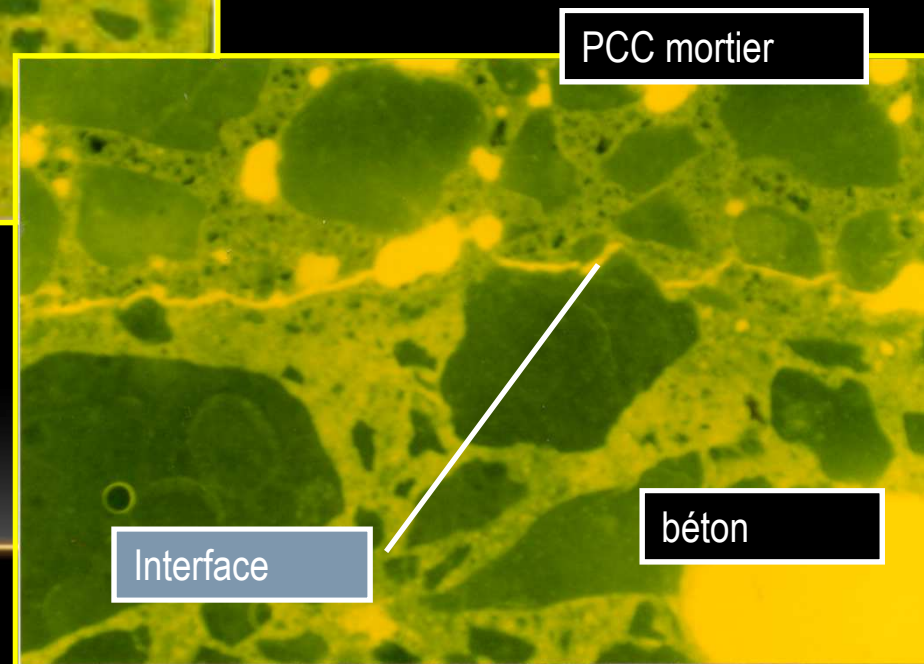
# Applications





PCC mortier de réparation

Adhésion:  $> 2$  MPa



PCC mortier de réparation

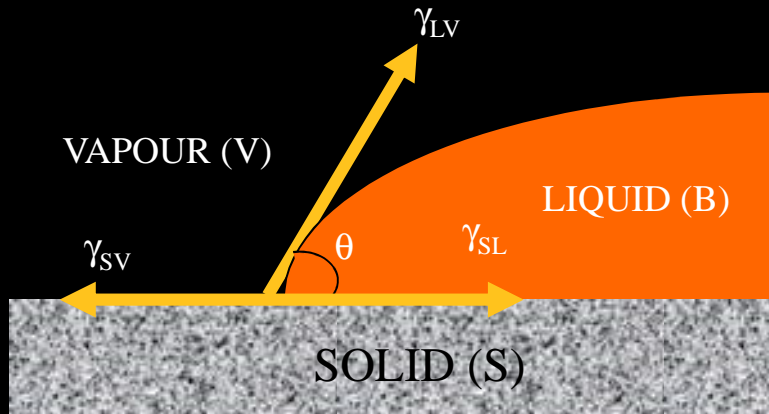
Adhésion:  $< 0.3$  MPa





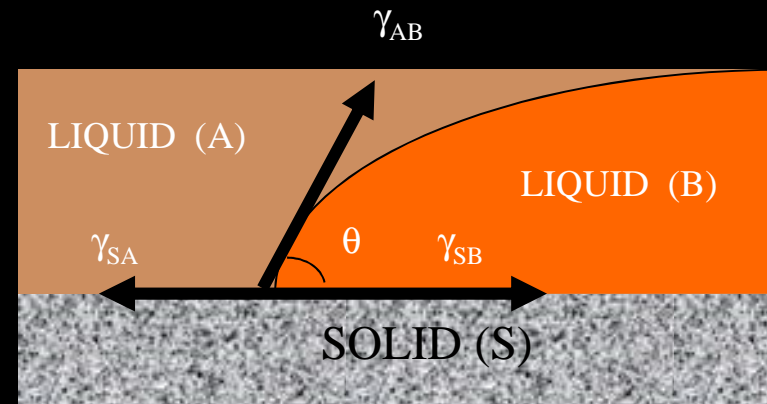
# Effets de l'eau

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SB} + \gamma_{BV} \cdot \cos \theta$$



$$\gamma_{SA} = \gamma_{SB} + \gamma_{AB} \cdot \cos \theta$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_S = \gamma_{SA} + \gamma_A \cdot \cos \theta_A \\ \gamma_S = \gamma_{SB} + \gamma_B \cdot \cos \theta_B \end{array} \right.$$



