

Réparation des bétons: principes, matériaux et techniques

Luc COURARD et Frédéric MICHEL

**Département ArGEnCO
Secteur GeMMe - Matériaux de Construction**

**B52 – Local -1/534
Tél. 04/366.93.50 – Courriel: Luc.Courard@ulg.ac.be**



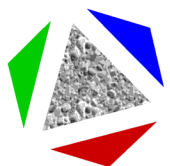
Formation GBB, 26 avril 2016



***... to
avoid
this ...***



Skaryszewski Park



or this ...



Nowy swiat, Warsaw



5 6

3 %

or this ...

Previous Repair

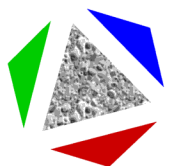


*The reliability and durability of a repaired concrete substrate and its remaining service life depends on the behavior of the repair material, which is controlled by the **compatibility** between the two materials making up the repair system.*

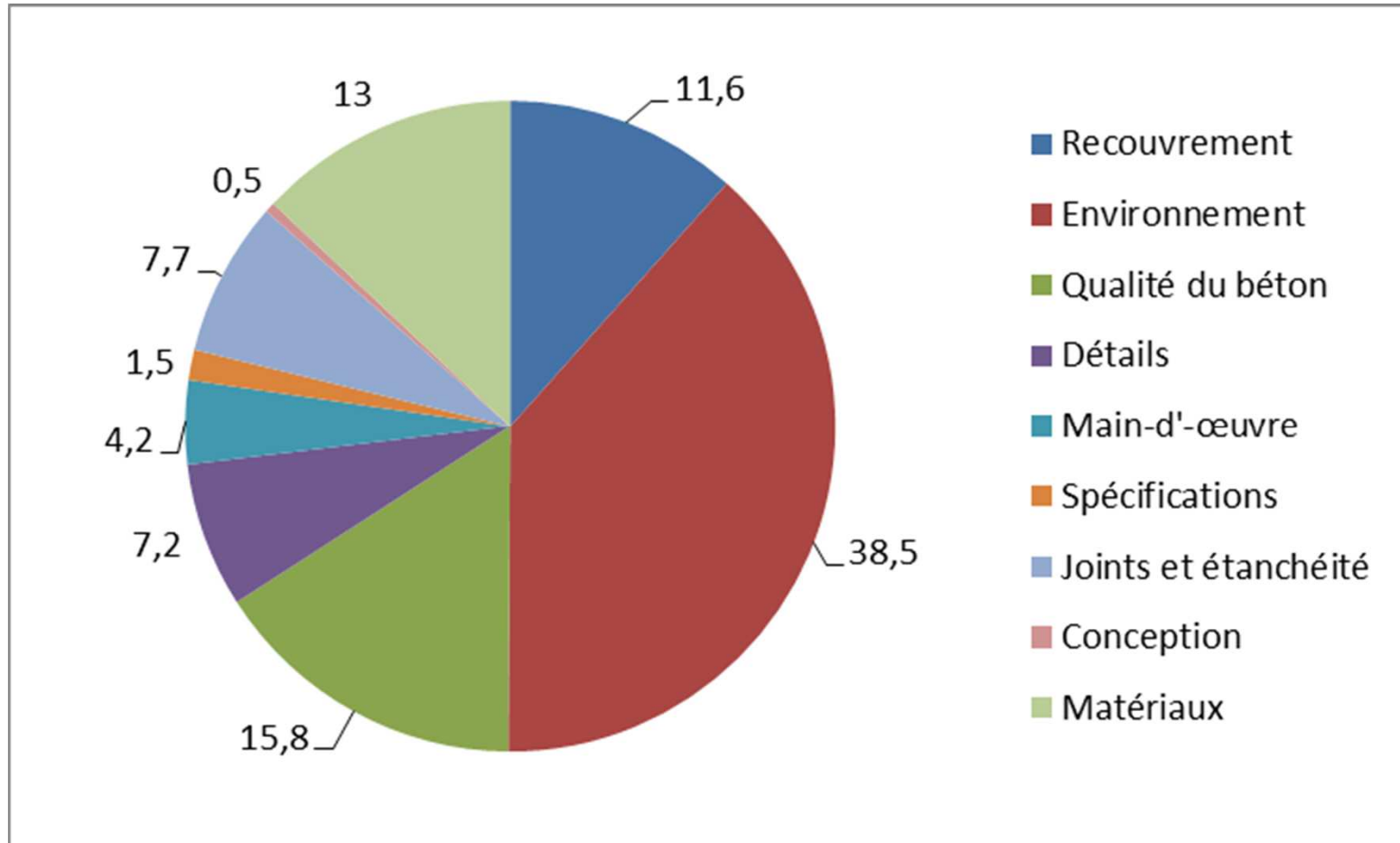
(Czarnecki, 2004)

*... 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)

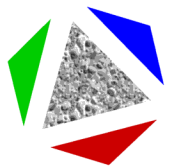


Principes pour une réparation durable



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



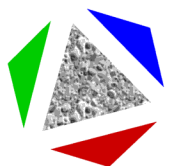
**Méthode de préparation
du béton support**

Absence de laitance

**Propreté avant placement
de la réparation**

**Compaction du produit de
réparation**

**Cure du produit de
réparation**

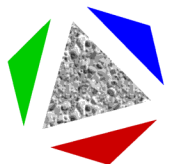
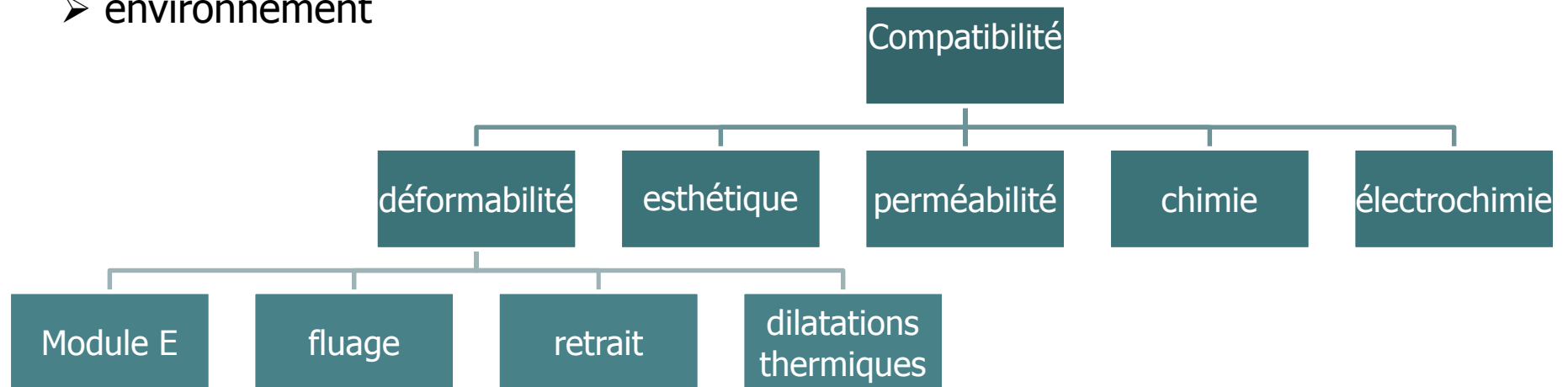


Principes fondamentaux de compatibilité des matériaux

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

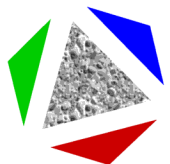
... 3 éléments:

- substrat
- matériau de réparation
- environnement



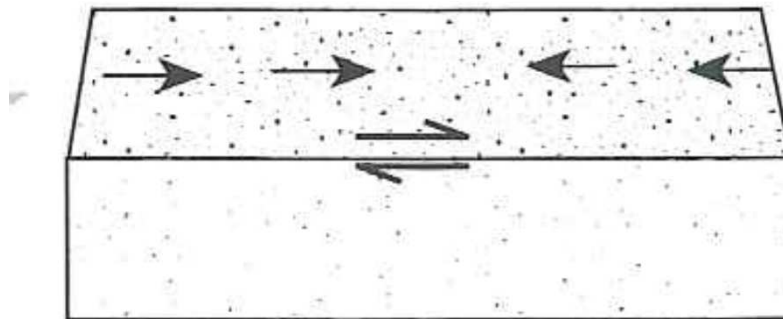
Compatibilité dimensionnelle

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



Compatibilité dimensionnelle

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



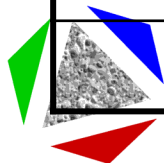
Le retrait au séchage est un des principaux paramètres contrôlant la durabilité des réparations de surface

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

Choix des matériaux vs retrait de séchage

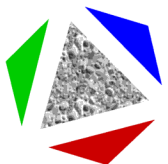
- Diminuer la quantité d'eau

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

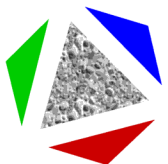
Compatibilité dimensionnelle

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



Compatibilité dimensionnelle

Choix des matériaux vs retrait de séchage

- Assurer un bon mûrissement

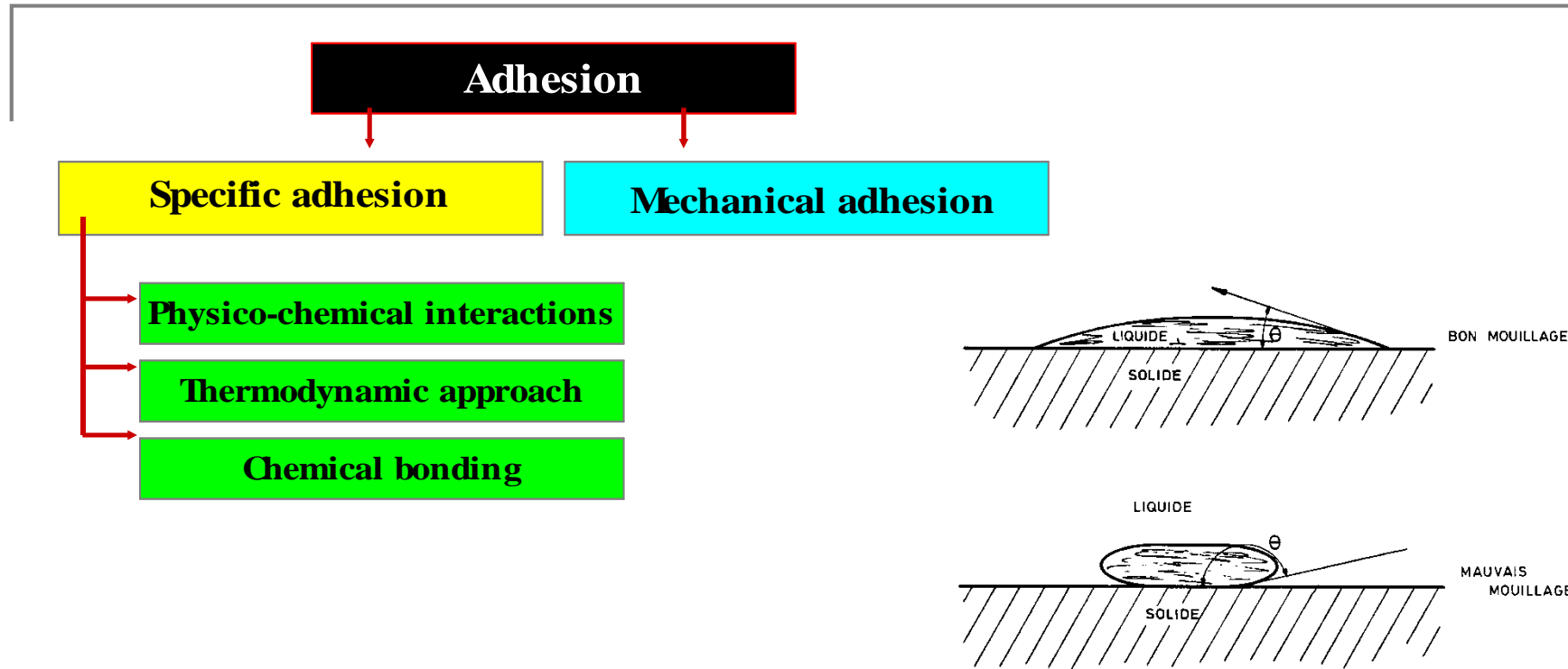
Tableau 1 Durée minimale de protection du béton frais, en jours, pour les classes d'exposition autres que X0 et XC1.

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.

