

Pourquoi certaines réparations échouent-elles?

Un problème de compatibilité

Luc COURARD



***Journée FEREB
Liège, 12 février 2015***





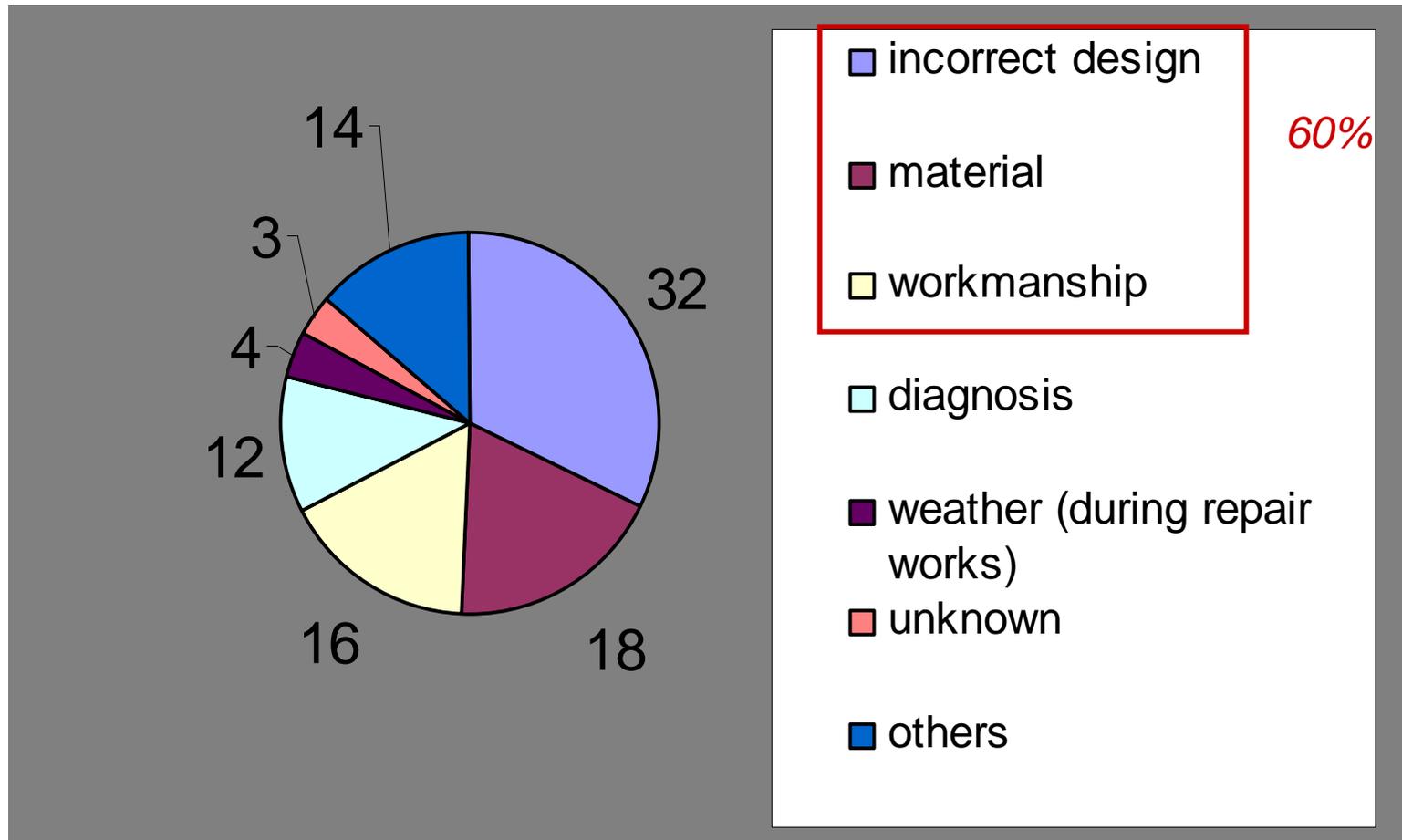
Skaryszewski Park, Warsaw





Causes des échecs des réparations *(Tilly, 2004)*

50% des réparations échouent après 5 ans



The reliability and durability of a repaired concrete substrate and its remaining service life depends on the behavior of the repair material, which is controlled by the **compatibility** between the two materials making up the repair system.

(Czarnecki, 2004)

... the heterogeneity of the components in a composite repaired structure requires an **understanding of the interaction** of the existing materials and the repair materials ...

(Vaysburd et al., 2004)

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

Paramètres affectant la qualité de la réparation

(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
predominants



**Méthode de préparation
du béton support**

Absence de laitance

**Propreté avant placement
de la réparation**

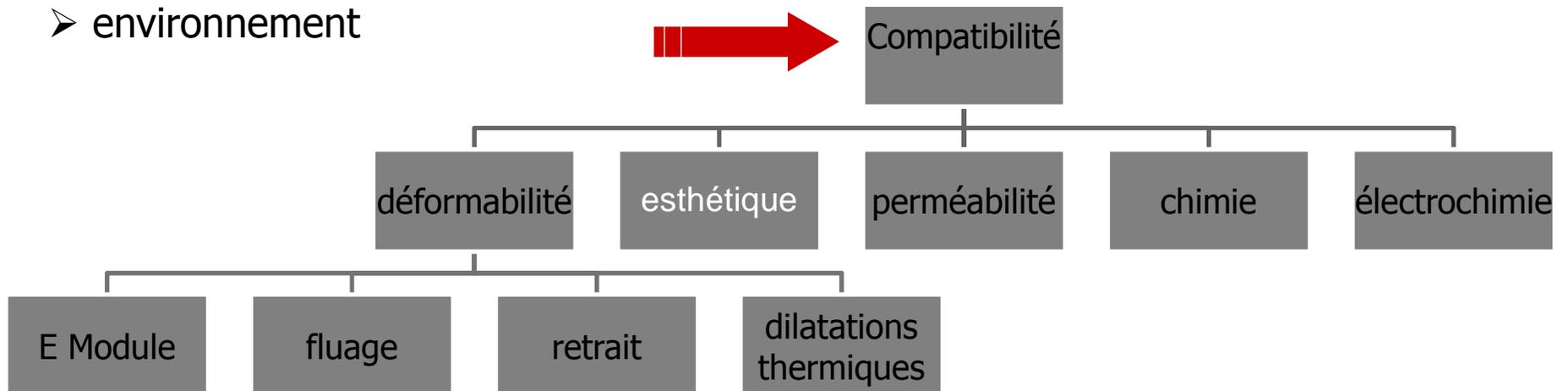
**Compaction du produit de
réparation**

**Cure du produit de
réparation**

Principes de compatibilité *(Bissonnette et al., 2004)*

... 3 éléments:

- substrat
- matériau de réparation
- environnement



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 HSR
 - 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.

Réparations isolées (« rapiéçage »)

- Les réparations isolées peuvent être associées à deux problématiques différentes
 - béton d'origine détérioré ou de mauvaise qualité: la réparation de la partie endommagée est généralement satisfaisante
 - problématique de corrosion, deux possibilités:
 - *béton contaminé*: lorsque la corrosion est causée par la présence de sel ou autre contaminant, la réparation localisée risque de créer une zone anodique en périphérie de la zone réparée (souvent le cas des dalles)
 - *mauvais recouvrement*: une réparation qui permet de recouvrir convenablement les aciers pourrait être efficace (durable)