Equilibre: la différence entre les tensions d'adhésion est inférieure à la tension interfaciale

$$\left\{ \begin{array}{l} \leftarrow \leftarrow \leftarrow \gamma_B \cdot \cos \theta_B - \gamma_A \cdot \cos \theta_A < \gamma_{AB} \\ \leftarrow \leftarrow \leftarrow \gamma_B \cdot \cos \theta_B - \gamma_A \cdot \cos \theta_A > \gamma_{AB} \end{array} \right.$$

Pas d'équilibre: le liquide B expulse le liquide A

$$\left\{ \begin{array}{l} \leftarrow \leftarrow \leftarrow \gamma_B \cdot \cos \theta_B - \gamma_A \cdot \cos \theta_A > \gamma_{AB} \end{array} \right.$$

le liquide avec la tension de surface la plus élevée expulse l'autre de la surface



# Effets de l'eau

## Interfaces sans ( $W_A$ ) et avec ( $W_{AL}$ ) eau

$$W_A = \gamma_A \cdot (1 + \cos \theta_A)$$

A = air

L = eau

Interface	$W_A$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$W_{AL}$ (mJ/m <sup>2</sup> )
Mortier/béton	87.8	-
Acrylique/Béton	74.1	22.7
Acrylique/Acrylique	80.4	53.7
Acrylique/Traitement hydrophobe	52.2	66.7
Epoxy/Béton	79.6	21.8
Epoxy/Epoxy	92.4	53
Epoxy/Traitement hydrophobe	56	42.2



Perte d'adhésion en présence d'eau

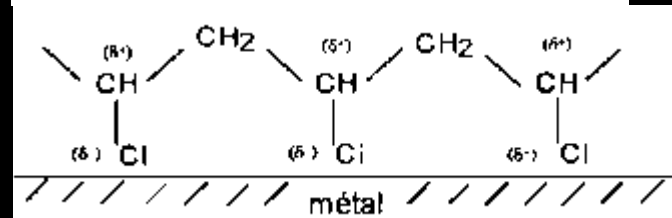
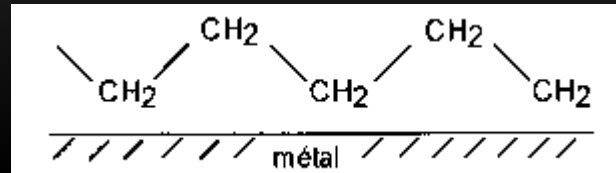


# CONDITION 2 : interactions physico-chimiques

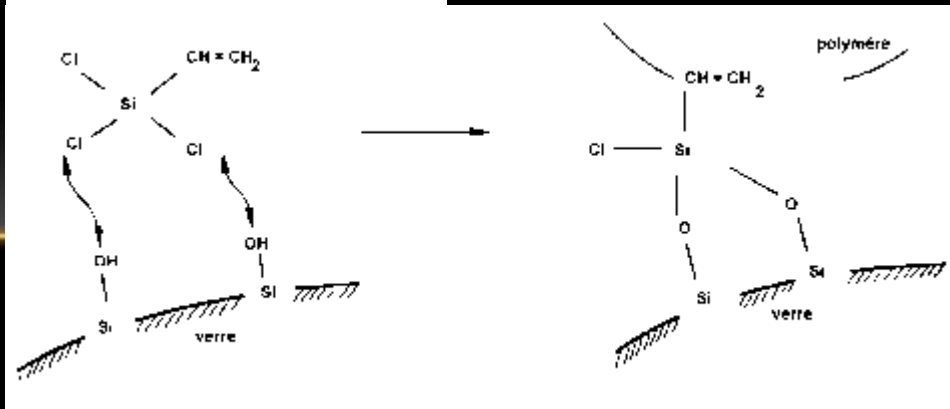
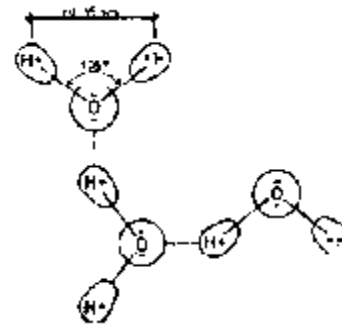
↓  
Van der Waals