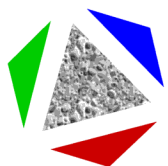
Principes fondamentaux d'adhérence



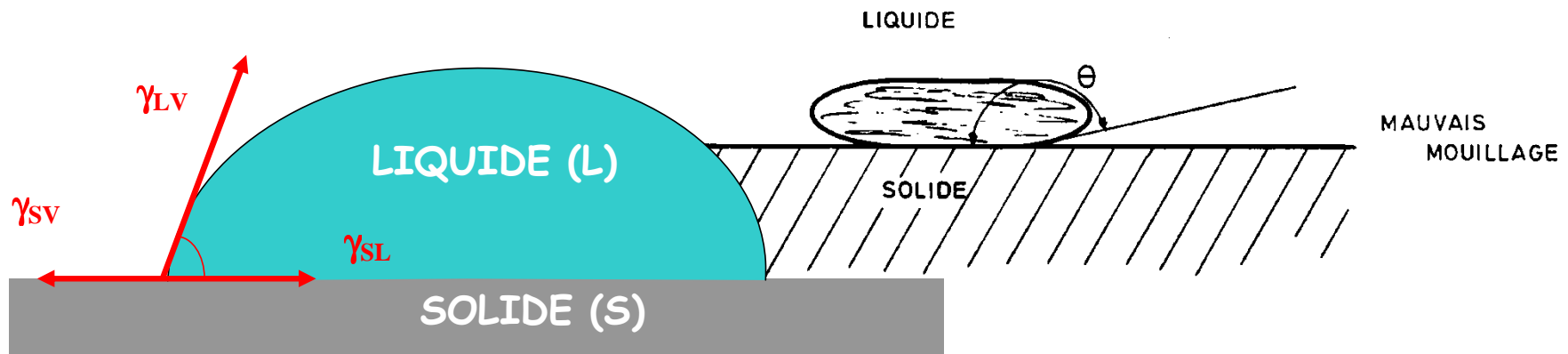
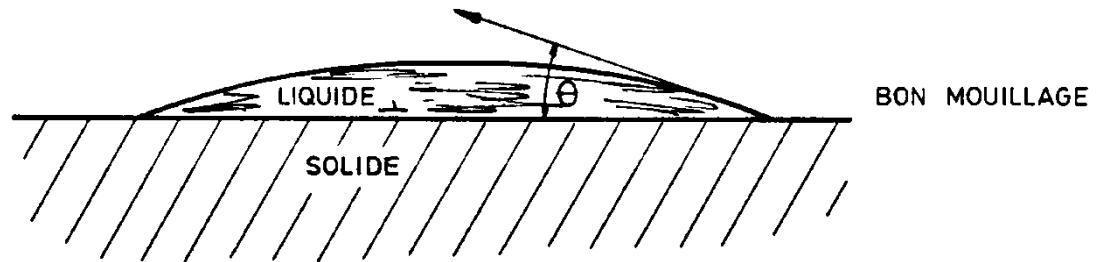
Condition 1 : étalement et mouillabilité

Condition 2 : interactions physico-chimiques

Condition 3 : interpénétration mécanique

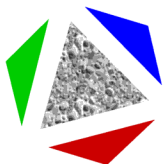


Condition 1 : étalement



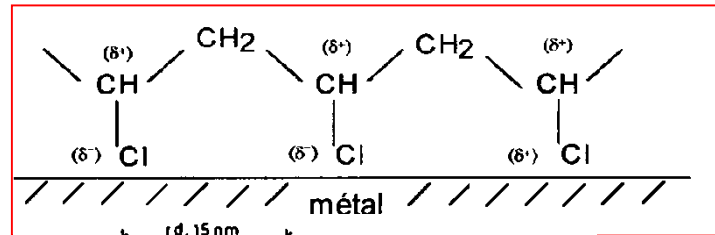
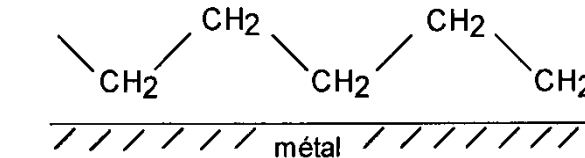
$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$$

Better wettability of the solid by the liquid if contact angle is LOW



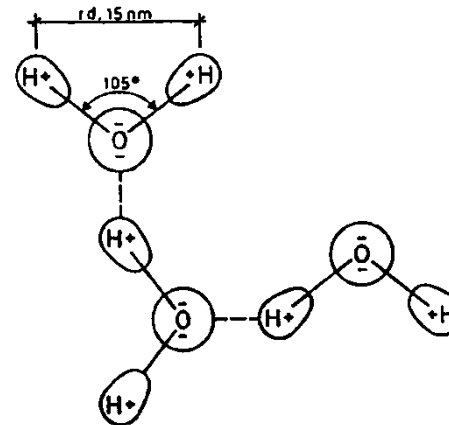
Condition 2 : interactions physico-chimiques

Van der Waals

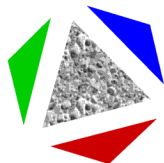
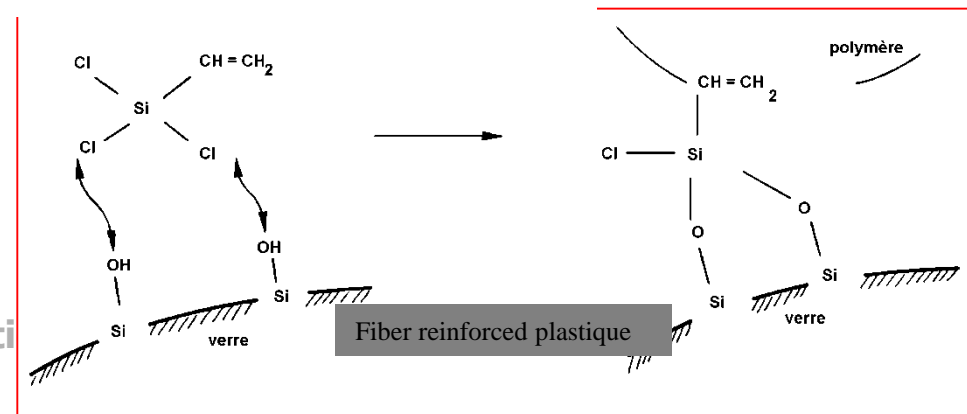


polarization

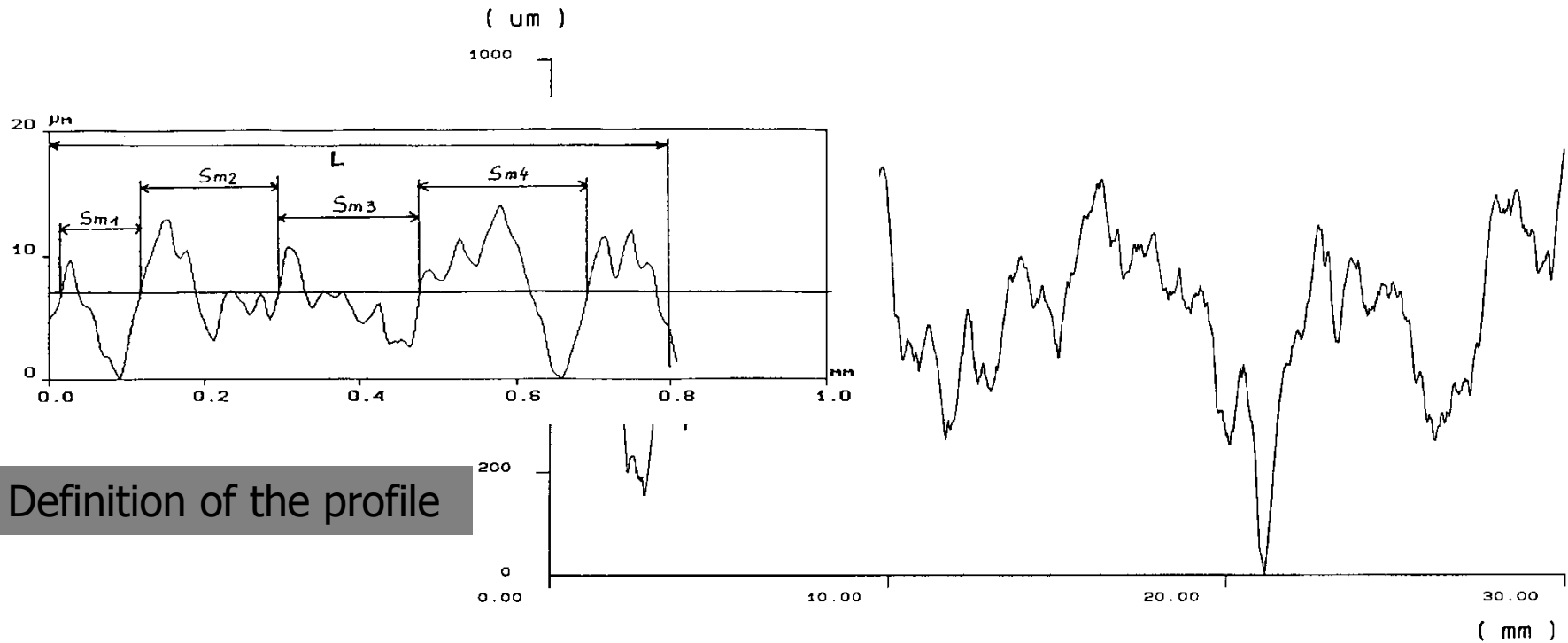
Hydrogen bond



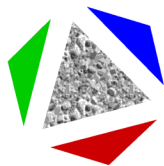
Chemical bonds



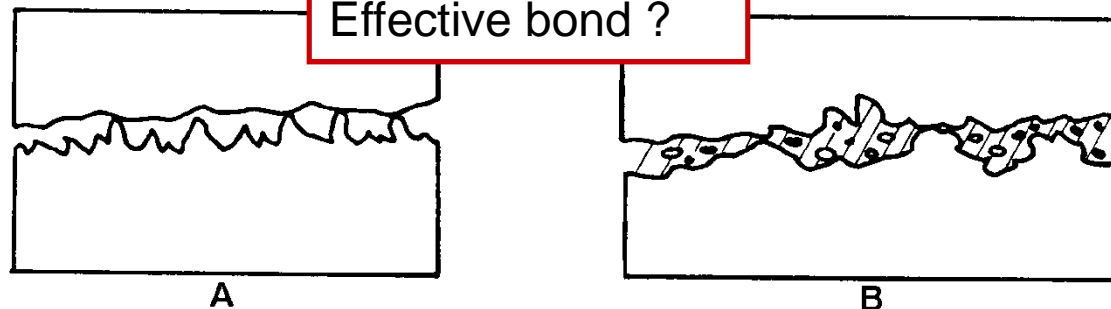
Condition 3 : interpénétration mécanique



Effective bond ?



GeMMe -



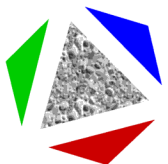
Qu'est-ce que qu'une
réparation?

Définitions

Définitions

- *réparation* : opération de remise en état d'un élément ou d'un ouvrage dégradé,
- *restauration* : opération de rétablissement de l'ouvrage à son état originel, avant sa mise en service,
- *renforcement* : ensemble des travaux visant à préparer l'ouvrage à une exploitation plus intensive en tenant compte des sollicitations mécaniques, thermiques ou chimiques. Chacune de ces sollicitations peut prendre un caractère permanent ou non, de courte ou de longue durée, statique ou dynamique.

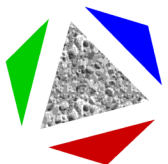
La *rénovation* des bâtiments et des ouvrages de génie civil peut revêtir une ou plusieurs des opérations citées ci-dessus.



Réparations

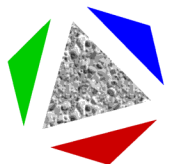
- Objectifs
 - Rendre la forme initiale à l'élément en béton
 - Comblir une cavité accessible de l'extérieur (attaque chimique, défaut de mise en œuvre, ...)
 - Restaurer ou améliorer l'état de surface
 - **Protéger l'armature !**
- Produits (NBN EN 1504-2 à -7)
 - Système de matériaux
 - Mortiers à liants résineux réactifs (PC)
 - Mortiers à liants hydrauliques (CC)
 - Mortiers à liants hydrauliques modifiés par des polymères (PCC ou LHM)
- Processus complet (NBN EN 1504-9)
 - Préparation des surfaces
 - Injection des fissures
 - Ragréage
 - Collage d'armatures sur le ragréage
 - Revêtement de l'ensemble

Exigence générale: ADHERENCE



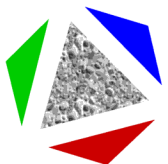
La série de normes NBN EN 1504

- EN 1504 – Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en bétons
 - Chapitre 1 : Définitions
 - Chapitre 2 : Système de protection de surface pour béton
 - Chapitre 3 : Réparation structurelle et non structurelle
 - Chapitre 4 : Collage structurelle
 - Chapitre 5 : Injection dans le béton
 - Chapitre 6 : Ancrages de barres d'acier d'armatures
 - Chapitre 7 : Protection contre la corrosion d'armatures
 - Chapitre 8 : Maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité
 - Chapitre 9 : Principe généraux d'utilisation des produits et des systèmes
 - Chapitre 10 : Application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux



La série de normes NBN EN 1504

- EN 1504 – Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en bétons
 - Chapitre 1 : Définitions
 - Chapitre 2 : Système de protection de surface pour béton
 - Chapitre 3 : Réparation structurelle et non structurelle
 - Chapitre 4 : Collage structurelle
 - Chapitre 5 : Injection dans le béton
 - Chapitre 6 : Ancrages de barres d'acier d'armatures
 - Chapitre 7 : Protection contre la corrosion d'armatures
 - Chapitre 8 : Maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité
 - Chapitre 9 : Principe généraux d'utilisation des produits et des systèmes
 - Chapitre 10 : Application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux