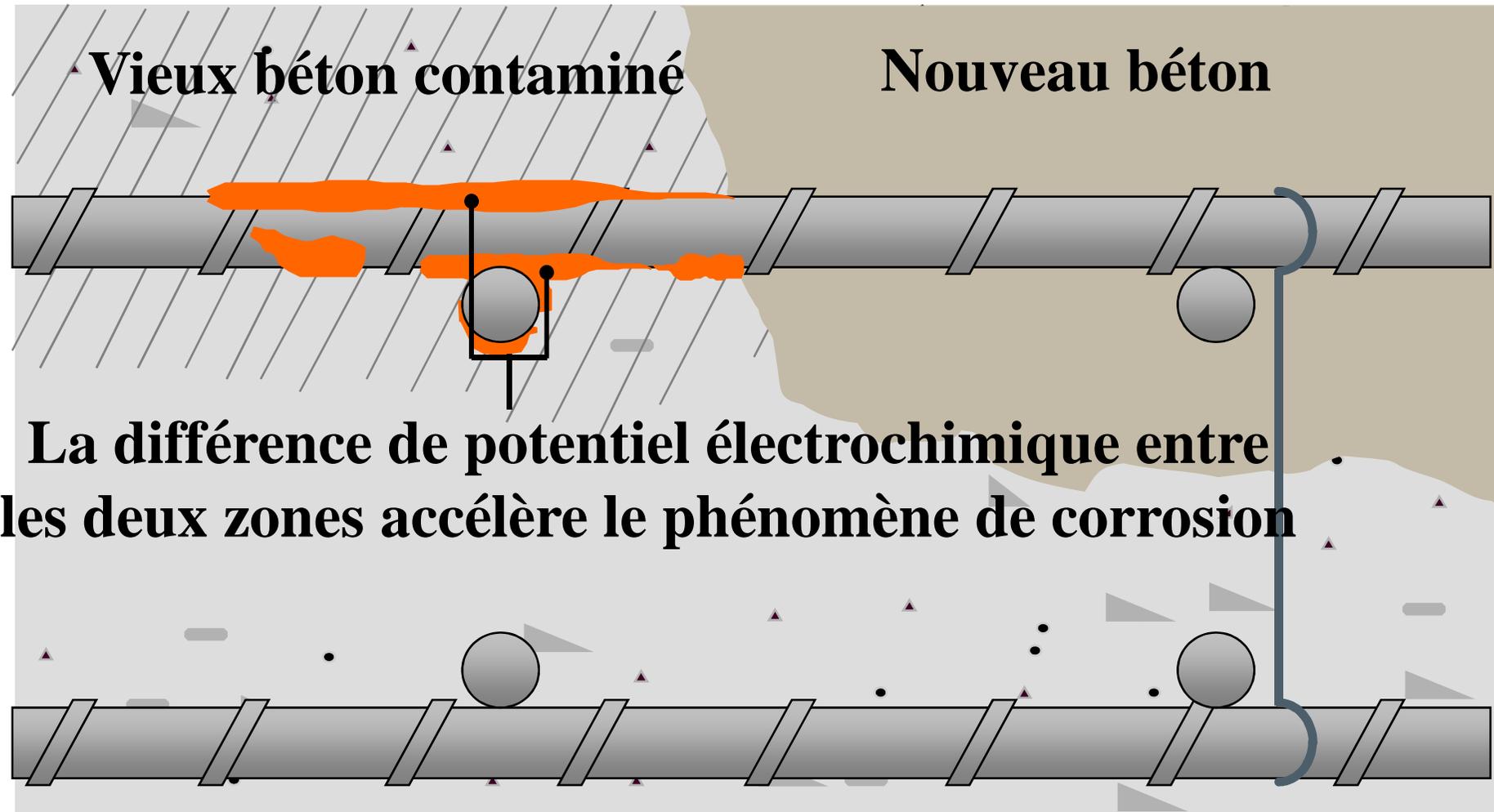
Réparations isolées (« rapiécage »)

- Face à une problématique de corrosion, le problème peut être déplacé par une réparation isolée



(ERS A06 B. Bissonnette, 2006)

Réparations isolées (« rapiéçage »)



(ERS A06 B. Bissonnette, 2006)

Réparations isolées (« rapiéçage »)

- La corrosion autour de la réparation a accéléré la corrosion dans la partie adjacente et causé le décollement

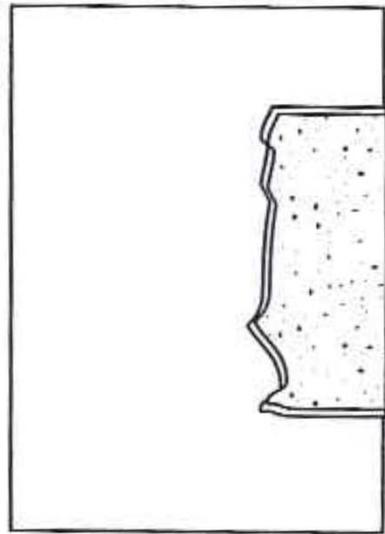


Compatibilité dimensionnelle

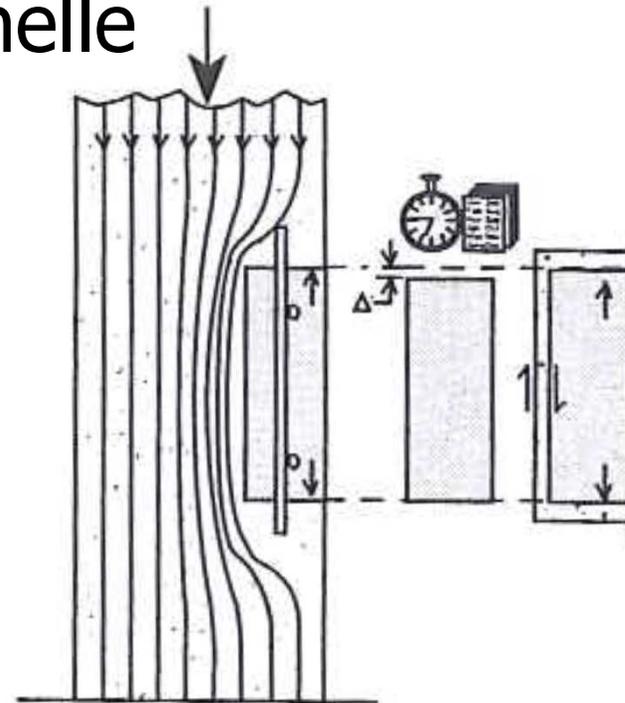
- Facteurs influençant la stabilité dimensionnelle
 - Retrait de séchage
 - Coefficient de dilatation thermique
 - Module d'élasticité
 - Fluage
- Changements volumétriques → cisaillement aux interfaces

Principes de compatibilité

- Compatibilité dimensionnelle
 - Décollement
 - Fissuration



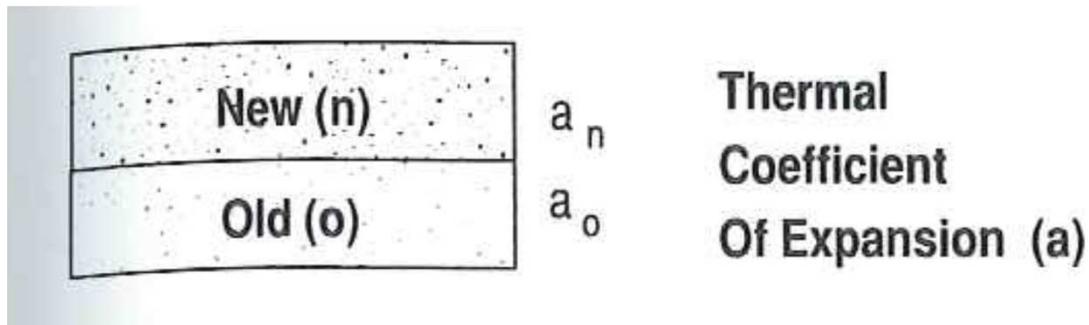
Délamination et perte d'adhérence



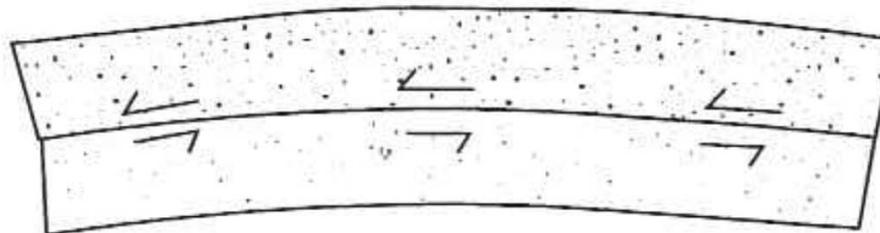
Retrait de séchage → fissuration et réduction de volume → mauvais transfert de charge

Compatibilité dimensionnelle

- Coefficient de dilatation thermique



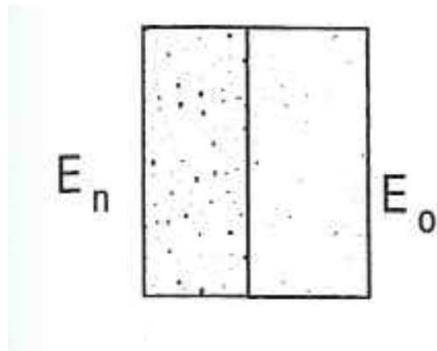
If $a_n > a_o$
or $a_n < a_o$



Shear bond is stressed.

