Compatibilité de mortiers de réparation avec le patrimoine en ciment naturel de la région Rhône-Alpes

Myriam Bouichou - Elisabeth Marie-Victoire

" Les ciments naturels dans le patrimoine européen: histoire, propriétés, applications et conservation "
" Natural cements in European cultural heritage : history, properties, applications and conservation "
PARIS - 26 avril 2012 / 26th April

Contexte : 1er programme

- **Enquête et recherche documentaire**
  - recensement du patrimoine en ciment naturel et de ses altérations
  - deux types d'altérations : érosion et écaillage
  - altération principale : **érosion**

Réparations par mortiers gris et mise en peinture



Contexte : 1er programme

- **Caractérisation des bétons anciens**
  - Composition
  - Mécanismes d'altération
  - Principales propriétés physiques et mécaniques

➡ **Cahier des charges de performances à atteindre pour réparer les altérations observées**

Objectifs du 2e programme

- A partir
  - des résultats du premier programme (altérations et cahier des charges)
  - des produits existants
  - et des critères de conservation des supports anciens

Rechercher et tester des mortiers de réparation compatibles avec les bétons anciens et les altérations observées

→ **Mortier fin pour la réparation des altérations par érosion**

Démarche

1. **Choix de produits** de réparation

2. **Caractérisation** de ces mortiers de réparation

3. **Caractérisation du système** mortier/béton

1 - Choix des produits de réparation

Résultats du programme 1

- **Principales caractéristiques des bétons anciens**

- **Masse volumique** de ~2,3g/cm^3
- **Porosité** ouverte entre 15 et 20%
- **Module d'Young** entre 27 et 32GPa
- **Coefficient de dilatation** : ~10^{-5}/°C

→ Compacité et propriétés mécaniques moyennes

- **Teneur en sulfates** de ~4% par rapport à la masse de ciment (seuil pathogène = 4%)
- **Teneur en alcalins** équivalents de ~4,3kg/m^3 par rapport à la masse de ciment (seuil pathogène = 3,3 kg/m^3)

→ Concentrations supérieures aux seuils pathogènes (Portland)

Résultats du programme 1

- **Type de réparation**
  - Altération par érosion
  - Produit de réparation = enduit de faible épaisseur

→ **Maniabilité et mise en œuvre compatibles avec l'application d'un enduit mince**

- **Type d'édifices**
  - Parmi les premiers édifices en béton, architecture spécifique, contexte des Monuments Historiques (ZPPAUP)

→ **Conservation du support ancien, couleur et aspect proches des matériaux d'origine, réversibilité des réparations** (charte de Venise)

Cahier des charges

- **Agrégats** : sable, non réactif vis à vis de l'alcali-réaction
- **Liant** : résistant aux sulfates
- **Retrait** : faible (< 0.1% après 1 an)
- **Propriétés de transfert et propriétés mécaniques** : adaptées à celles des supports anciens
- **Compatibilité esthétique**
- Et **durabilité**

Produits actuellement utilisés

Principalement des matériaux de réparation à base de **résines synthétiques** :

- Perméabilité faible à nulle
- Résistances mécaniques élevées
- Forte adhérence
- Couleur grise

Ces produits ne correspondent pas au cahier des charges

Produits testés

- **Mortiers 1 & 2**

  → Prêts à l'emploi à base de ciment prompt

- **Mortier 3**

  → Formule de chantier à base de ciment prompt

- **Mortier 4**

  → Prêt à l'emploi à base de ciment gris actuellement utilisé

2 - Caractérisation des mortiers de réparation

Comment les caractériser?