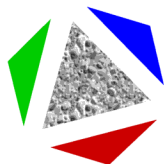


La série de normes NBN EN 1504

- EN 1504-9 : Les principes généraux d'utilisation des produits et des systèmes

Principe	Exemples de méthodes basées sur les principes	Partie correspondante de l'EN 1504 (le cas échéant)
Principes et méthodes relatifs aux défauts dans le béton		
1. Protection contre toute pénétration	1.1 Imprégnation hydrophobe	2
	1.2 Imprégnation	2
	1.3 Revêtement	2
	1.4 Colmatage superficiel des fissurations	
	1.5 Colmatage des fissures	5
	1.6 Transformation de fissures en joints	
	1.7 Erection de panneaux externes ^a	
	1.8 Application de membranes ^a	
2. Contrôle du taux d'humidité	2.1 Imprégnation hydrophobe	2
	2.2 Imprégnation	2
	2.3 Revêtement	2
	2.4 Erection de panneaux externes	
	2.5 Traitement électrochimique	
3. Restauration du béton	3.1 Application manuelle de mortier	3
	3.2 Nouveau béton ou mortier coffré	3
	3.3 Pulvérisation de béton ou de mortier	3
	3.4 Remplacement d'éléments	
4. Renforcement structural	4.1 Ajout ou remplacement de barres de renforcement incorporées ou externes	
	4.2 Ajout d'armature ancrée dans des trous pré-creusés ou forés	6
	4.3 Collage d'une plaque de renforcement	4
	4.4 Ajout de mortier ou de béton	3, 4
	4.5 Injection dans les fissures, les vides ou les interstices	5
	4.6 Colmatage des fissures, des vides et des interstices	5
	4.7 Précontrainte - (précontrainte par post-tension)	
5. Augmentation de la résistance physique	5.1 Revêtement	2
	5.2 Imprégnation	2
	5.3 Ajout de mortier ou de béton	3
6. Résistance aux produits chimiques	6.1 Revêtement	2
	6.2 Imprégnation	2
	6.3 Ajout de mortier ou de béton	3

Principe	Exemples de méthodes basées sur les principes	Partie correspondante de l'EN 1504 (le cas échéant)
Principes et méthodes relatifs à la corrosion de l'armature		
7. Préservation ou restauration de la passivité	7.1 Augmentation de la couche avec du mortier ou du béton supplémentaire	3
	7.2 Remplacement du béton pollué ou carbonaté	3
	7.3 Ré-alcalinisation électrochimique du béton carbonaté	
	7.4 Ré-alcalinisation du béton carbonaté par diffusion	
	7.5 Extraction électrochimique de chlorure	
8. Augmentation de la résistivité	8.1 Imprégnation hydrophobe	2
	8.2 Imprégnation	2
	8.3 Revêtement	2
9. Contrôle cathodique	9.1 Limitation de la teneur en oxygène (au niveau de la cathode) par saturation ou par revêtement de surface	
10. Protection cathodique	10.1 Application d'un potentiel électrique	
11. Contrôle des zones anodiques	11.1 Revêtement actif de l'armature	7
	11.2 Revêtement de protection de l'armature	7
	11.3 Application d'inhibiteurs de corrosion dans ou sur le béton	

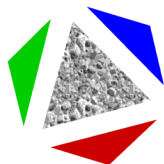


La série de normes NBN EN 1504

- EN 1504-10 : Application sur site des produits et des systèmes et contrôle de la qualité des travaux
 - Définition des exigences pour l'état de surface, la préparation et l'application des produits et le contrôle de qualité des travaux réalisés

Tableau 1 — Présentation de chaque méthode, accompagnée de tout écart, ajout, précautions nécessaire et restrictions

Principes et méthodes		Préparation Voir les articles	Application Voir les articles	Contrôle qualité Voir les articles
Méthode	Méthodes pour satisfaire au principe 1 – Protection contre la pénétration d'agents. Les méthodes ci-après permettent de réduire ou d'empêcher la pénétration d'agents indésirables, comme par exemple l'eau, d'autres liquides, les gaz tels que le dioxyde de carbone, les produits chimiques tels que les chlorures et les agents biologiques.			
1.1	Imprégnation hydrophobe Cette méthode consiste à appliquer un produit pour empêcher ou réduire une infiltration d'eau en recouvrant les pores de surface d'un matériau aux propriétés hydrophobes.	7.1, 7.2.1, 7.2.2	8.1, 8.2.7	9.1, 9.2
1.2	Imprégnation Cette méthode consiste à appliquer un liquide qui pénètre dans le béton et obstrue le système de pores.	7.1, 7.2.1, 7.2.2	8.1, 8.2.7	9.1, 9.2
1.3	Revêtement de surface avec ou sans capacité de pontage des fissures Cette méthode consiste à appliquer un produit sur la surface du béton pour empêcher la pénétration d'agents.	7.1, 7.2.1, 7.2.2	8.1, 8.2.1, 8.2.7	9.1, 9.2
1.4	Fissures colmatées localement Voir l'Article A.6 de l'Annexe A (informative).	7.1, 7.2.1, 7.2.2	a 8.1, 8.2.1, 8.2.2, 8.2.5, 8.2.6	
1.5	Remplissage des fissures Cette méthode consiste à remplir les fissures pour empêcher la pénétration d'agents.	7.1, 7.2.1, 7.2.2	[1] 8.1, 8.2.1, 8.2.2, 8.2.5, 8.2.6	9.1, 9.2
<p>^a Le béton situé au bord des fissures doit être préparé et réparé conformément aux Articles 7 et 8. Les paragraphes 8.2.2 et 8.2.5 s'appliquent uniquement aux coulis de ciment.</p>				
« à suivre »				

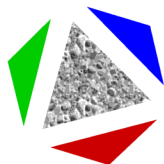


La série de normes NBN EN 1504

- EN 1504-10 : Application sur site des produits et des systèmes et contrôle de la qualité des travaux
 - Définition des exigences pour l'état de surface, la **préparation** et l'application des produits et le contrôle de qualité des travaux réalisés

Tableau 2 — Préparation du support

Processus de préparation	Numéros des paragraphes (Informations supplémentaires à l'Annexe A)	Références	Numéros de méthodes							
			Méthodes utilisant l'imprégnation hydrophobe et l'imprégnation	Méthodes utilisant le revêtement de surface	Méthodes utilisant le remplissage des fissures des vides ou interstices	Méthodes utilisant l'application de mortier et de béton	Méthode d'ajout d'armatures en acier	Méthode d'installation de barres liées entre elles dans des trous préformés	Méthode de collage de plaques	Méthodes utilisant le revêtement de l'armature
Généralités	7.1		1.1, 1.2, 2.1, 5.2, 8.1	1.3, 2.2, 5.1, 6.1, 7.1, 8.2, 9.1	1.5, 4.5, 4.6	3.1, 3.2, 3.3, 4.4, 5.1, 6.1, 7.1, 7.2, 7.4	4.1	4.2	4.3	11.1, 11.2
Préparation du support en béton										
Généralités	7.2.1	ENV 1504-9	X	X	X	X		X	X	
Nettoyage	7.2.2		X	X	X	X		X	X	
Repiquage	7.2.3					X			X	
Enlèvement du béton	7.2.4	ENV 1504-9				X			X	
Préparation de l'armature										
Généralités	7.3.1	ENV 1504-9					X	X		X
Nettoyage	7.3.2	ISO 8501-1					X	X		X



La série de normes NBN EN 1504

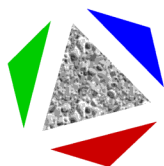
- EN 1504-10 : Application sur site des produits et des systèmes et contrôle de la qualité des travaux
 - Définition des exigences pour l'état de surface, la préparation et l'application des produits et le contrôle de qualité des travaux réalisés

Tableau 3 — Application des produits et systèmes

Processus d'application	Numéros des paragraphes (informations supplémentaires à l'Annexe A)	Références	Numéros de méthodes							
			Méthodes utilisant l'imprégnation hydrophobe et l'imprégnation	Méthodes utilisant le revêtement de surface	Méthodes utilisant le remplissage des fissures des vides ou interstices	Méthodes utilisant l'application de mortier et de béton	Méthode d'ajout d'armatures en acier	Méthode d'installation de barres liées entre elles dans des trous préformés	Méthode de collage de plaques	Méthodes utilisant le revêtement de l'armature
			1.1, 1.2, 2.1, 5.2, 8.1	1.3, 2.2, 5.1, 6.1, 7.1, 8.2, 9.1	1.5, 4.5, 4.6	3.1, 3.2, 3.3, 4.4, 5.1, 6.1, 7.1, 7.2, 7.4	4.1	4.2	4.3	11.1, 11.2
	8.1		X	X	X		X	X	X	X
Défauts du béton et du renforcement structural										
Adhérence	8.2.1	EN 206-1		X	X	X		X	X	
Mortier et béton appliqué à la main	8.2.2	ENV 13670-1			X ^a	X ^a				
Mortier et béton projeté	8.2.3	prEN 14487-1: 2002-06 et prEN 14487-2: 2003				X ^a				
Mortier et béton coulé	8.2.4	ENV 13670-1				X ^a				
Cure	8.2.5	ENV 13670-1			X ^a	X				
Fissures et joints	8.2.6	ENV 1504-9			X				X ^a	
Revêtement de surface et imprégnation hydraulique et imprégnation	8.2.7		X	X		X ^a				

^a Suivant applicabilité.

à suivre

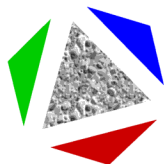


La série de normes NBN EN 1504

- EN 1504-10 : Application sur site des produits et des systèmes et contrôle de la qualité des travaux
 - Définition des exigences pour l'état de surface, la préparation et l'application des produits et le **contrôle de qualité** des travaux réalisés

Tableau 4 — Récapitulatif des essais et observations pour le contrôle qualité

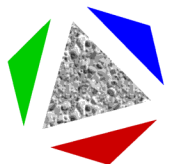
Numéro de l'essai ou de l'observation – voir A.9.2	Caractéristique	Méthode d'essai ou observation (y compris le matériel utilisé, s'il y a lieu)	Essai (E) ou Observation (O)	Norme de référence ISO ou européenne	Fréquence d'essai ou observation	Numéro de la méthode								
						Méthodes utilisant l'imprégnation hydrophobe et l'imprégnation	Méthodes utilisant le revêtement de surface	Méthodes utilisant le remplissage des fissures, des vides ou des interstices	Méthodes utilisant l'application de mortier et de béton	Méthode d'ajout d'armatures en acier	Méthode d'installation de barres liées entre elles dans des trous préformés	Méthode de collage de plaques	Méthodes utilisant un revêtement de protection pour les armatures	
						1.1, 1.2, 2.1, 5.2, 8.1	1.3, 2.2, 5.1, 6.1, 7.1, 8.2, 9.1	1.5, 4.5, 4.6	3.1, 3.2, 3.3, 4.4, 5.1, 6.1, 7.1, 7.2, 7.4	4.1	4.2	4.3	11.1, 11.2	
États du support avant et/ou après préparation														
1	Décollement	Sondage au marteau	E		Une fois avant l'application	■	■		■			■		
2	Propreté	Examen visuel ou essai d'essuyage	O E		Après préparation et immédiatement avant application	■	■	◆	■		■ 1	■ 3	■	
3	Régularité du support	Examen visuel	O		Avant application		■					■		
4	Rugosité	Examen visuel, méthode de la surface de sable ou profilomètre	O E E	EN 1766 EN ISO 3274 et EN ISO 4288			◆		◆ 1		■ 2	■		
1.	Propreté du support en béton ou des trous					5.	Il convient que l'eau utilisée pour le mélange soit soumise à un essai chimique si aucune confirmation écrite n'est disponible concernant ses qualités potables							
2.	Rugosité du support en béton ou des trous					6.	Consistance du coulis de ciment ou du coulis polymère							
3.	Propreté des plaques et du support en béton					7.	Épaisseur à l'état sec du revêtement de protection apposé sur les plaques							
4.	Teneur en eau des fissures et du béton environnant													



Préparation des surfaces: méthodes et effets

Préparation des surfaces: techniques

- **grenailage** : projection de billes métalliques de granulométrie variable,
- **sablage** : projection de grains de sable de granulométrie variable. Cette projection, à vitesse très élevée, peut se faire en utilisant soit l'air (sablage), soit l'eau (hydro-sablage) comme fluide porteur,
- **burinage** : pulvérisation ou fracture de la surface au moyen d'un marteau muni de pointes (le plus souvent un marteau pneumatique),
- **scarification** : fraisage et raclage de la surface au moyen d'une roue dentée renforcée,
- **décapage hydraulique** : décapage de la surface par jet d'eau à haute pression (entre 5 et 25 MPa).



Préparation des surfaces: techniques

- **décapage thermique** : apport local très rapide d'une grande quantité de chaleur à la surface du béton, qui permet d'éliminer la pellicule extérieure du béton sur une épaisseur de 0.5 à 3mm,
- **décapage chimique** : nettoyage de la surface au moyen d'un acide (H_3PO_4 dilué à 10 à 15%) ou d'une base (graisses et huiles), suivi d'un rinçage à l'eau jusqu'à obtention d'un pH neutre en surface.