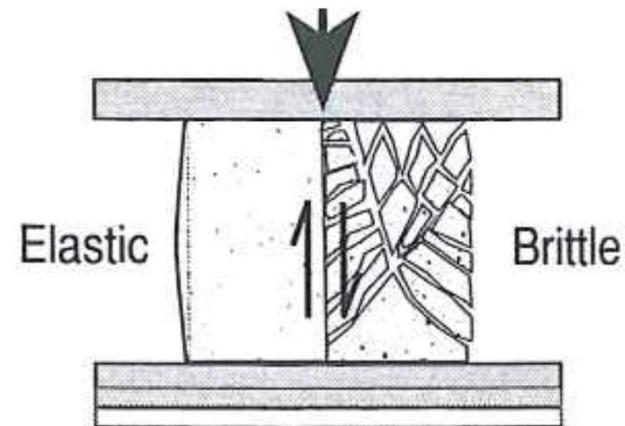
Compatibilité dimensionnelle

- Module d'élasticité



Modulus Of
Elasticity (E)

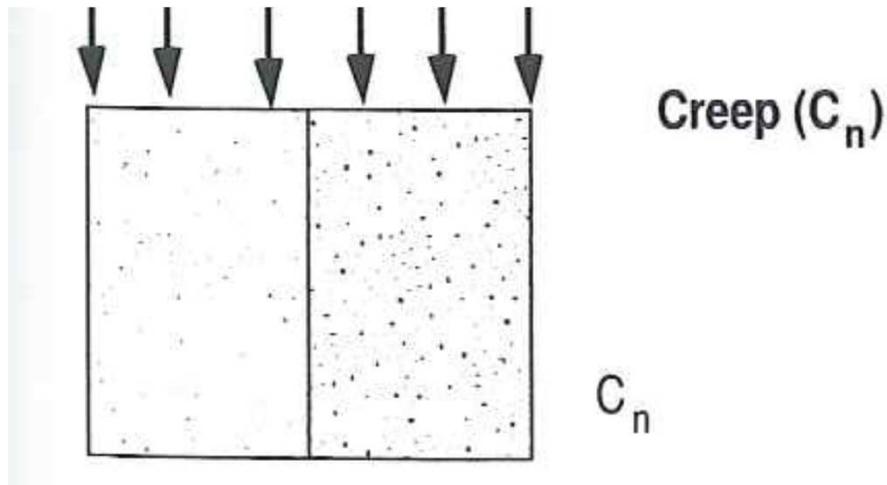
If $E_n > E_o$
or $E_n < E_o$



Shear bond is stressed.
Brittle material may become overstressed.

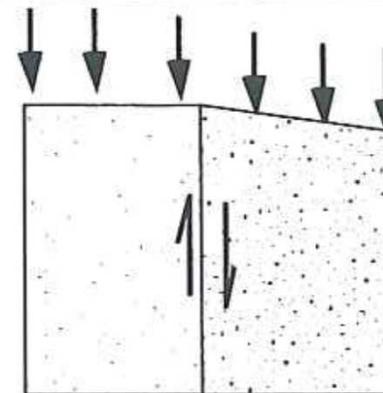
Compatibilité dimensionnelle

■ Coefficient de fluage



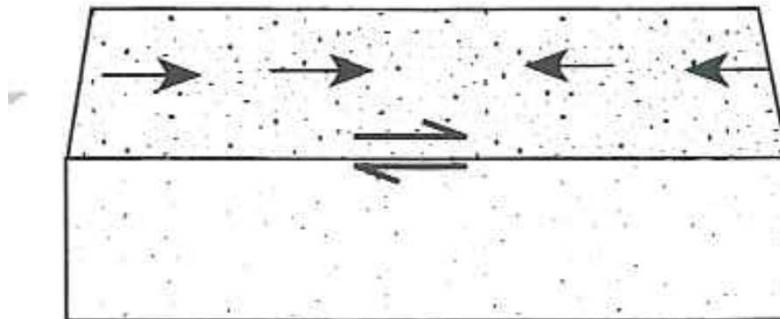
If $C_n > 0$

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



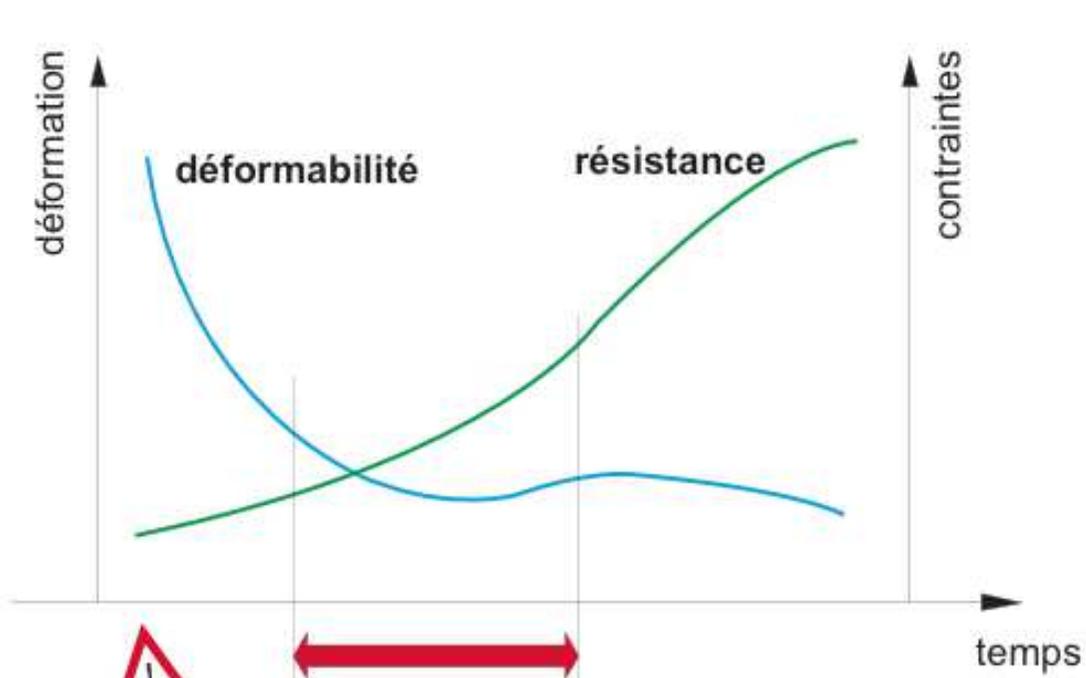
Le retrait au séchage est un des principaux paramètres contrôlant la durabilité des réparations de surface