↓  
Pont d'hydrogène

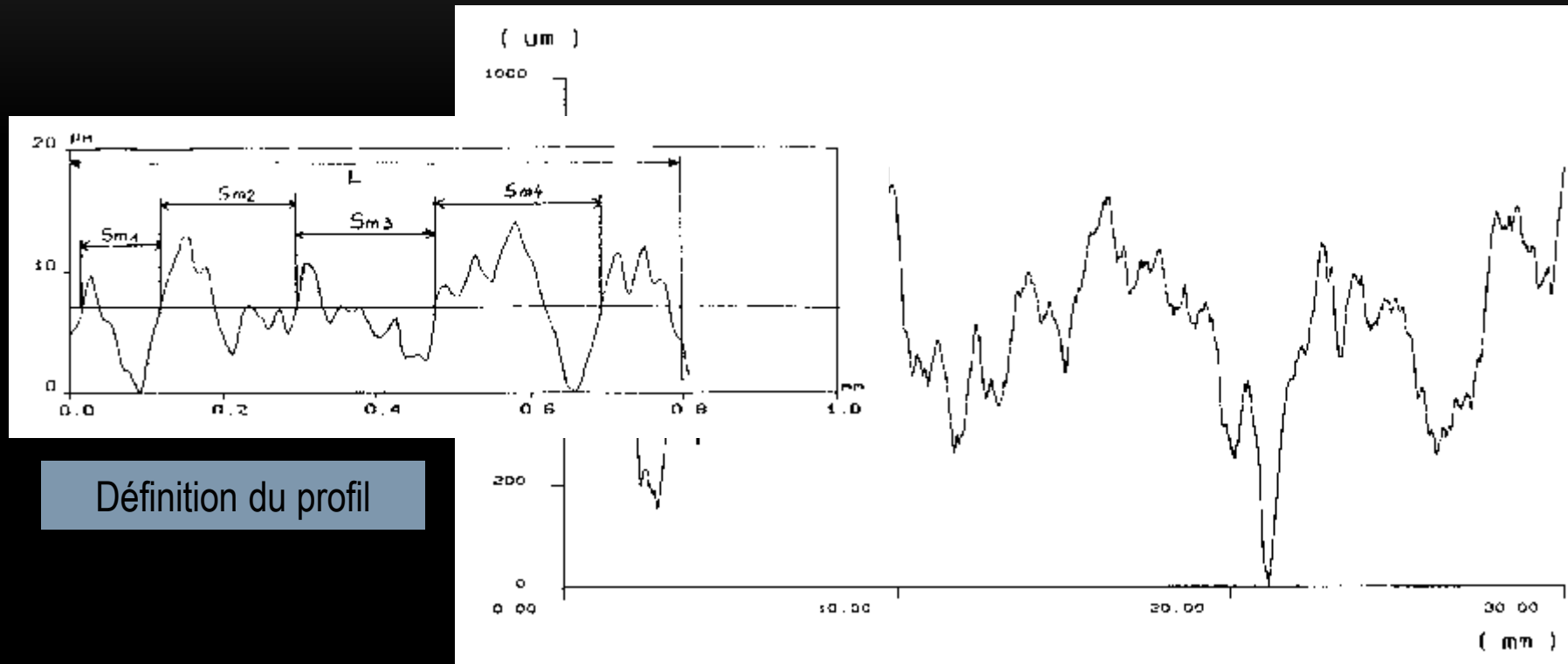
↓  
Liaisons chimiques



↻  
polarisation

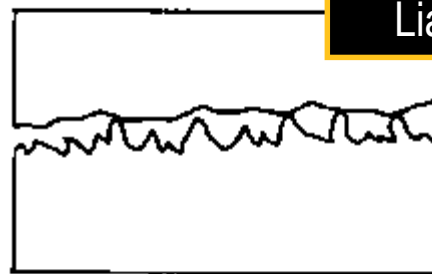


# CONDITION 3 : interpénétration mécanique



Définition du profil

Liaison efficace ?