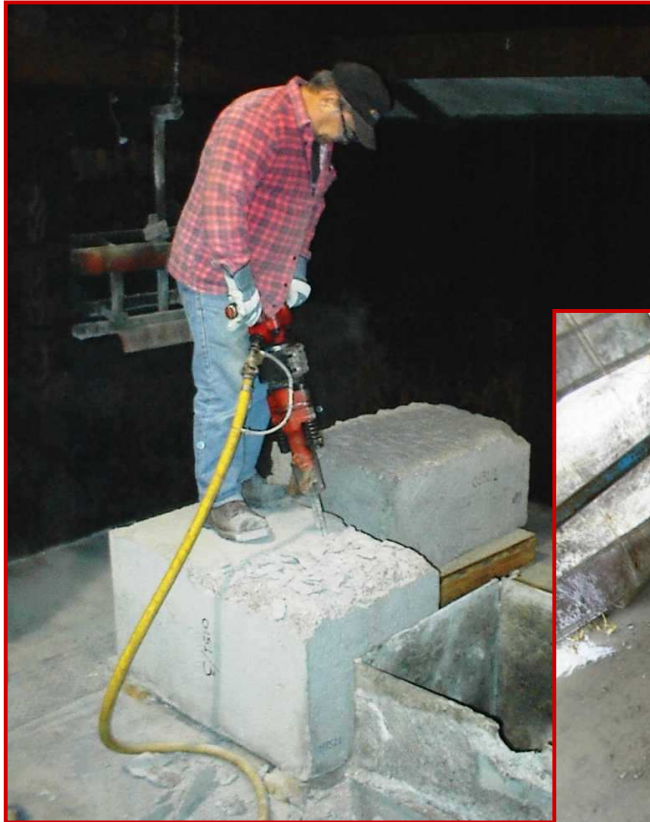
sablage



brûleur oxyacétylénique

Préparation des surfaces: techniques

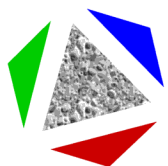
marteau pneumatique



scarification

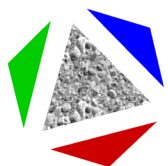


hydro-démolition



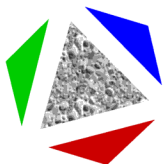
Enlèvement du béton détérioré

- La démolition au *marteau pneumatique / hydraulique* est la technique la plus courante
 - grande flexibilité
 - appareils manuels
 - appareils montés sur de la machinerie hydraulique



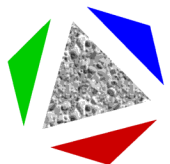
Enlèvement du béton détérioré

- Le *marteau pneumatique / hydraulique* (...)
 - gamme de puissance variable
 - pneumatique / hydraulique
 - machinerie de taille variée
 - grande disponibilité
 - profil anguleux / irrégulier de la surface obtenue
 - technique la mieux adaptée pour le dégagement de l'armature



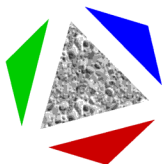
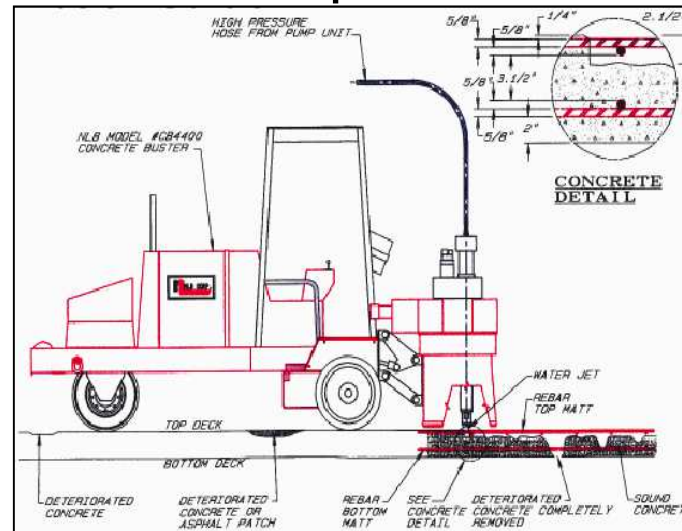
Enlèvement du béton détérioré

- Le *marteau pneumatique / hydraulique* (...)
 - Désavantages à considérer
 - attention: peut endommager le substrat (*μfissuration*)
 - bruit / poussière
 - main d'œuvre de plus difficile à recruter



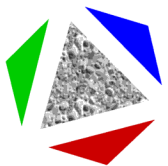
Enlèvement du béton détérioré

- L'*hydrodémolition* est une excellente technique
 - Elle favorise une adhérence optimale
 - n'endommage pas le substrat
 - induit un profil sinueux favorable à l'*accrochage*



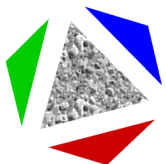
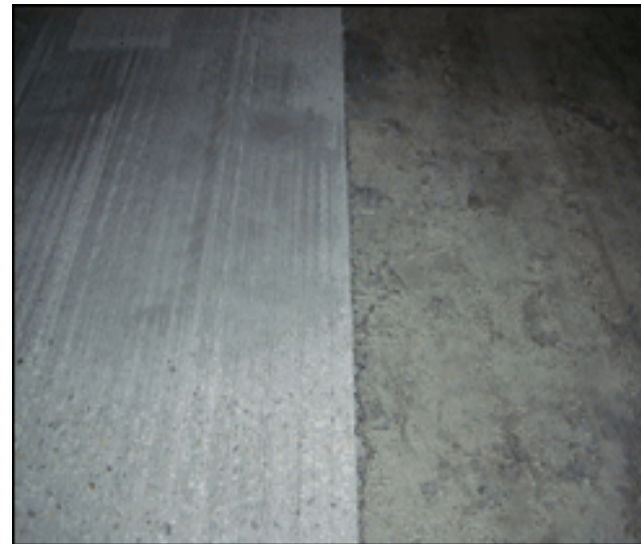
Enlèvement du béton détérioré

- L'*hydrodémolition* (...)
 - Équipement performant
 - appareils robotisés
 - pressions élevées (20 ksi et plus)
 - mise en œuvre manuelle peu appropriée
 - Utilisation peu répandue
 - conditions d'accès
 - type d'éléments (horizontaux vs verticaux)
 - dégagement de l'acier non possible avec les robots
 - volume de travail minimal requis



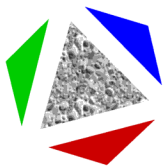
Enlèvement du béton détérioré

- La *scarification* est une méthode très utile et très économique pour de grandes surfaces horizontales
 - broyage de la surface sans impact
 - dents d'acier au carbure



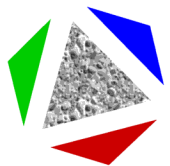
Enlèvement du béton détérioré

- La *scarification* (...)
 - surfaces horizontales
 - équipement manuel (faible épaisseur)
 - équipement similaire à ce qui est utilisé pour le planage des chaussées souples
 - surfaces verticales
 - équipement monté sur de la machinerie hydraulique



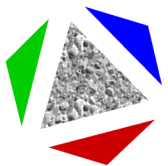
Enlèvement du béton détérioré

- La *scarification* (...)



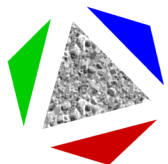
Enlèvement du béton détérioré

- La *scarification* (...)



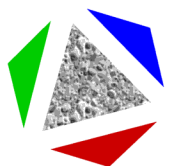
Enlèvement du béton détérioré

- Le *jet de billes d'acier* («*shot blast*»)
 - impacts répétées de billes en acier projetées contre la surface
 - produit une surface rugueuse



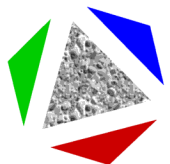
Enlèvement du béton détérioré

- Le *jet de billes d'acier* («*shot blast*»)
 - méthode efficace pour retrancher la laitance et les couches contaminées ou fracturées sur de faibles épaisseurs
 - ne permet pas d'enlever plus que quelques millimètres



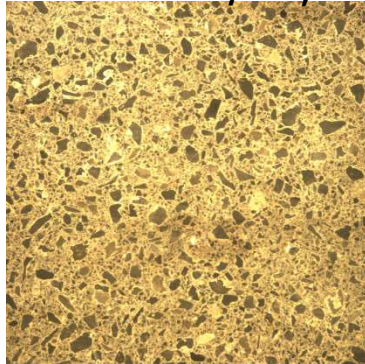
Enlèvement du béton détérioré

- Le *bouchardage* est une autre technique à percussion pour le retrait de faibles épaisseurs
- Le *sciage* (traits de *scie*) est utile dans diverses situations
- Le *jet de sable* est utile pour terminer le travail de démolition en retranchant les débris ou particules qui adhèrent faiblement
- Méthodes peu usitées ou proscrites
 - méthodes *chimiques* (ex. acide)
 - lance-flamme

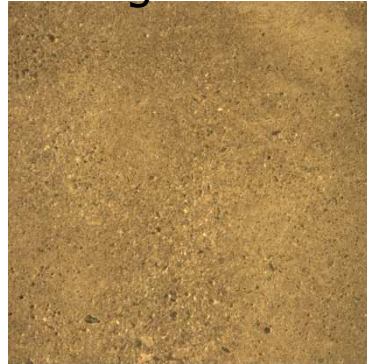


Préparation des surfaces: effets

Béton C40/50, sables et granulats calcaires



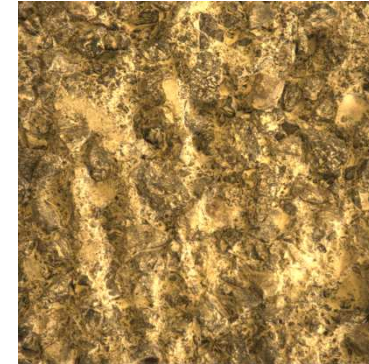
polissage



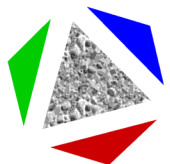
sablage



scarification



hydro-démolition

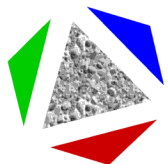


Préparation des surfaces: effets

(Murray, 1989)

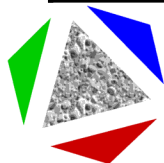
Technique ← → **Effet**

Technique	Profile
Hand chipping	1/2" (13 mm)
Hydromilling	1/2" (13 mm)
Rotomilling	1/8" – 1/4" (3 - 6 mm)
Scabbling	1/8" (3 mm)
Steel shotblasting	1/8" (3 mm)
Abrasive (sand) blasting	1/8" (3 mm)



Préparation des surfaces: effets *(Silfwerbrand, 2004)*

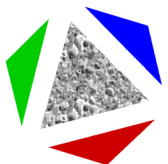
Removal method	Principle behaviour	Depth action ?	Advantages	Disadvantages
Sandblasting & shotblasting	Blasting with sand or steel balls	No	No microcracking, no dust	Not selective
Flame-cleaning	Thermal lance	No	Effective against pollutions and painting	The reinforcement may be damaged, smoke and gas development, not selective
Milling (scarifying)	Longitudinal tracks are introduced by rotating metal lamellas	Yes	Good bond if followed by water flushing	Not selective
Pneumatic (jack) hammers, hand-held or boom-mounted	Compressed-air-operated chipping	Yes	Simple use, large ones are effective	Damages reinforcement and concrete surface, poor working environment, not selective
Grinding	Grinding with rotating lamella	No	Removes uneven parts	Dust development, not selective
Explosive blasting	Controlled blasting using small, densely spaced blasting charges	Yes	Effective for large removal volumes	Difficult to limit to solely damaged concrete, not selective
Water-jetting (hydrodemolition)	High pressure water jet from a unit with a movable nozzle	Yes	Effective, selective, does not damage reinforcement or concrete, improved working environment	Water handling, removal in frost degrees, costs for establishment