Examples of Restrained Drying Shrinkage



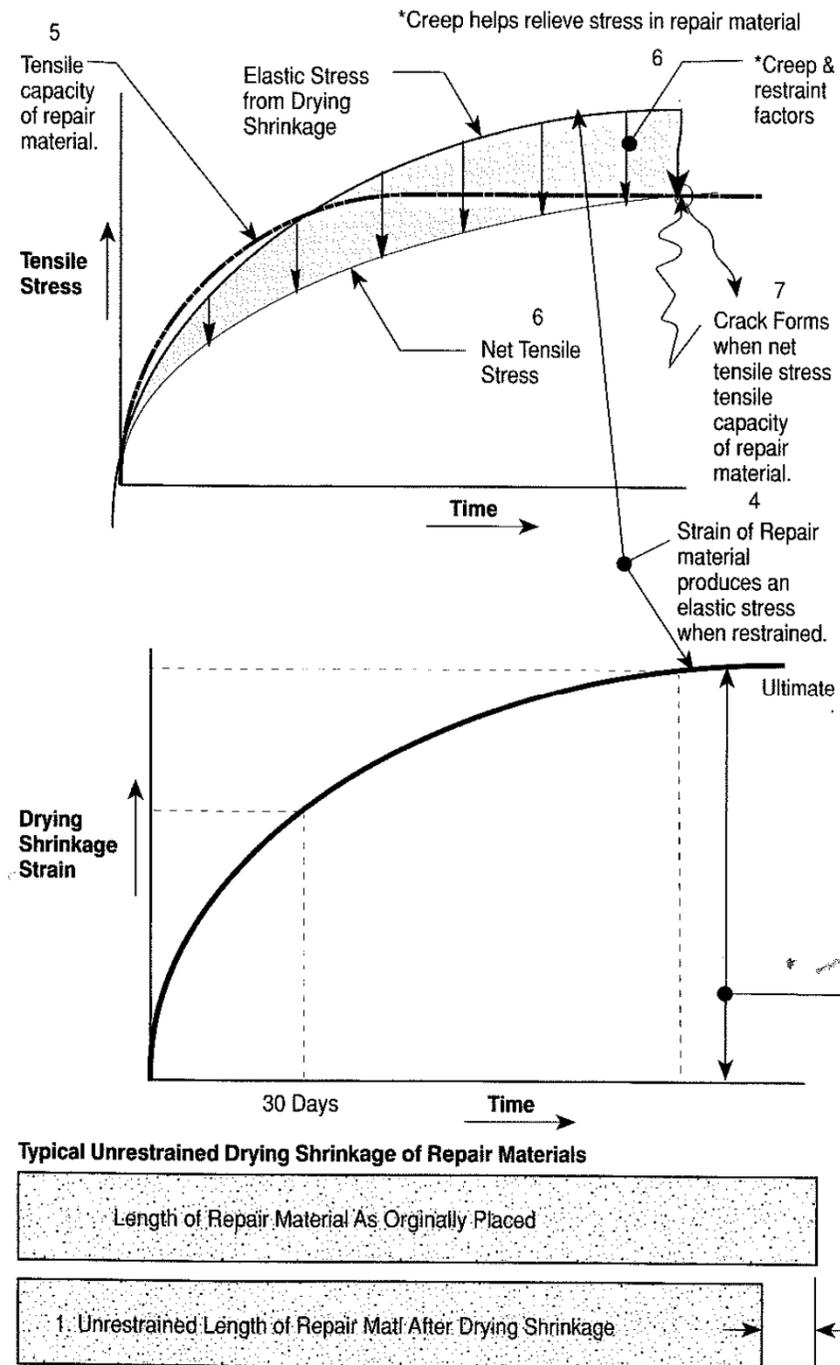
Déformation - retrait



PHASE CRITIQUE
déformabilité décroissante + résistance peu développée = risque de fissuration

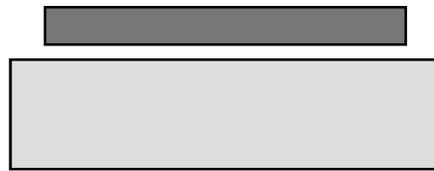
Compatibilité dimensionnelle

- Effet du retrait de séchage sur la fissuration des réparations minces

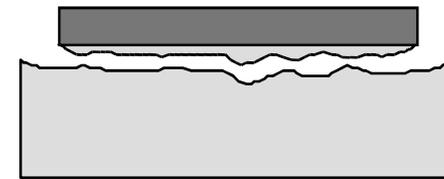


Compatibilité dimensionnelle *(Bissonnette, 2004)*

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



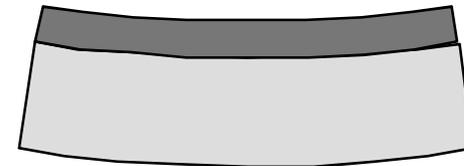
a) décollement



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

Paramètres de composition	Facteurs environnementaux, géométriques et autres
<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

Choix des matériaux vs retrait de séchage

- Diminuer la quantité d'eau

Water/Cement Ratio

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

Compatibilité dimensionnelle

Choix des matériaux vs retrait de séchage

- 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.

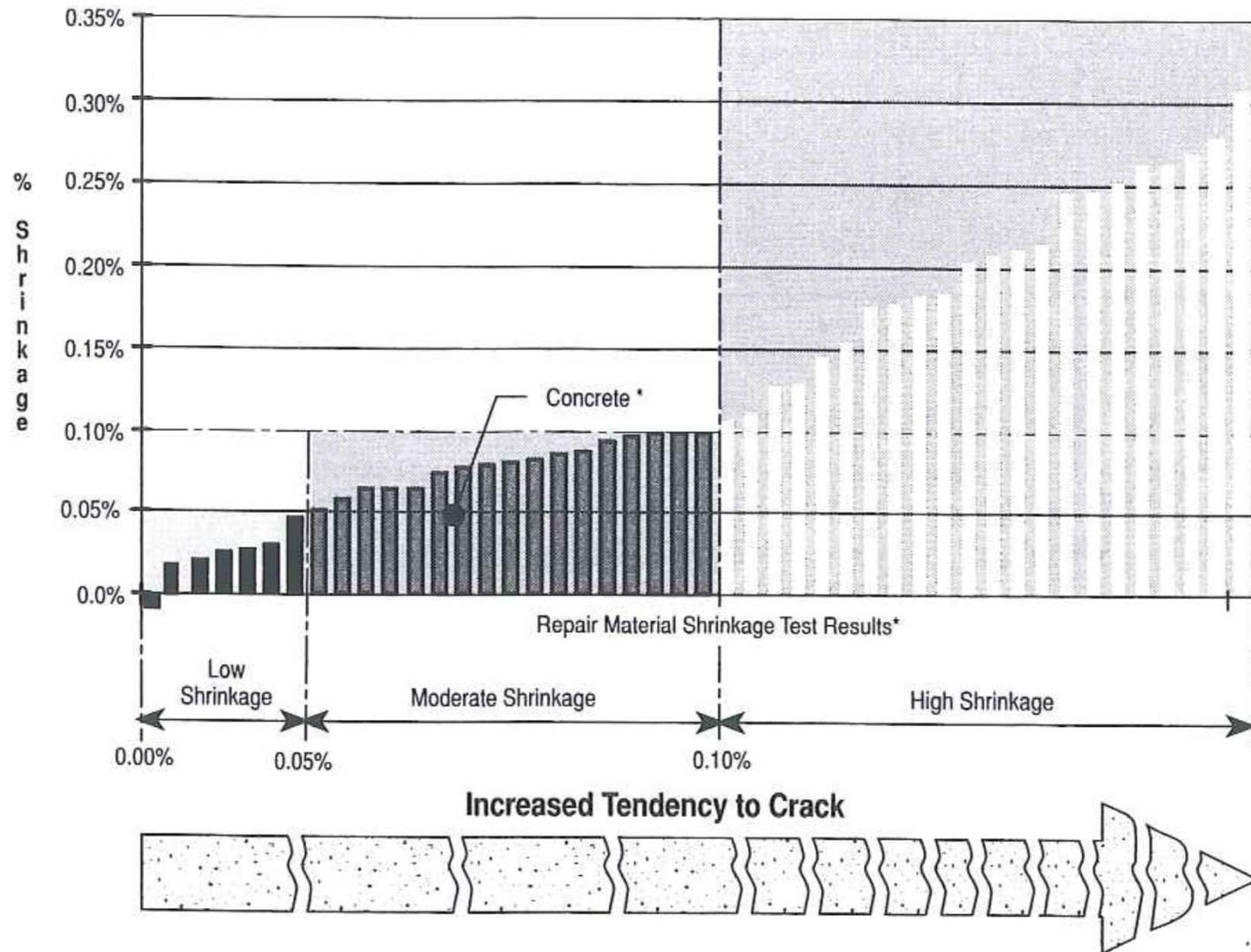
(**) La norme NBN B 15-001 demandait de doubler la durée minimale de cure lorsqu'une résistance à l'usure du béton était requise. Cette recommandation ne figure cependant pas dans la norme NBN ENV 13670-1.