A



B



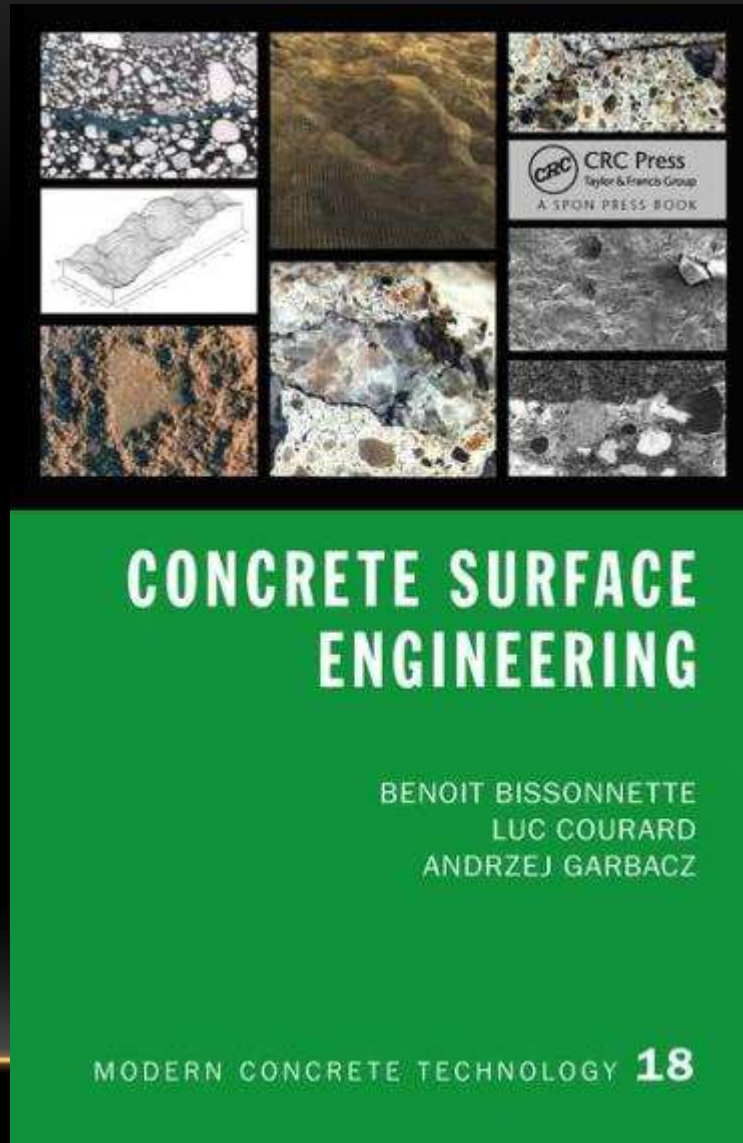
## CONCLUSIONS

- La compatibilité entre un support en béton et un système de réparation se décline en termes de déformations, de propriétés chimiques et électrochimiques voire esthétiques
- L'adhésion dépend des énergies de surface des liquides et solides en contact
- L'adhésion est affectée par la présence d'eau, d'huile, de poussière, etc.
- Le contact est indispensable pour une bonne adhésion



## CONCLUSIONS

- Livre sur l'ingénierie des surfaces en béton





## REMERCIEMENTS

- Programmes de coopération scientifique des gouvernements du Québec, de Wallonie-Bruxelles et de Pologne (2001-2016)
- *Concrete Research Council* de l'American Concrete Institute (ACI)
- Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG)
- Fonds de Recherche Québécois sur la Nature et les Technologies (FRQNT)
- U.S. Bureau of Reclamation (USBR)
- *Chaire CRSNG sur la Réparation durable et l'entretien optimisé des infrastructures en béton* à l'Université Laval (BASF, Euclid, Holcim, Hydro-Québec, Kerneos, King Packaged Materials, Lafarge, Ministère des Transports de Québec, Ville de Montréal, Ville de Québec, W.R. Grace & Co.)



# MERCI!