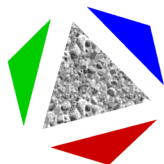
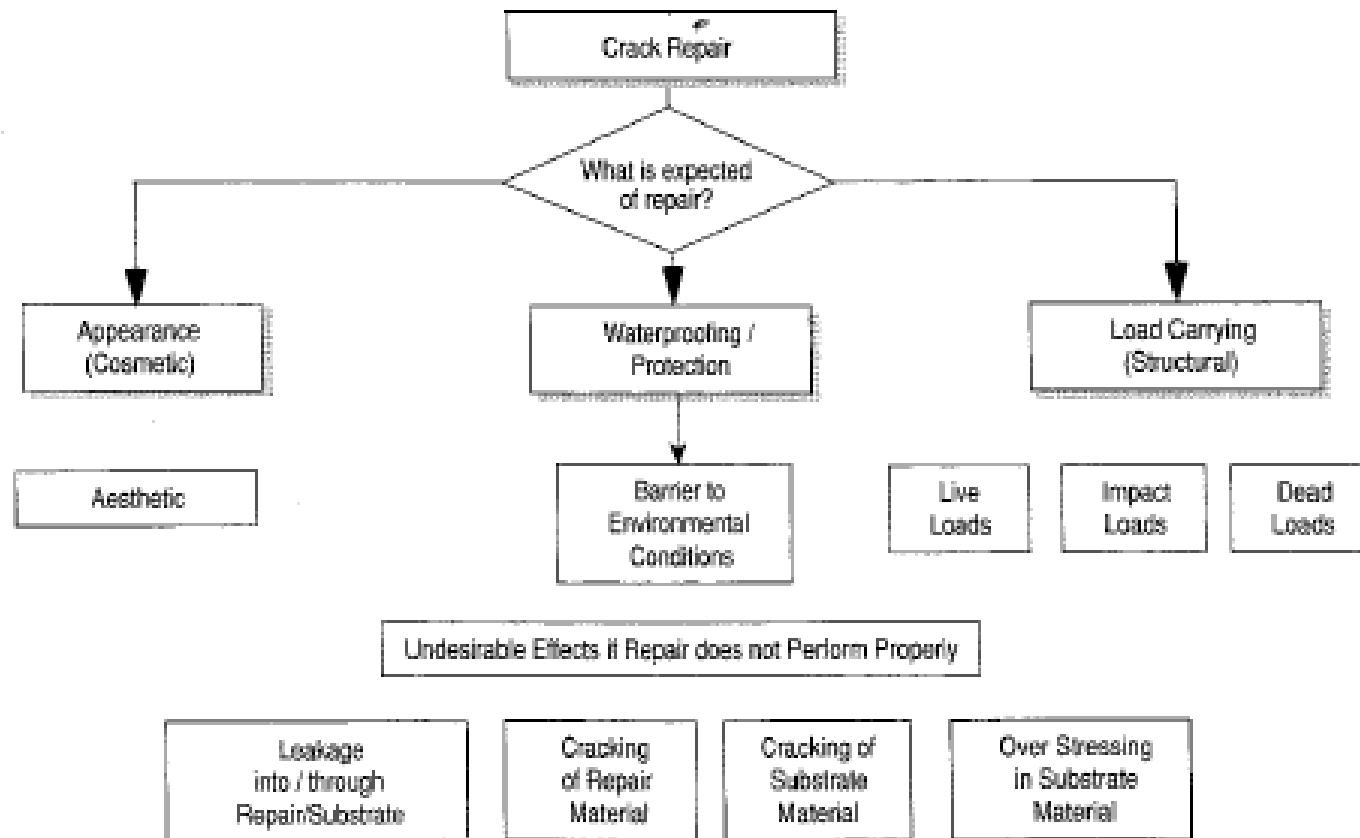
Traitement des fissures

Fissurations: situation

- *(toutes) les structures en béton présentent des fissures*
- élément structural en béton correctement armé:
 $e < 0,3 \text{ mm}$;
- environnement particulièrement sévère (cycles de mouillage séchage, milieu industriel ou milieu marin :
 $e < 0,1 \text{ mm}$;
- Esthétiquement: OK si $e < 0,3 \text{ mm}$.
- Fissures problématiques dans les cas suivants:
 - esthétiquement inacceptables ;
 - compromettent l'étanchéité de la structure ;
 - compromettent la durabilité de la structure (notamment via la corrosion des armatures);
 - compromettent la capacité structurale de l'élément.

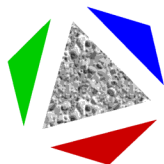


Traitement des fissures: injection



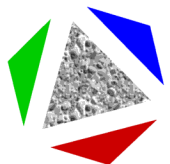
Fissurations: causes

Causes des dégradations	Effets			
	Fissure	Epaufrure	Désagrégation	Activité
A. Causes survenant avant durcissement :				
1) ségrégation du béton	x			x
2) ressuage	x			x
3) retrait à l'état plastique	x			x
B. Causes survenant au début et pendant le durcissement				
1) modification du support ou du coffrage	x	x		x
2) effet du gel sur béton jeune	x	x	x	x
3) retrait	x			x
C. Causes survenant après durcissement :				
1) effet thermique				
- déformation empêchée/différentielle	x	x		xx
- gel/dégel		x	x	xx
- incendie	x	x	x	x
2) effet de l'eau				
- effet absorption d'eau/séchage (+ déformation empêchée ou différentielle)	x	x		xx
3) effet chimique				
- attaque en surface			x	xx
- réaction chimique avec expansion	x	x	x	xx
4) corrosion des armatures	x	x		xx
5) surcharge mécanique/ concentration de tension				
- statique	x	x		xx
- dynamique	x	x		xx
- impact et tremblements de terre	x	x		x
- érosion			x	xx



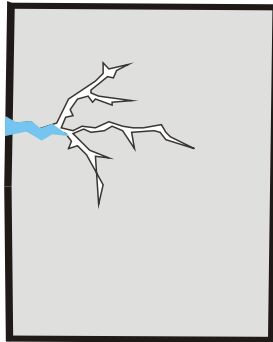
Traitement des fissures: techniques

- Types de traitement (suivant situation (activité, environnement, ...) et objectif (monolithisme, étanchéité, ...))
 - Injection
 - Calfeutrement
 - Pontage et protection locale
 - Protection générale
 - Agrafage
 - Post-contrainte (additionnelle)



Traitement des fissures: injection

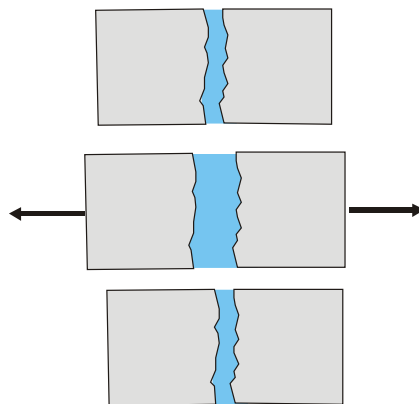
1. Cracks filling and closing



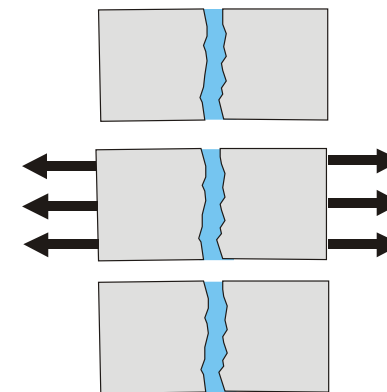
3. Filling cracks and voids - sealing of microstructure



2. Flexible bonding of concrete surfaces
(able to accommodate subsequent movement)



4. Structure consolidation
(Rigid bonding of concrete surfaces - able to force transmitting)



Traitement des fissures: produits d'injection

EN 1504-5

Utilisation prévue (U)

La lettre U est suivie d'une lettre et d'un chiffre entre parenthèses:

F : pour le remplissage transmettant les efforts des fissures

F1 : adhérence $> 2 \text{ N/mm}^2$

F2 : adhérence $> 0,6 \text{ N/mm}^2$

D : pour le remplissage ductile des fissures

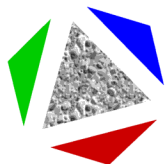
D1 : étanchéité à l'eau sous $2 \times 10^5 \text{ Pa}$

D2 : étanchéité à l'eau sous $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ (usages particuliers)

S : pour le remplissage expansif des fissures

S1 : étanchéité à l'eau sous $2 \times 10^5 \text{ Pa}$

S2 : étanchéité à l'eau sous $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ (usages particuliers).



Traitement des fissures: produits d'injection

EN 1504-5

Applicabilité (W)

La lettre W est suivie de trois ou quatre groupes de nombres entre parenthèses :

1er groupe (un nombre) : largeur minimale admise de la fissure, mesurée en dixièmes de millimètre (1, 2, 3, 5 ou 8)

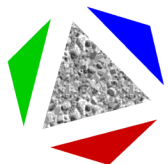
2e groupe (un ou plusieurs nombres) : taux d'humidité de la fissure (1 pour sec, 2 pour humide, 3 pour mouillé, 4 pour rempli d'eau)

3e groupe (deux nombres) : températures d'utilisation minimum et maximum

4e groupe (un nombre, uniquement pour U(F))

(1) : fissures soumises à des mouvements quotidiens supérieurs à 10 % ou à 0,03 mm pendant le durcissement

(2) : fissures soumises à des mouvements quotidiens inférieurs à 10 % ou à 0,03 mm pendant le durcissement.



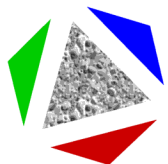
Traitement des fissures: produits d'injection

EN 1504-5

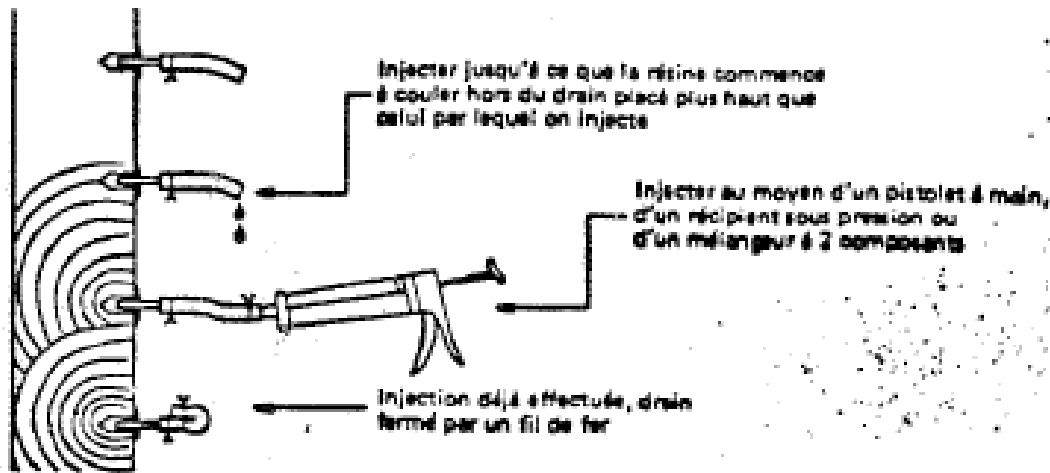
Exemple

La classification **U(F1) W(1) (1/2) (5/30) (1)** désigne un produit d'injection :

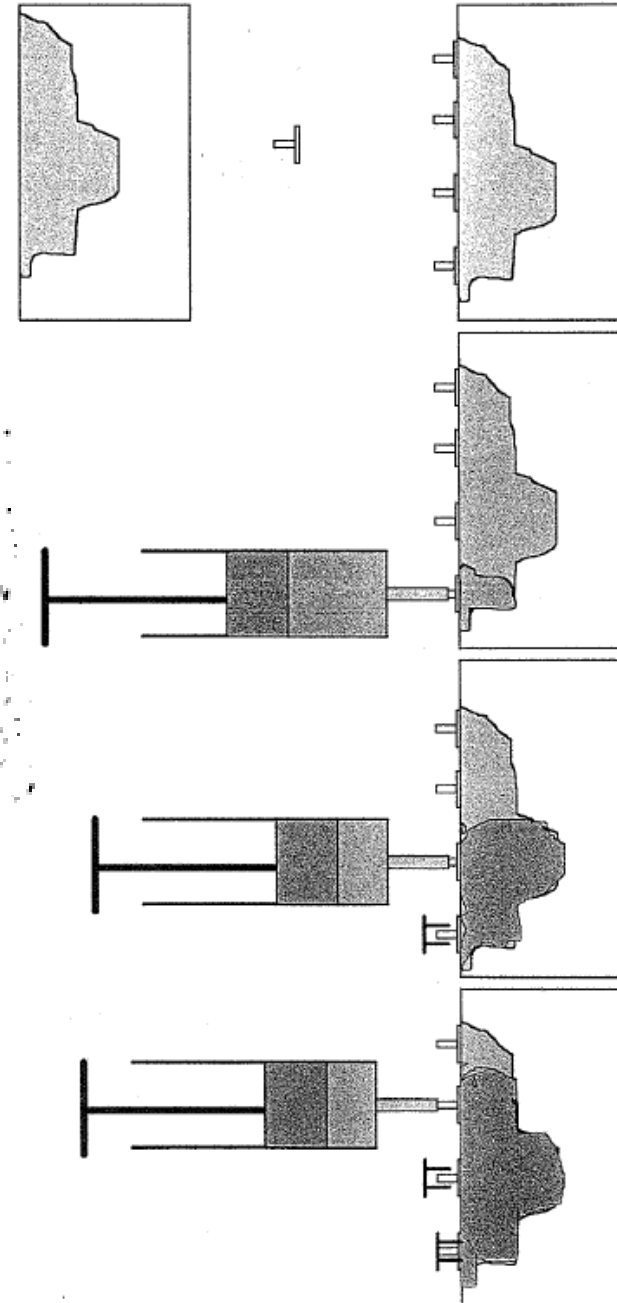
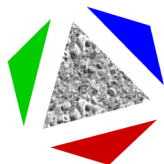
- destiné à un remplissage transmettant les efforts au droit des fissures,
- susceptible de colmater des fissures de 0,1 mm, sèches ou humides,
- pouvant être mis en oeuvre à une température comprise entre 5 et 30 °C,
- utilisable pour des fissures soumises à des mouvements quotidiens supérieurs à 10 % ou à 0,03 mm pendant le durcissement.



Traitement des fissures: techniques d'injection



Toujours travailler de bas en haut !