Compatibilité dimensionnelle

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

Compatibilité dimensionnelle

Choix des matériaux vs retrait de séchage



Béton à retrait compensé

- Béton fabriqué avec un liant comportant des agents réactifs à caractère expansif
- Mécanisme
 - Expansion du matériau en cours d'hydratation
 - Retrait de séchage du béton au terme du mûrissement humide

Béton à retrait compensé

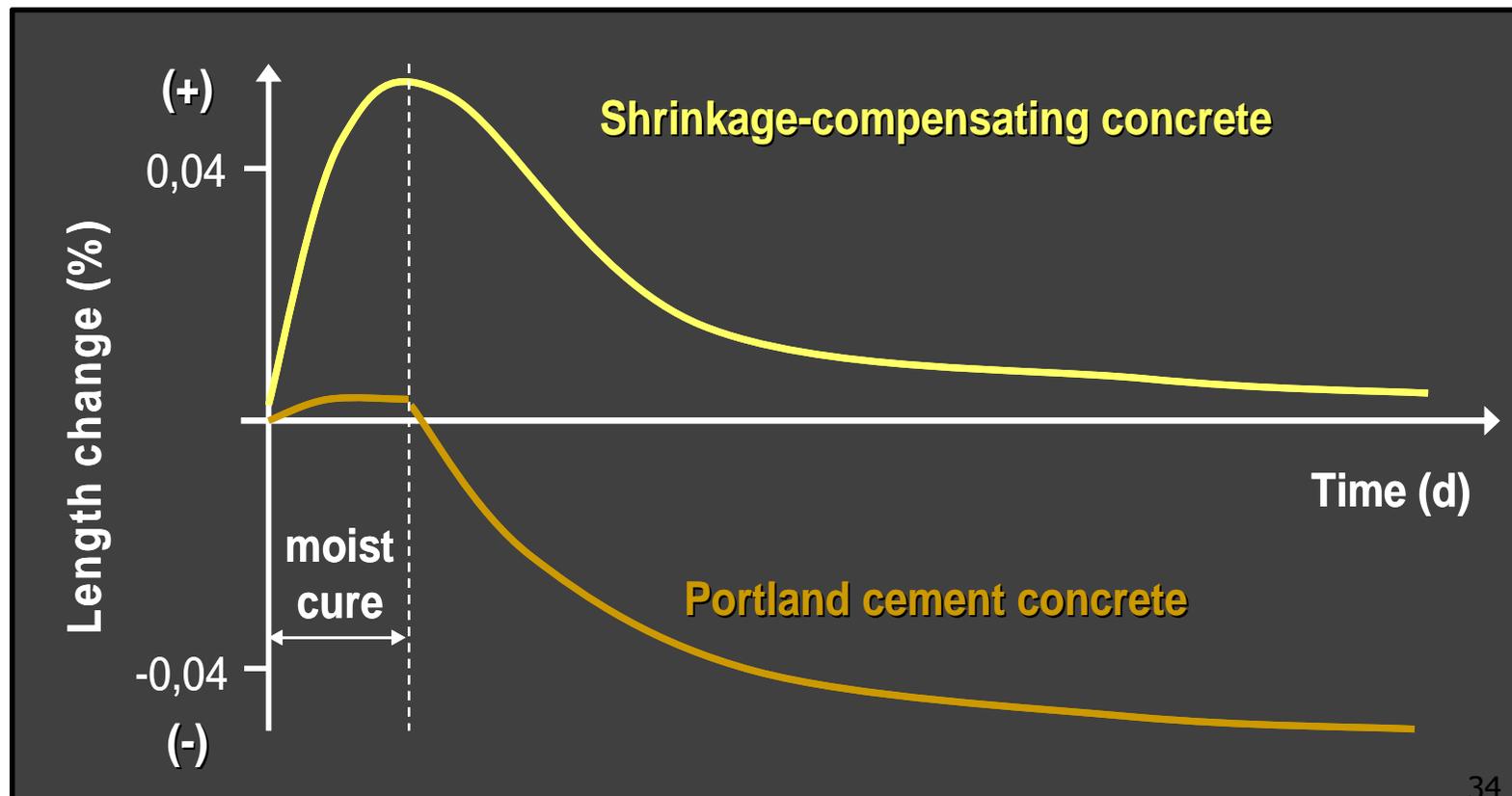
■ Caractéristiques

- Ciment avec agent expansif
 - Type K (dénomination ASTM)
 - Type 10 + agent expansif ajouté au malaxage
 - Type K (sulfoaluminates de calcium)
 - Type G (CA/CO)

- Formation d'un composé expansif en cours d'hydratation pour compenser la manifestation subséquente du retrait
 - mise en compression initiale du matériau
 - diminution progressive de l'état de compression en cours de séchage

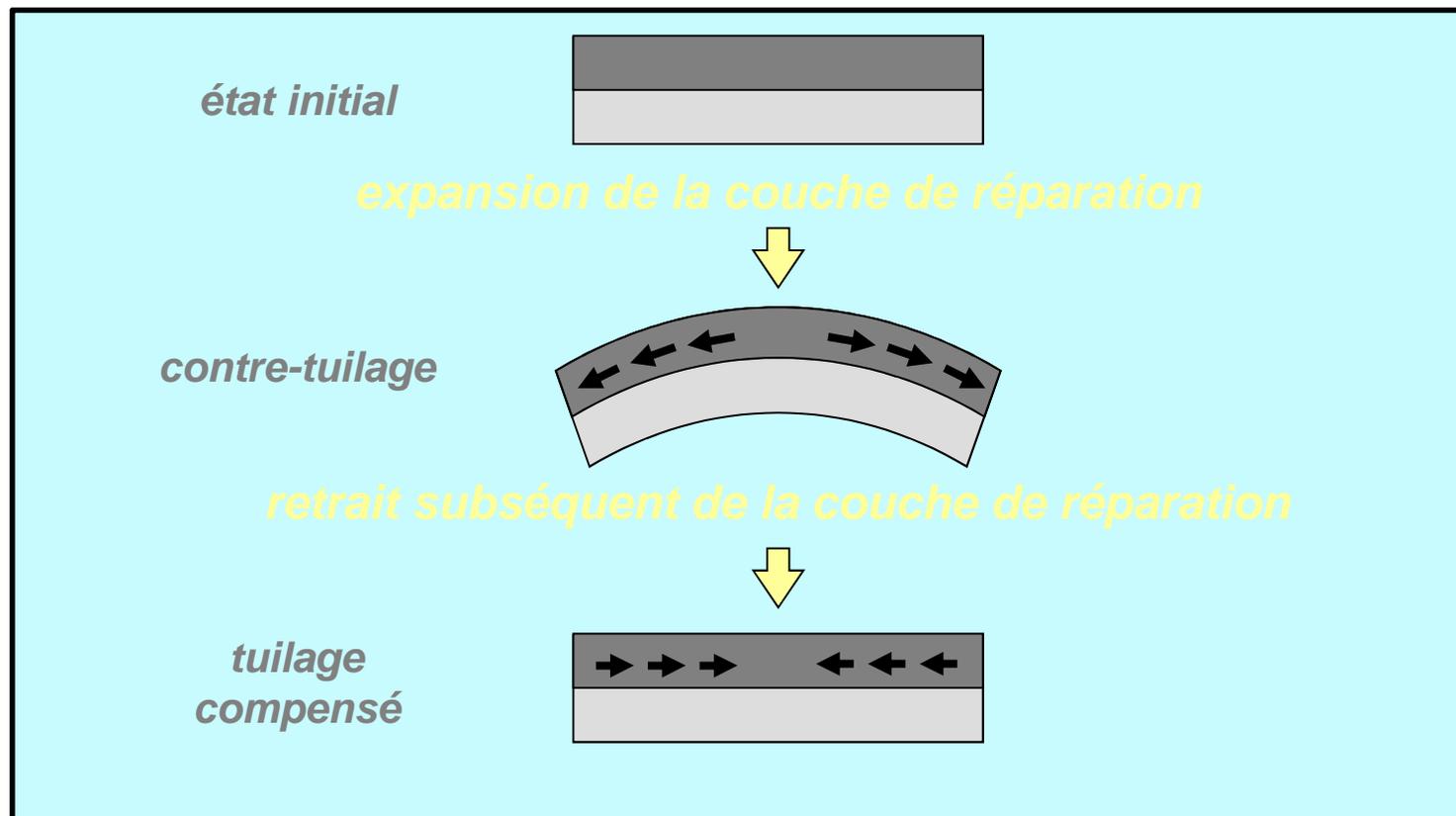
Béton à retrait compensé

- Compensation du retrait: bilan volumétrique nul



Béton à retrait compensé

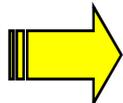
- Efficacité de l'effet de précontrainte chimique: essai de retrait flexionnel sur composite



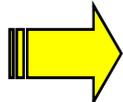
Principes fondamentaux d'adhérence

Compatibilité = ... adhésion (*Deryagin, 1973*)

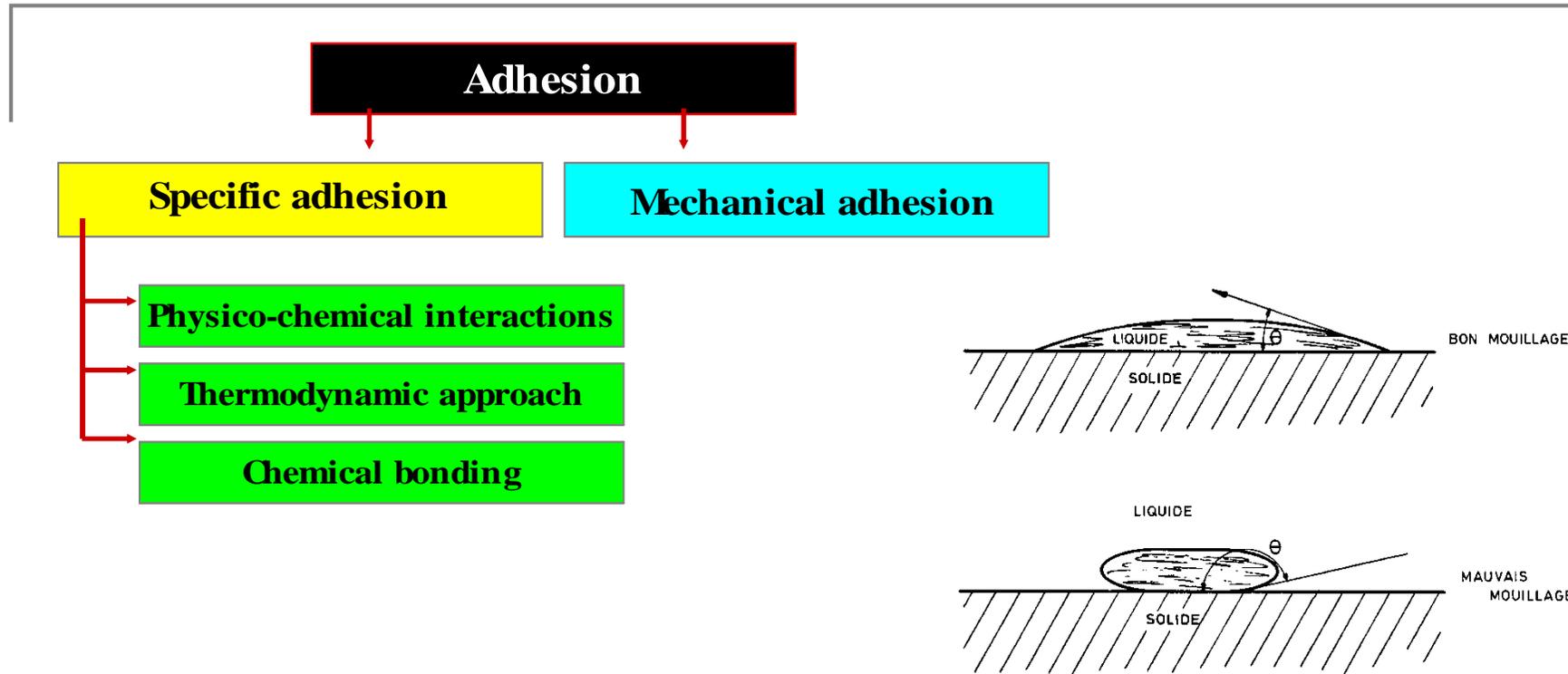
- processus par lequel deux corps sont mis en contact et attachés (liés) l'un à l'autre
- processus de séparation (rupture) d'un lien entre deux corps qui étaient en contact



conditions et cinétique de contact



processus de séparation

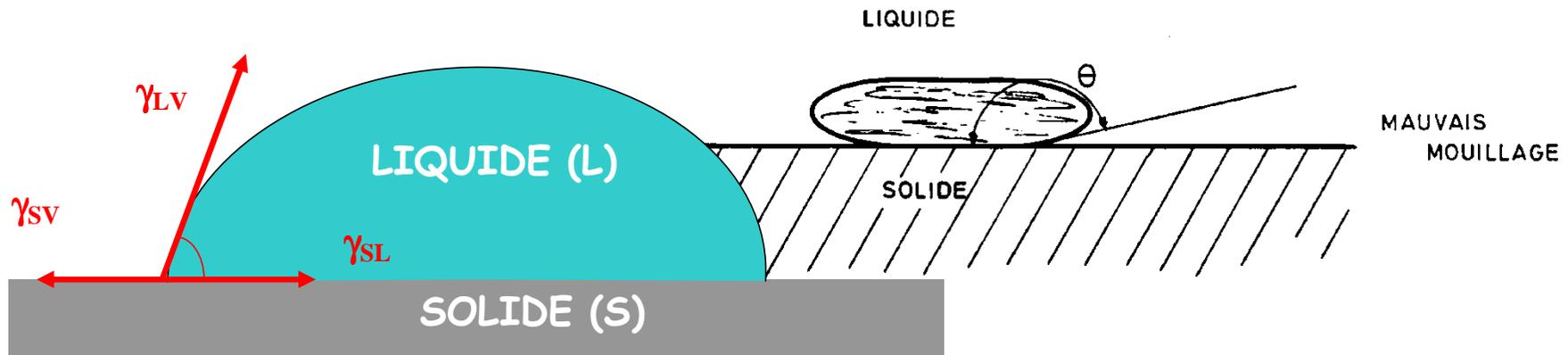
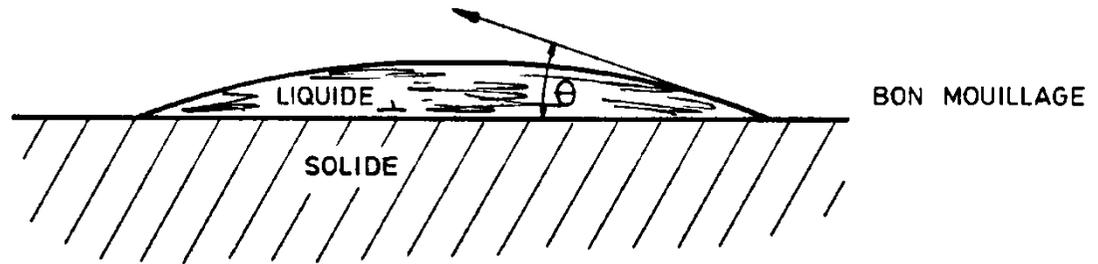


Condition 1 : étalement et mouillabilité

Condition 2 : interactions physico-chimiques

Condition 3 : interpénétration mécanique

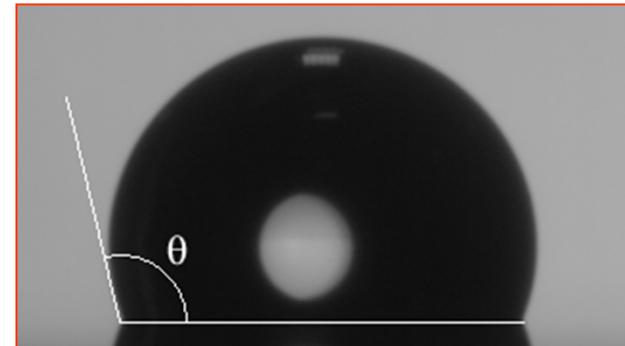
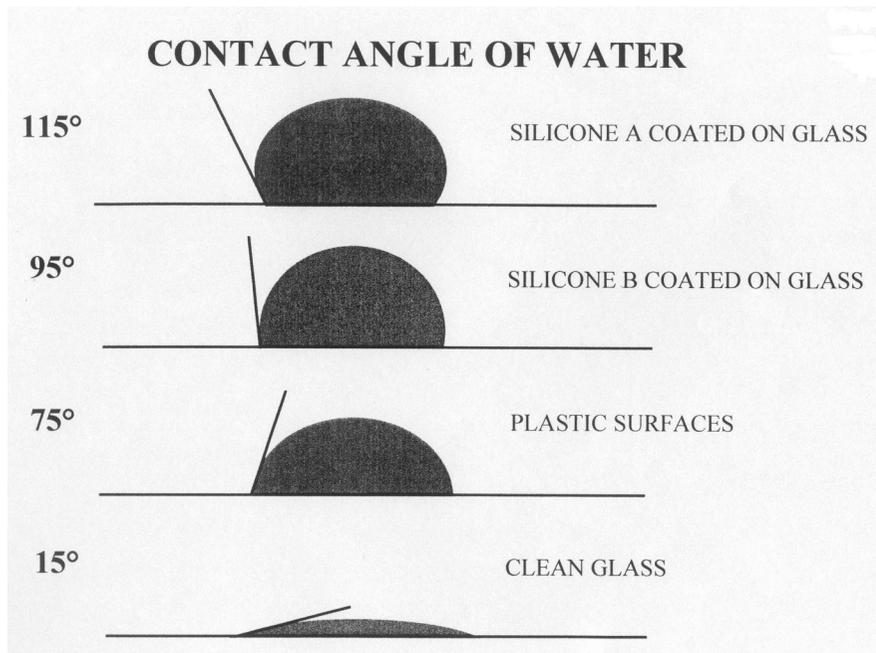
Condition 1 : étalement