Traitement des fissures: injection

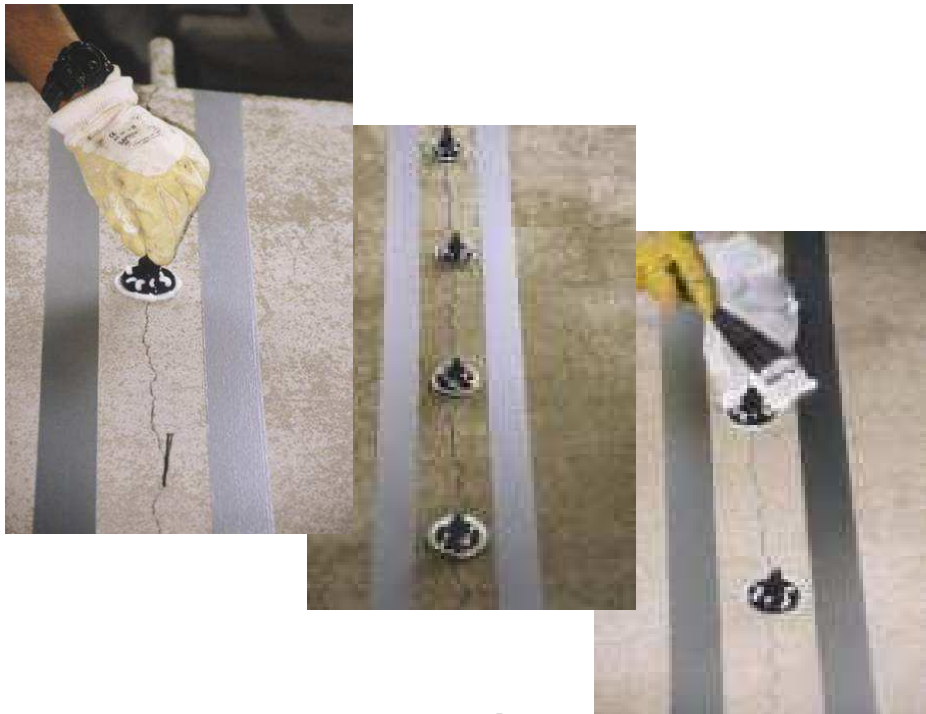
Faibles pressions

Renforcement dense

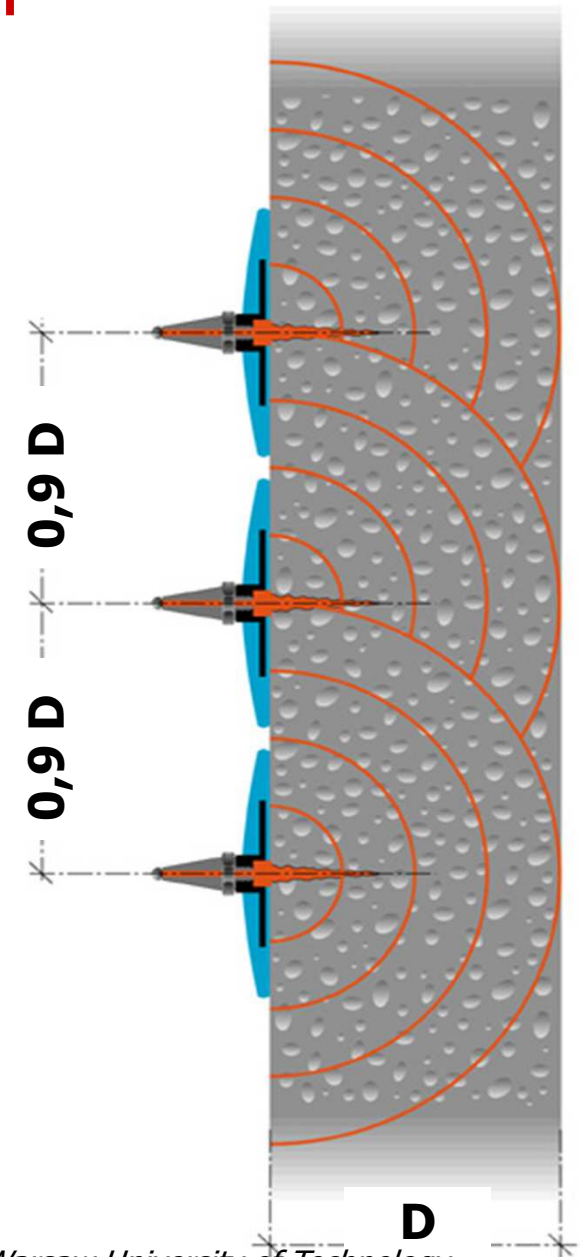
Faible résistance du béton

Épaisseur des fissures: $1 < x < 0,2 \text{ mm}$

Espacement des injecteurs: $15 < y < 50 \text{ cm}$



GeMMe – Matériaux de Construction



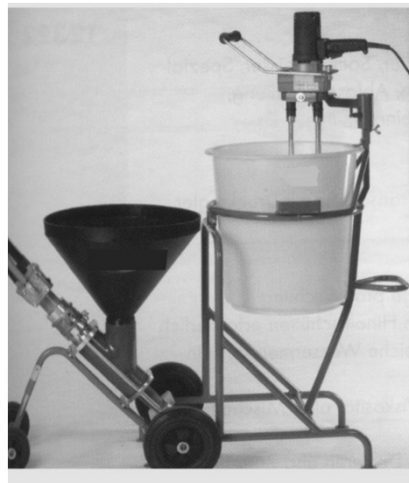
Dr B. Chmielevska, Warsaw University of Technology

Traitement des fissures: matériel



Pompes d'injection:

- manuelle
- pneumatique
- électrique
- hydraulique



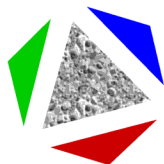
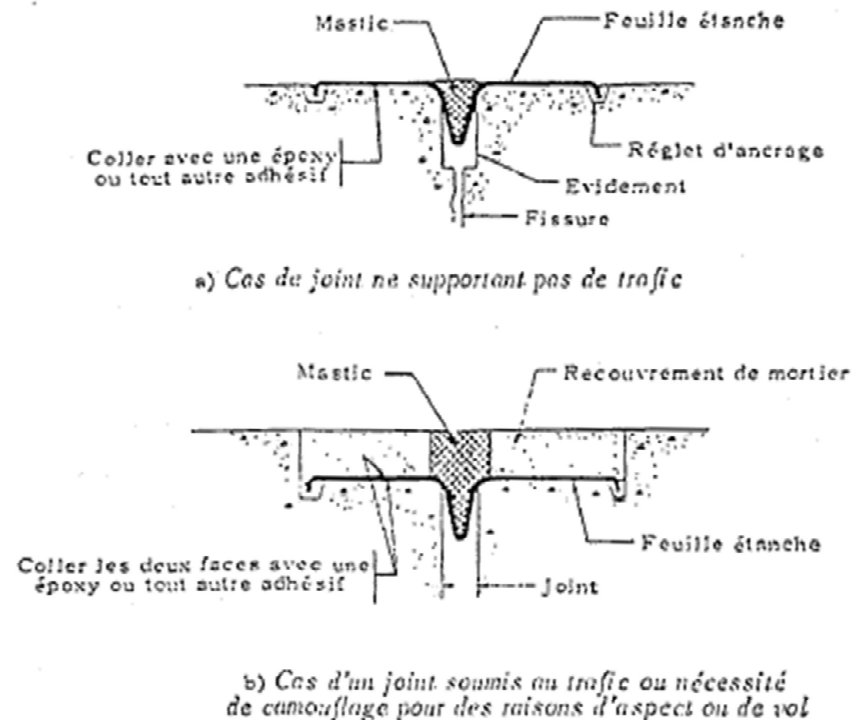
electric with worm



electric with membrane

Traitement des fissures: pontage et protection

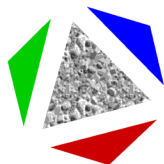
- Principe: recouvrir une fissure (étanchéité) et/ou dévier l'eau vers point de collecte
- Membrane formée in situ
 - Liant + textile tissé ou non (verre, polyester)
 - Bande anti-adhérente sur fissure
- Membrane préfabriquée
 - Membrane d'étanchéité
 - Membrane métallique
 - Membranes polymériques ou élastomériques
 - Adhésif étanchéité + fixation mécanique



Principes de réparation des épaufures

Epaufures et désagrégations

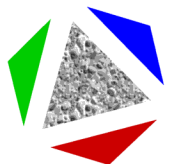
Causes des dégradations	Effets			
	Fissure	Epaufure	Désagrégation	Activité
A. Causes survenant avant durcissement :				
1) ségrégation du béton	x			x
2) ressuage	x			x
3) retrait à l'état plastique	x			x
B. Causes survenant au début et pendant le durcissement				
1) modification du support ou du coffrage	x	x		x
2) effet du gel sur béton jeune	x	x	x	x
3) retrait	x			x
C. Causes survenant après durcissement :				
1) effet thermique				
- déformation empêchée/différentielle	x	x		xx
- gel/dégel		x	x	xx
- incendie	x	x	x	x
2) effet de l'eau				
- effet absorption d'eau/séchage (+ déformation empêchée ou différentielle)	x	x		xx
3) effet chimique				
- attaque en surface			x	xx
- réaction chimique avec expansion	x	x	x	xx
4) corrosion des armatures	x	x		xx
5) surcharge mécanique/ concentration de tension				
- statique	x	x		xx
- dynamique	x	x		xx
- impact et tremblements de terre	x	x		x
- érosion			x	xx



Types de ragréage et exigences

■ Types de ragréages

- Ragréage mince
 - Rendre l'aspect satisfaisant et protéger les armatures – 3 à 6mm
- Ragréage épais
 - Préparation de surface: décapage, sciage, élimination du béton dégradé – plusieurs cm
- Ragréage au plafond
 - Idem + éventuellement treillis armé
- Ragréage avant renforcement par armatures
 - ragréage pour obtenir un support résistant, plan et homogène (PCC car meilleure stabilité au fluage)
 - Collage de plats métalliques ou autres avec liant résineux réactif



Types de ragréage et exigences

■ Types de ragréages

- Ragréage de tabliers de ponts en béton
 - Contraintes thermiques dues à la pose de l'étanchéité/couche de roulement (150-250°C)
 - Produits: PC, PCC (3-6mm), systèmes multicouches
 - Types de défauts
 - Type 1: texture du béton avec mise à nu de granulats entre 0 et 12mm (PC)
 - Type 2: planéité (pièges à eau, petits ragréages) → Reprofilage : PCC
 - Difficultés
 - Humidité du support
 - Protection nécessaire (produit de cure)
 - Délais courts → polymérisation rapide
 - Résistance aux chocs thermiques
 - Durabilité: empêcher le cheminement de l'eau par rupture d'adhérence

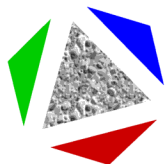


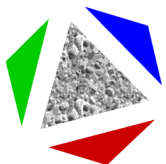
Tableau 1 Exigences de performance applicables aux produits de réparation structurale et non structurale [7].

Caractéristiques de performance	Support de référence	Méthode d'essai	Exigences			
			Réparations structurales		Réparations non structurales	
			Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
Résistance en compression	Aucun	NBN EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
Teneur en chlorures	Aucun	NBN EN 1015-17	≤ 0,05 %			
Adhérence	MC (0,40)	NBN EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (*)	
Retrait/expansion empêchés (*) (*)	MC (0,40)	NBN EN 12617-4	Contrainte d'adhérence après essai (*) (*)			Aucune exigence
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (*)	
Résistance à la carbonatation (*)	Aucun	NBN EN 13205	$d_f \leq$ témoin (MC(0,45))		Aucune exigence (*)	
Module d'élasticité	Aucun	NBN EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	Aucune exigence	
Compatibilité thermique : – gal-dégel (*) (*)	MC (0,40)	NBN EN 13687-1	Contrainte d'adhérence après 50 cycles (*) (*)			Examen visuel après 50 cycles
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (*)	
– pluies d'orage (*) (*)	MC (0,40)	NBN EN 13687-2	Contrainte d'adhérence après 30 cycles (*) (*)			Examen visuel après 30 cycles
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (*)	
– cycles thermiques à sec (*) (*)	MC (0,40)	NBN EN 13687-4	Contrainte d'adhérence après 30 cycles (*) (*)			Examen visuel après 30 cycles
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (*)	
Résistance au glissement et au dérapage	Aucun	NBN EN 13036-4	Classe I : > 40 unités testées à l'état humide Classe II : > 40 unités testées à sec Classe III : > 55 unités testées à l'état humide			
Coefficient de dilatation	Aucun	NBN EN 1770	Non requis si les essais de compatibilité thermique sont effectués, sinon valeur déclarée			
Absorption capillaire	Aucun	NBN EN 13057	≤ 0,5 kg/m ² ·h			Aucune exigence

(*) Une résistance minimale en traction de 0,5 MPa est requise lorsqu'il se produit une rupture de cohésion dans le matériau de réparation.
 (**) Non requis pour la restauration du béton par projection de mortier ou de béton.
 (***) Non requis en cas de cycles thermiques.
 (****) Valeur moyenne sans valeur individuelle inférieure à 75 % de l'exigence minimale.
 (*****) Ouverture de fissure moyenne tolérée ≤ 0,05 mm, absence de fissure ≥ 0,1 mm et de feuilletage.
 (*****) La résistance à la carbonatation ne concerne que le béton armé.
 (*****) Ne convient pas pour la protection contre la carbonatation, sauf si le système assure une protection de surface démontrée contre la carbonatation (cf. NBN EN 1504-3).
 (*****) Le choix de la méthode dépend des conditions d'exposition. Lorsqu'un produit est conforme à la partie 1 de la norme NBN EN 13687, il est réputé conforme aux parties 2 et 4.

Séquence des opérations de traitement

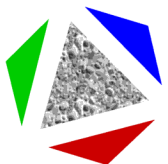
- Préparation de surface
 - Forme du décapage: parallépipède ou « queue d'aronde »
 - Profondeur du décapage: jusqu'au béton homogène
 - Si armatures: protection par un traitement ultérieur et béton non carbonaté
- Préparation des zones à ragréer
 - Hygrométrie
 - PC: support sec
 - PCC: humidification en profondeur (SSD) – pas de film d'eau en surface
- Mise en œuvre du système de réparation
 - *Primer*
 - *Couche d'accrochage*
 - Couche d'apport (mortier de ragréage)
 - Application à la truelle, la dague ou la main
 - Coffrage « glissant »
 - PCC: mouiller la surface
 - Couche de protection: revêtement qui réduit la perméabilité à l'eau et au CO₂ et qui améliore le fini de surface
- Contrôle du travail
 - Adhérence (pull-off test)
 - Traction directe



Matériaux

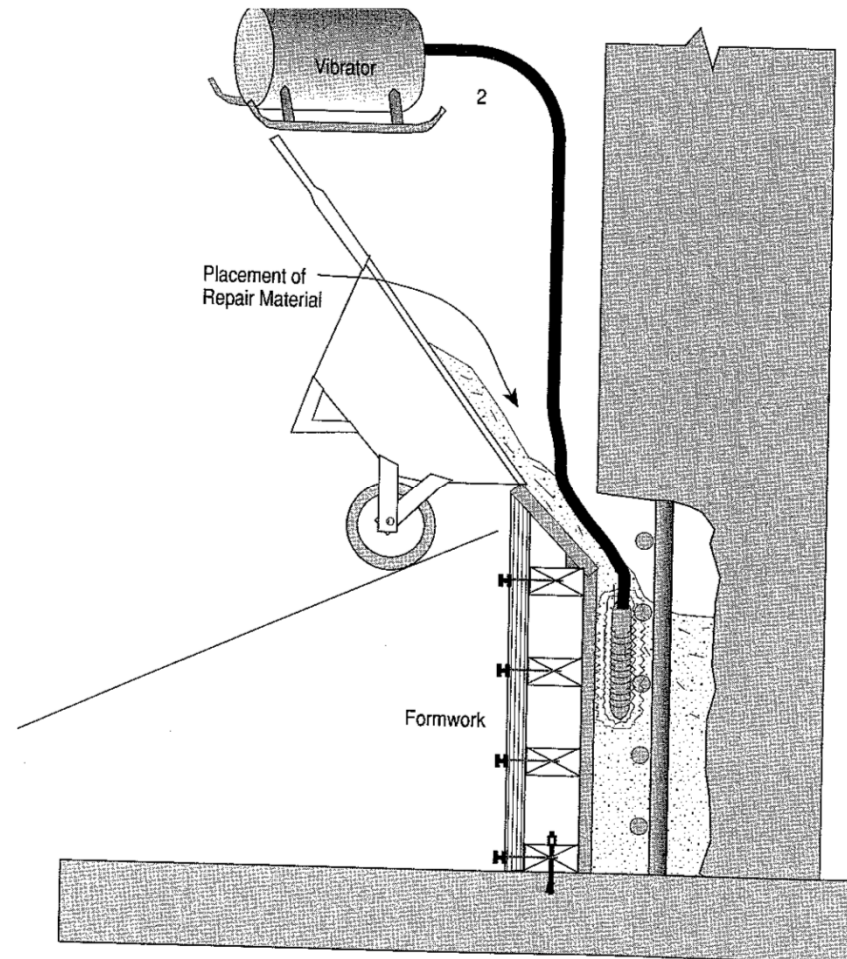
Matériaux

- Béton coulé en place derrière une paroi coffrée
 - profondeur minimale de 150 mm
 - dégagement d'au moins 25 mm derrière les barres d'armature.
 - coffrages 450 mm de hauteur au maximum pour éviter que le béton ne tombe d'une hauteur de plus de 300 mm environ
 - compaction externe



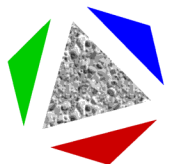
Matériaux

- Béton coulé en place derrière une paroi coffrée



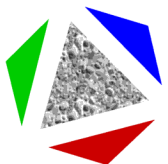
Matériaux

- Dry pack
 - Mortier sec sans affaissement
 - Faible dosage en eau
 - Faible teneur en pâte (et donc faible retrait)
 - Ouvertures de faible surface mais relativement profondes



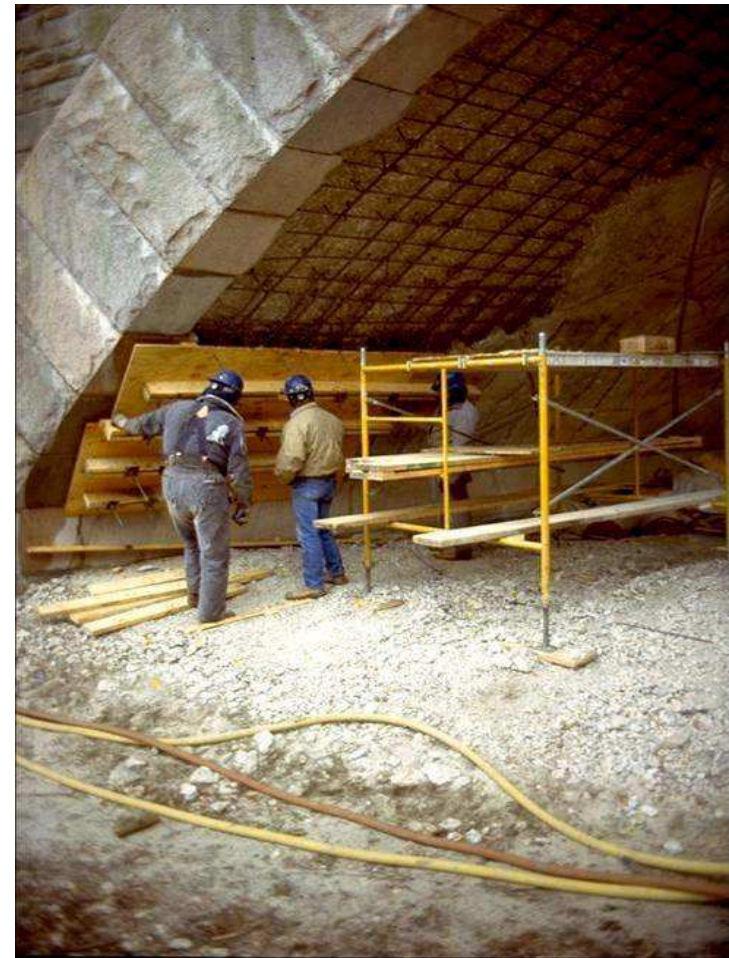
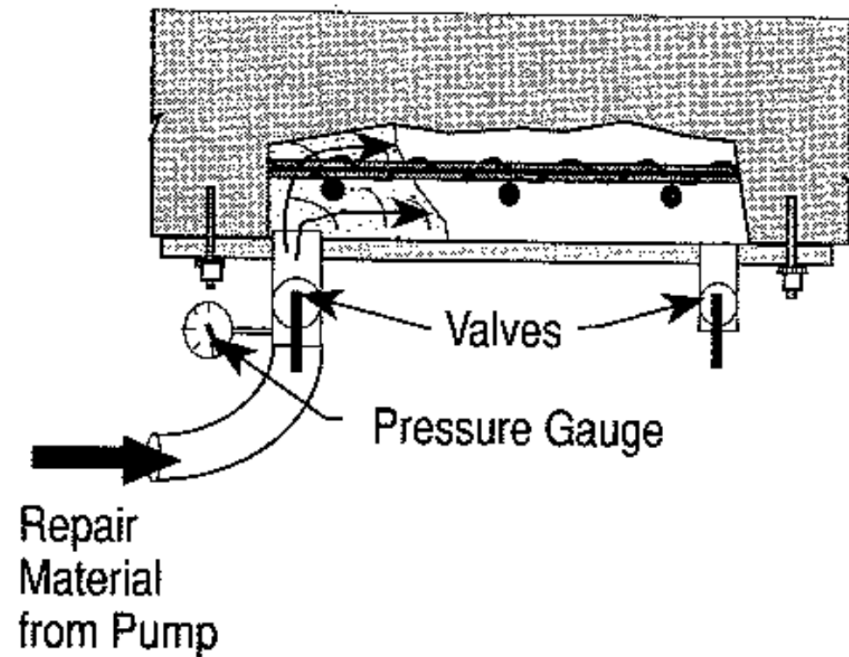
Matériaux

- Béton pompé derrière une surface coffrée
 - Avantages:
 - possibilité de pomper des mortiers ou des bétons (avec ou sans polymères);
 - la mise en place n'est pas limitée par l'épaisseur de la réparation ou la densité des aciers d'armature ;
 - contrôle de la qualité aisé du matériau de réparation ;
 - les pressions de pompage favorisent un bon contact entre le matériau de réparation et le vieux béton (ou les aciers d'armature) ;
 - les coffrages facilitent la cure du matériau de réparation.
 - Désavantages
 - coût des coffrages
 - étanchéité (peut nécessiter l'utilisation de matériaux d'étanchéification le long du périmètre des coffrages) ;
 - solidité et rigidité des parois pour résister aux pressions de pompage (on doit prévoir une pression de l'ordre de 100 kPa) ;
 - nombreux ancrages.



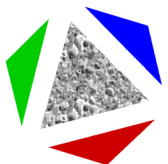
Matériaux

- Béton pompé derrière une surface coffrée



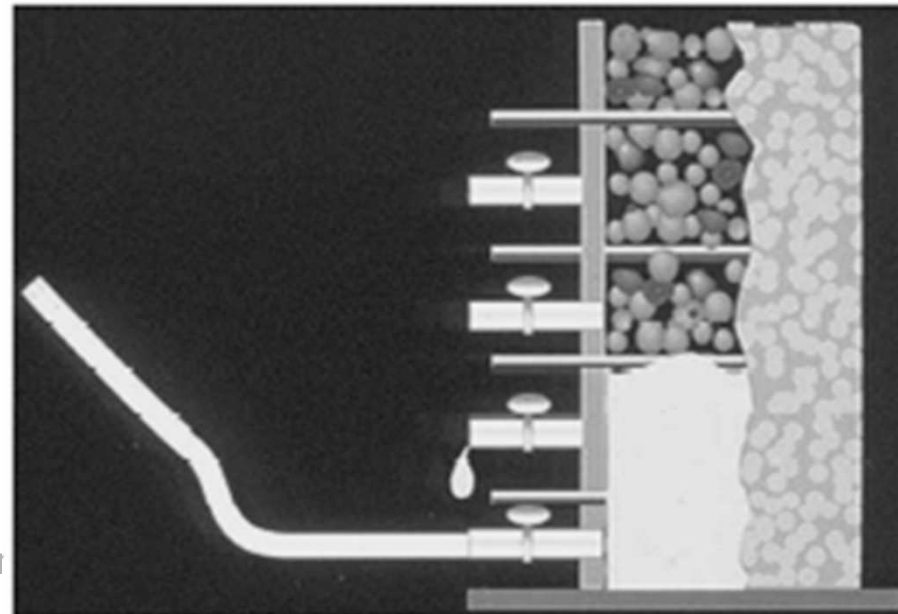
Matériaux

- Injection d'un mélange de granulats
 - Injection d'un coulis dans les vides d'un mélange granulaire propre
 - ajuster la granulométrie pour obtenir un indice des vides compris entre 35% et 45% après consolidation des granulats
 - granulats préalablement lavés pour enlever toutes les fines
 - squelette granulaire continu
 - coulis d'injection: ciment, sable fin (rapport 1:6), eau, adjuvant et ajouts minéraux (cendres volantes, laitiers).
 - D_{\max} : 2 mm
 - D_{95} : 1 mm