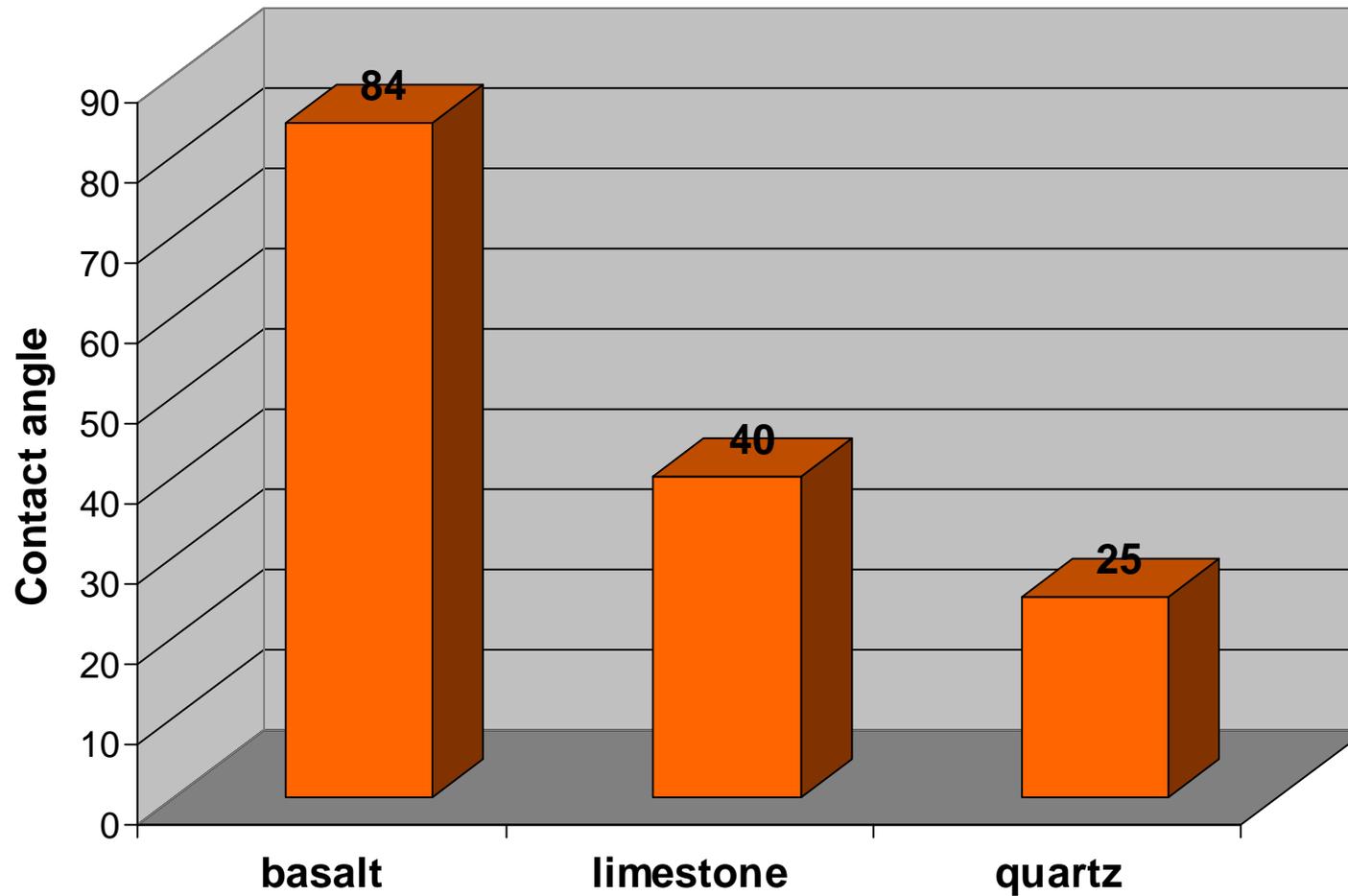
$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$$

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

Angle de contact

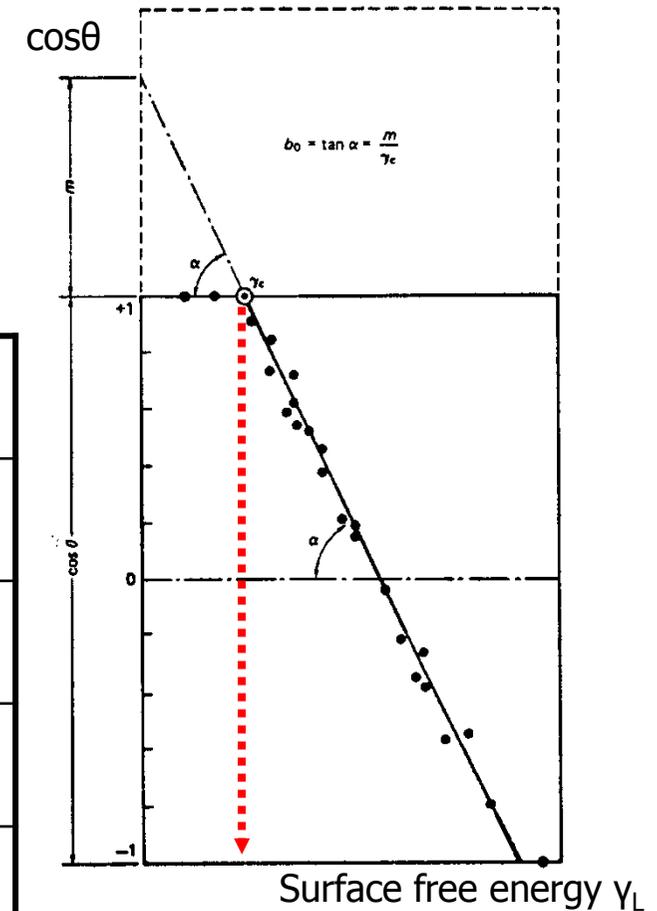


Angles de contact de résine époxy sur granulats *(Fiebrich, 1994)*



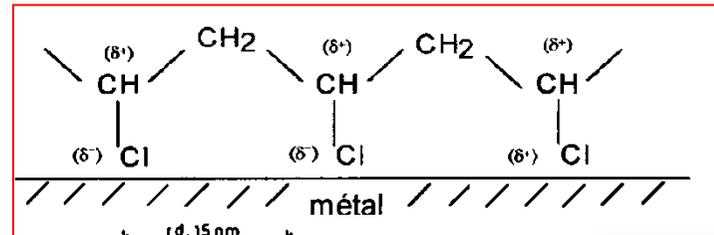
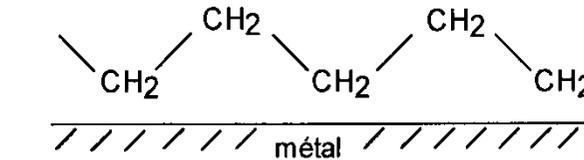
Energie de surface critique: valeur maximum de l'énergie libre d'un liquide pour qu'il s'étale à la surface du solide

Substrate	Critical surface energy (mN/m)
Cement paste	25.5
Limestone	42.5
Epoxy resin (EP)	43-44
PolyVinyl Chloride (PVC)	39
PolyEthylen (PE)	31
PolyTetraFluorEthylen (PTFE)	18.5



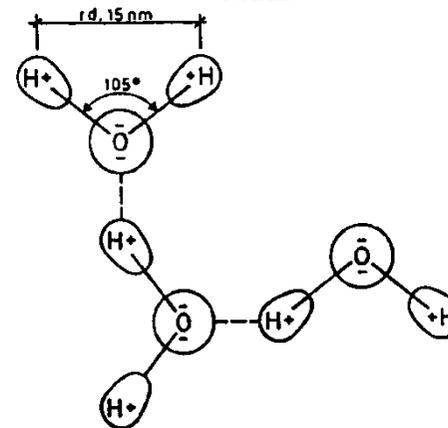
Condition 2 : interactions physico-chimiques