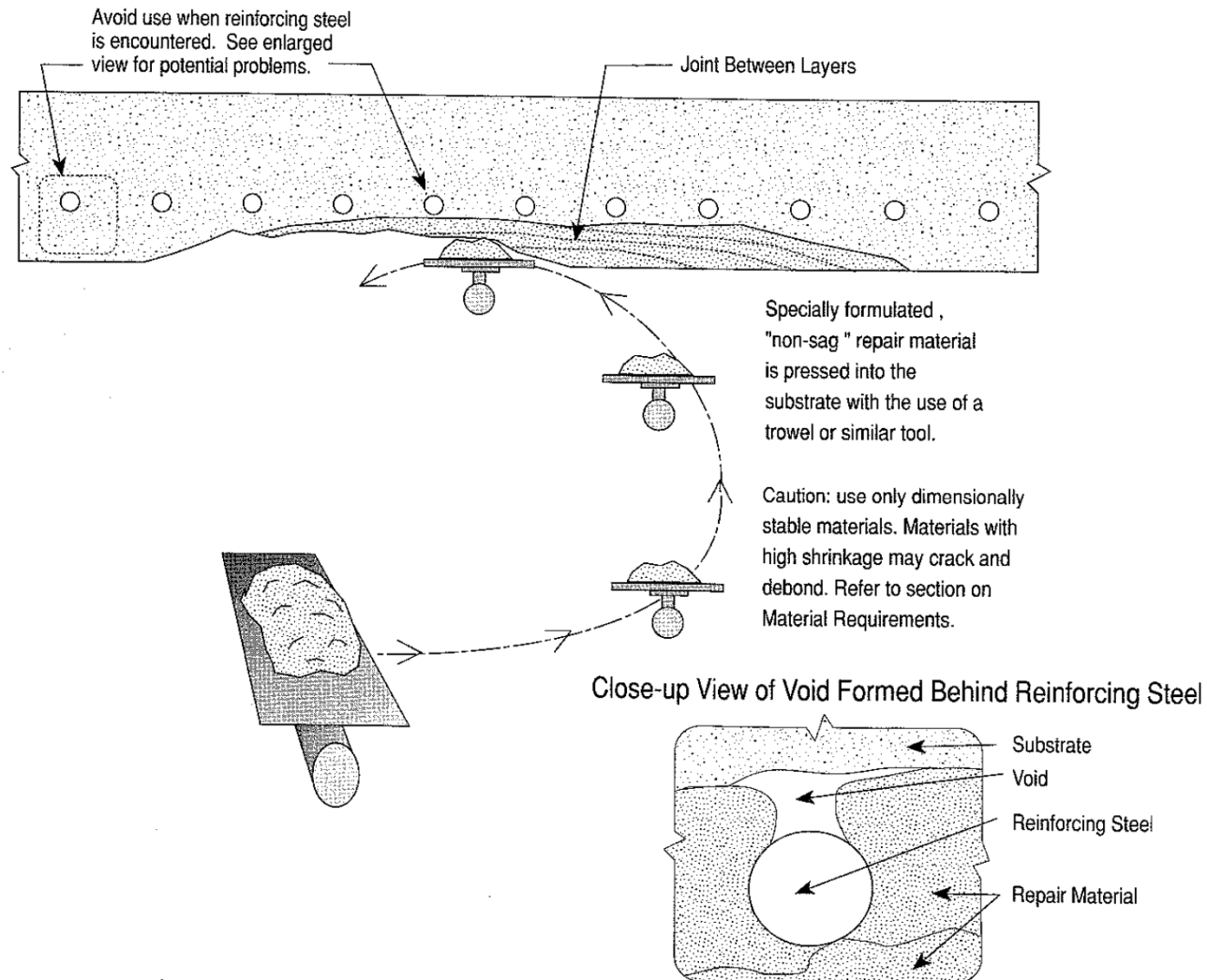
Matériaux

- Injection d'un coulis dans les vides d'un mélange granulaire propre
 - vibration externe
 - retrait faible
 - PAC: 200 – 400 $\mu\text{m}/\text{m}$
 - Béton conventionnel: 400 – 600 $\mu\text{m}/\text{m}$



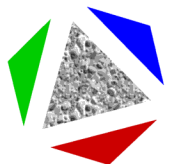
Matériaux

■ Application du mortier à la truelle



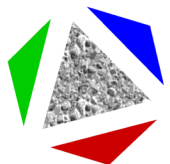
Matériaux

- Béton projeté: béton mis en oeuvre par refoulement dans une conduite et projeté sur une paroi par un jet d'air comprimé.



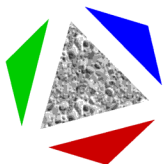
Matériaux: béton projeté

- Application rapide
- Grandes surfaces verticales ou horizontales
- Coffrage pas nécessaire
- Principale utilisation :
 - réparations de surface corrodées de béton
- Rc entre 30 et 40 MPa
- Bonne adhérence avec l'ancien béton
- Bonne protection contre la corrosion des aciers d'armature



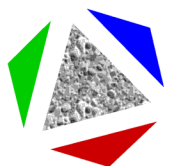
Matériaux: béton projeté

- La machine à projeter, constituée d'une machine à refoulement pneumatique ou d'une pompe à béton;
- La conduite d'amenée du mélange sec ou mouillé;
- La lance, dispositif situé en bout de la conduite d'amenée du mélange.
- Selon la technique utilisée, l'entrée de la lance est munie de tuyaux d'approvisionnement en:
 - eau et, éventuellement en adjuvants liquides, dans la projection par voie sèche;
 - adjuvants liquides et dans certains cas en air comprimé dans la projection par voie mouillée.

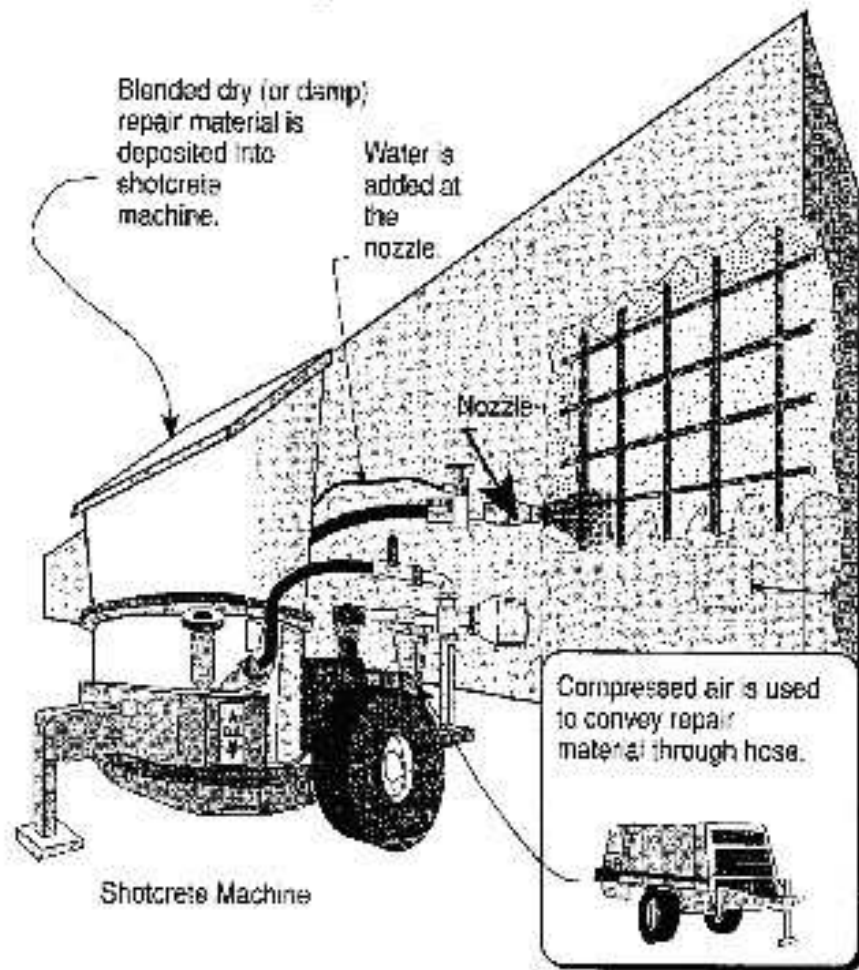


Matériaux: béton projeté

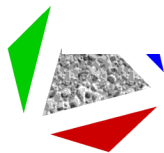
- Principaux problèmes:
 - mauvaise adhérence avec le substrat ;
 - délaminations aux joints de construction ou aux interfaces entre les couches ;
 - mauvais remplissage derrière les barres d'armature ;
 - ségrégation, poches de sable ou piégeage des rebonds.



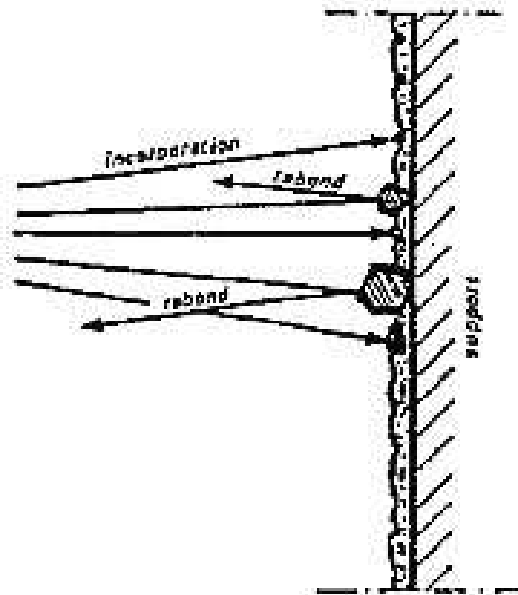
Béton projeté : projection par voie sèche



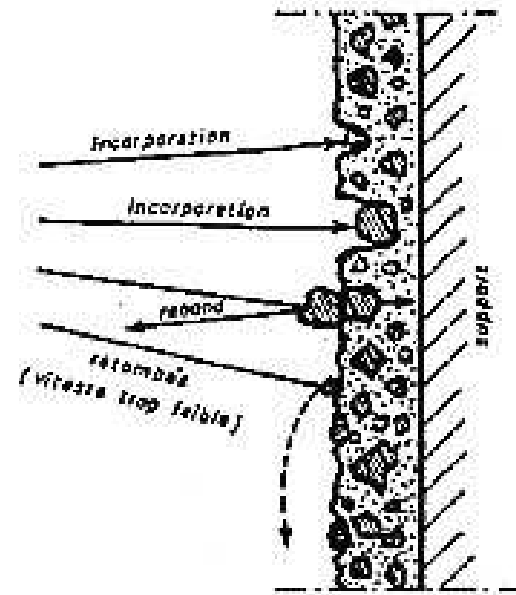
- Air comprimé introduit dans la machine
- Propulsion du mélange sec par la conduite d'amenée vers la lance
- Introduction Eau + (adjuvants)



Béton projeté : projection par voie sèche

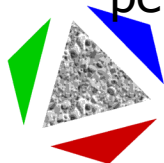


début de la projection



épaississement de la couche projetée

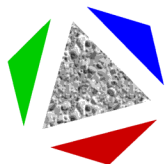
- Les premiers éléments arrivant sur le support rebondissent
- Seuls les grains de ciment et les gouttelettes d'eau, s'incrustent sur la surface à réparer.
- Le sable puis les grains plus gros et graviers viennent ensuite se fixer
- Couche de plusieurs centimètres, le martèlement des agrégats favorise la pénétration des précédents et assure la compacité du béton mis en place



➤ dosage en ciment béton en place > dosage initial en ciment

Béton projeté : projection par voie sèche

Avantages	Inconvénients
Les boyaux sont plus légers	Plus de pertes (jusqu'à 20%)
On peut interrompre et redémarrer les travaux plus rapidement car il n'est pas nécessaire de vider les boyaux pendant les arrêts.	Plus de bruit et de poussière
Pas besoin d'une usine à béton à proximité.	Plus de rebond
Permet de fabriquer des bétons avec des propriétés mécaniques plus élevées (E/C plus faible).	Béton plus hétérogène
	Taux d'application plus faible
	Plus difficile d'utiliser des fibres (plus de rebonds)
	Contrôle du rapport E/C plus difficile



Béton projeté



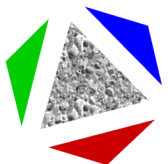
Préparation et techniques

Préparation de surface

- Profondeur de la réparation
 - pour favoriser une bonne adhérence, il est préférable d'éviter les rebords avec épaisseur progressive («*feathered edge*»)

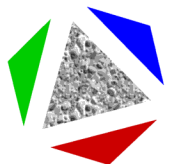


- Géométrie de la zone réparée
 - pour éviter l'initiation de fissures, il vaut mieux éviter les coins intérieurs
 - les réparations de type «*patchwork*» sont plutôt inesthétiques



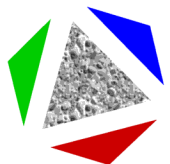
Préparation de surface

- Trait de scie de 20 mm
- Profondeur minimale retranchée
 - 60 mm depuis la surface (durabilité, adhérence)
 - 25 mm sous les armatures (test de la main)
- Remplacement de l'armature si la section des barres est réduite de 30 % ou plus



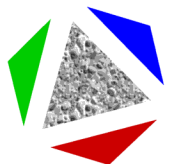
Mise en place

- La mise en place du béton est aussi une étape importante
 - méthodes: projection, pompage, injection, gravité, manuelle
 - conditions de mise en place:
 - accès
 - la température du matériau de réparation, du support et ambiante
 - le vent et le soleil
 - agent de liaison
 - méthode de consolidation
 - type de finition



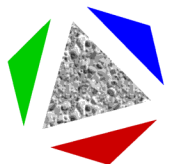
Conditions de mise en place

- La température semble être l'une des causes majeures de fissuration dans les ouvrages en béton:
 - éléments de taille importante (effet d'échelle)
 - dans les réparations minces, la chaleur d'hydratation est facilement dissipée et les risques de fissuration thermique précoce sont faibles
- Les éléments minces sont davantage vulnérables au séchage (température, soleil, vent)



Conditions de cure

- Mûrissement: très important dans le cas des réparations minces superficielles
- Paramètres
 - humidité
 - température
 - délai maximal avant le début du mûrissement
- Meilleurs résultats: mûrissement à l'eau
- Membrane
 - pratique et favorise l'amélioration de certaines propriétés (résistance à l'écaillage)
 - ne prévient pas le retrait
 - délai et taux d'application: contrôler de façon stricte





Merci

Danke

Takk

Hvala

Dziękuję

Thank you

Dank u

Grazie

Gratias

Arigato

Efkaristos