Van der Waals

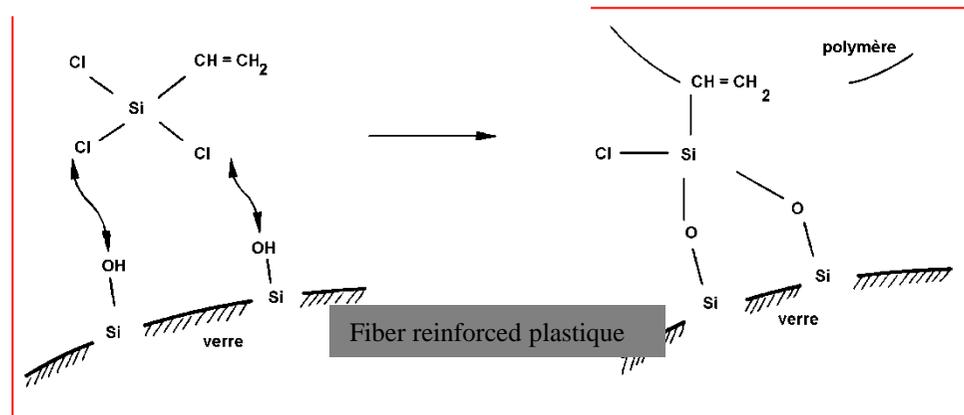


polarization

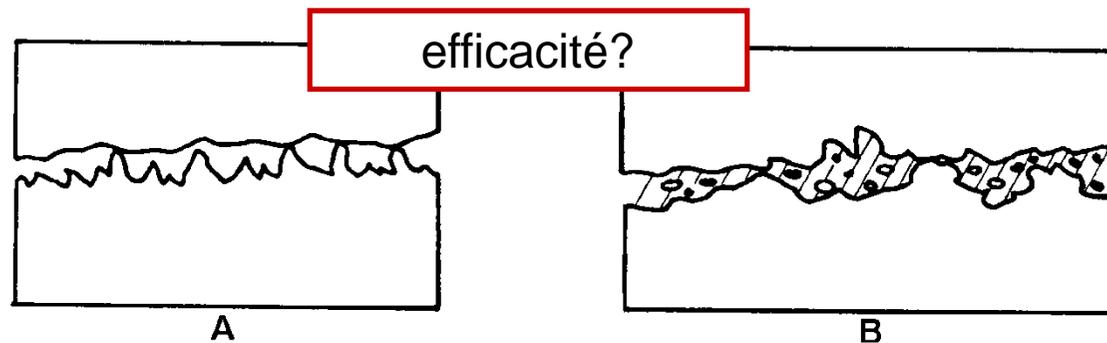
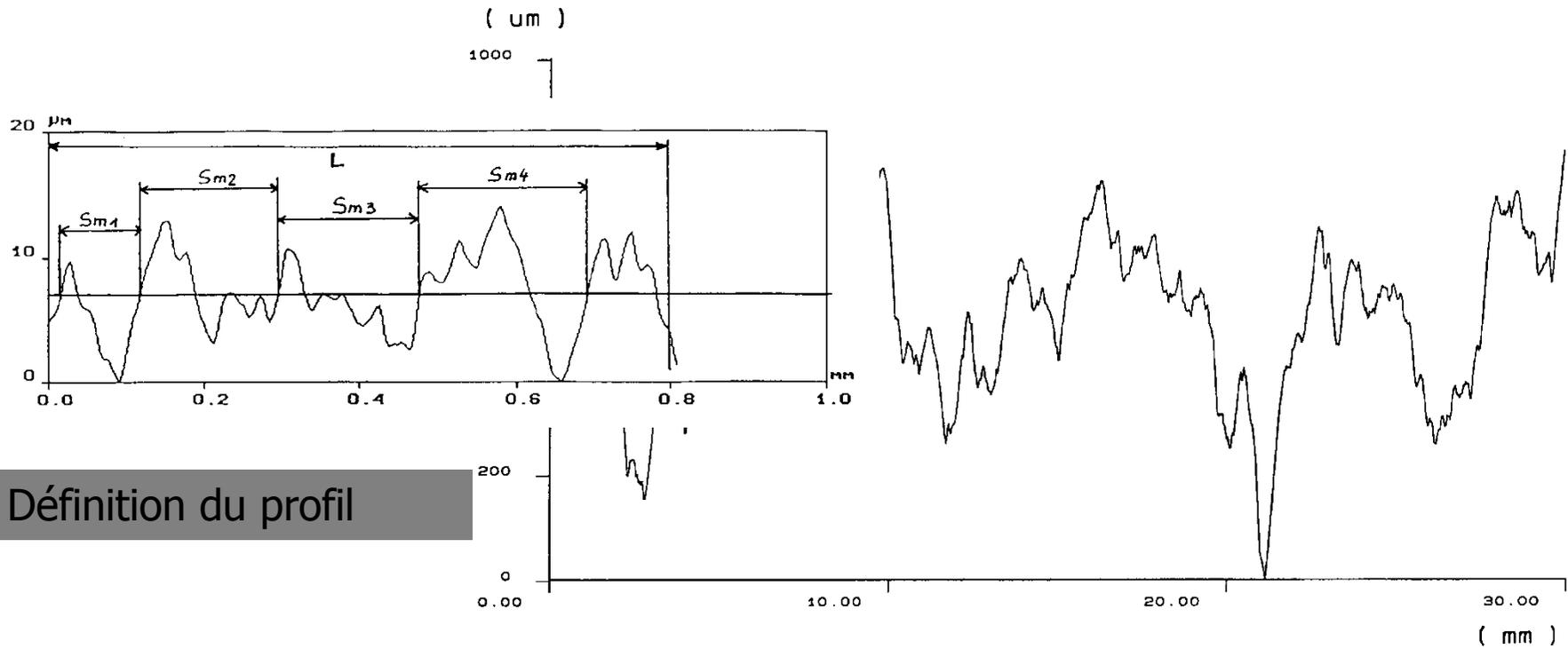
Pont hydrogène



Liaisons chimiques

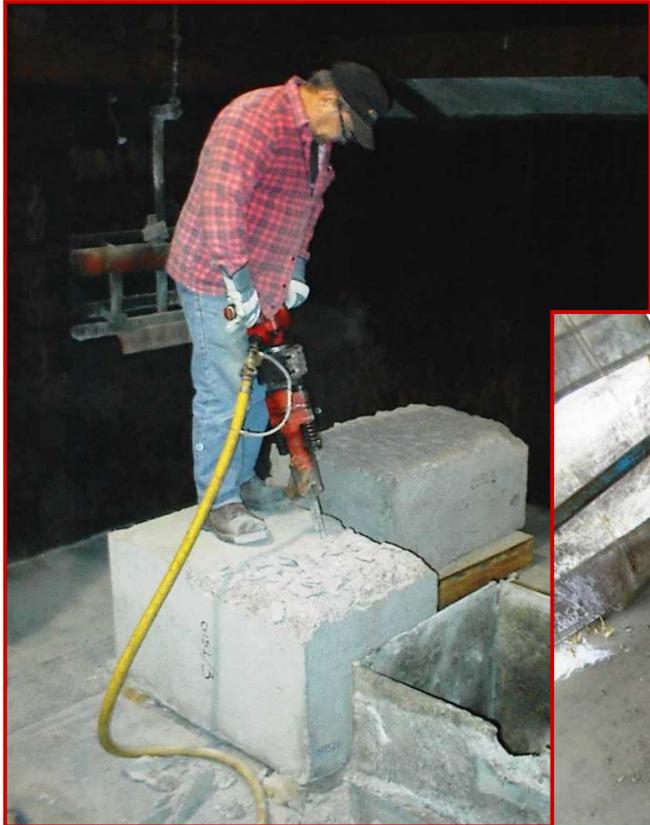


Condition 3 : interpénétration mécanique



Préparation des surfaces: techniques

marteau pneumatique



scarification



hydro-démolition

Conclusions

Conclusions

- Réparer est un problème de compatibilité
- Le retrait au séchage est un des principaux paramètres contrôlant la durabilité des réparations de surface
- Le fluage en traction permet de diminuer l'intensité des contraintes de traction et donc de retarder ou empêcher complètement la fissuration du matériau de réparation.
- Il est toujours préférable de choisir un matériau de réparation possédant un **retrait au séchage le plus faible possible**.
- La compatibilité passe par l'adhérence
- Adhérence: 2 ou 3 partenaires
- Sélection appropriée des matériaux
 - Principes thermodynamiques: nécessaires mais pas suffisants
 - Cinétique de contact: viscosité des matériaux et rugosité de surface
- Environnement: paramètre *(in)contrôlable*
 - Eau, température, humidité relative, vent