- **Examen de la microstructure des mortiers et évaluation de leurs propriétés physiques, mécaniques et de transfert**

- **Objectif : s'assurer que ces propriétés soient compatibles**
  - avec celles des bétons anciens
  - avec l'application choisie
  - dans le contexte de conservation du patrimoine

Protocole d'essais

- **Propriétés de transfert**
  - porosité, perméabilité à la vapeur d'eau, capillarité

Objectif : Caractériser le comportement des mortiers vis à vis de l'eau (liquide et vapeur)

- **Propriétés mécaniques et physiques**
  - résistance en traction par flexion, résistance en compression, module d'Young dynamique, retrait

Objectif : Caractériser la rigidité des mortiers, leur comportement à la fissuration, au décollement ou au faïençage

Protocole d'essais

- **Microstructure**
  - observations en microscopies optique et électronique à balayage

  Objectif : Caractériser la microstructure des mortiers

- **Esthétique**
  - observations visuelles, mesures de couleurs

  Objectif : Caractériser l'aspect des mortiers

Fabrication des éprouvettes

50 éprouvettes fabriquées pour chaque produit, 4 mortiers

➔ *200 éprouvettes*

- prismes 4x4x16 cm
- prismes 4x4x16 cm appareillés
- disques 11x1 cm

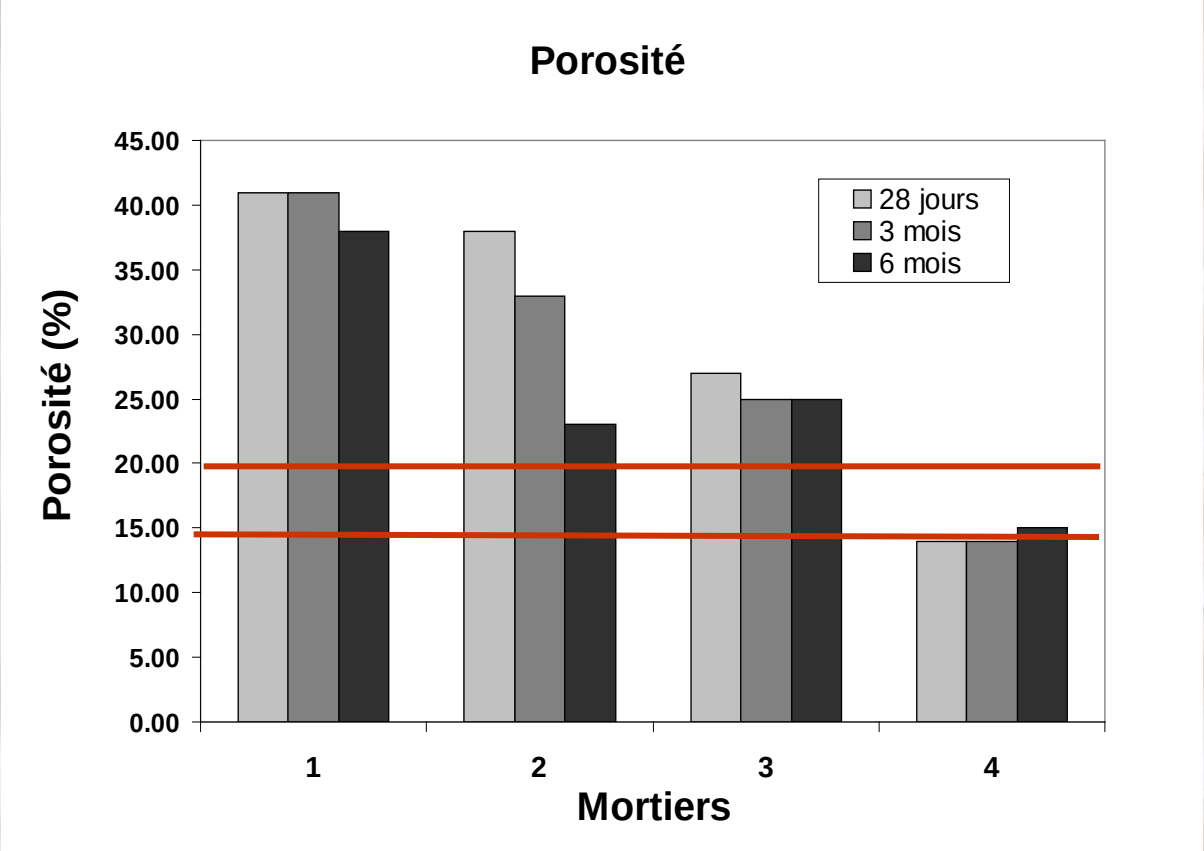






Porosité à l'eau

Rapport du volume total des pores ouverts du mortier à son volume apparent

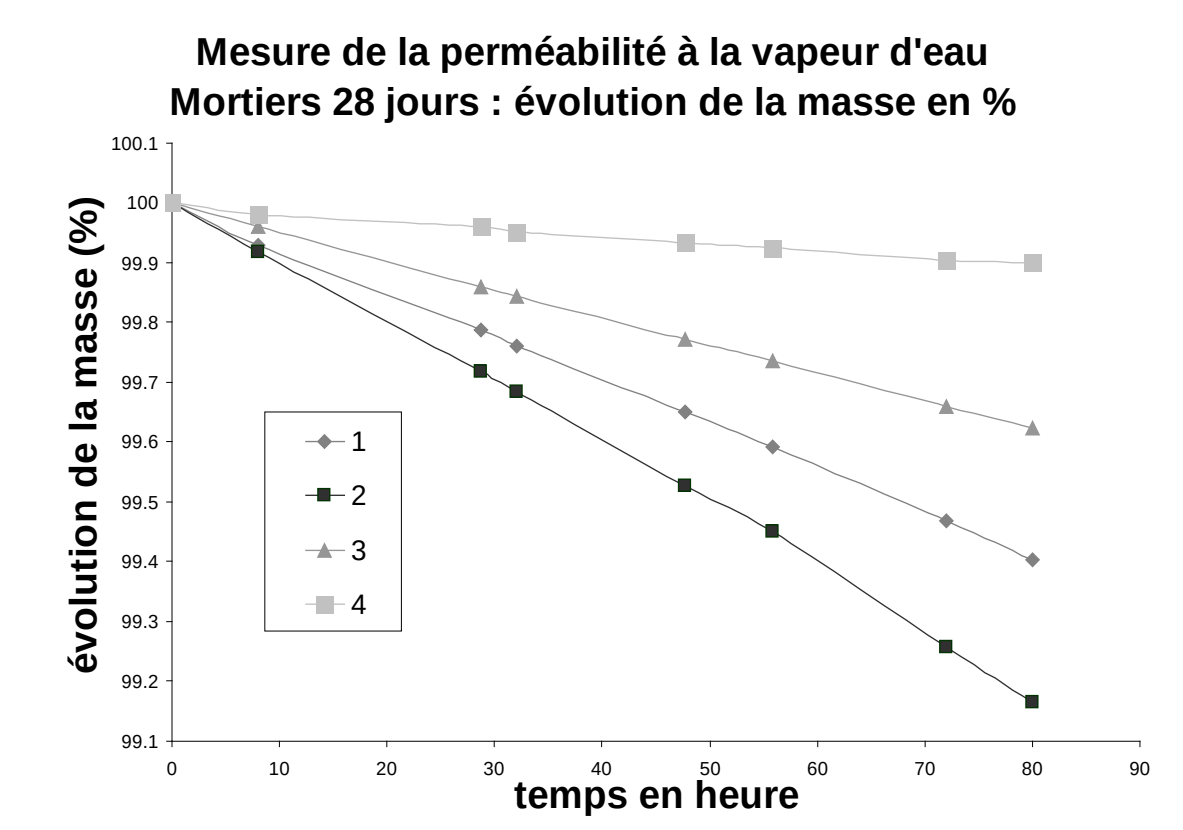


⇨ Porosité des mortiers 1, 3 et 4 stables mais forte diminution pour le mortier 2 dans le temps

⇨ Porosité du mortier 4 très faible

Perméabilité à la vapeur d'eau

Flux de vapeur d'eau traversant le mortier



M4 : 0.08± 0.01 g/m2.h.mmHg

M3 : 0.36± 0.03 g/m2.h.mmHg

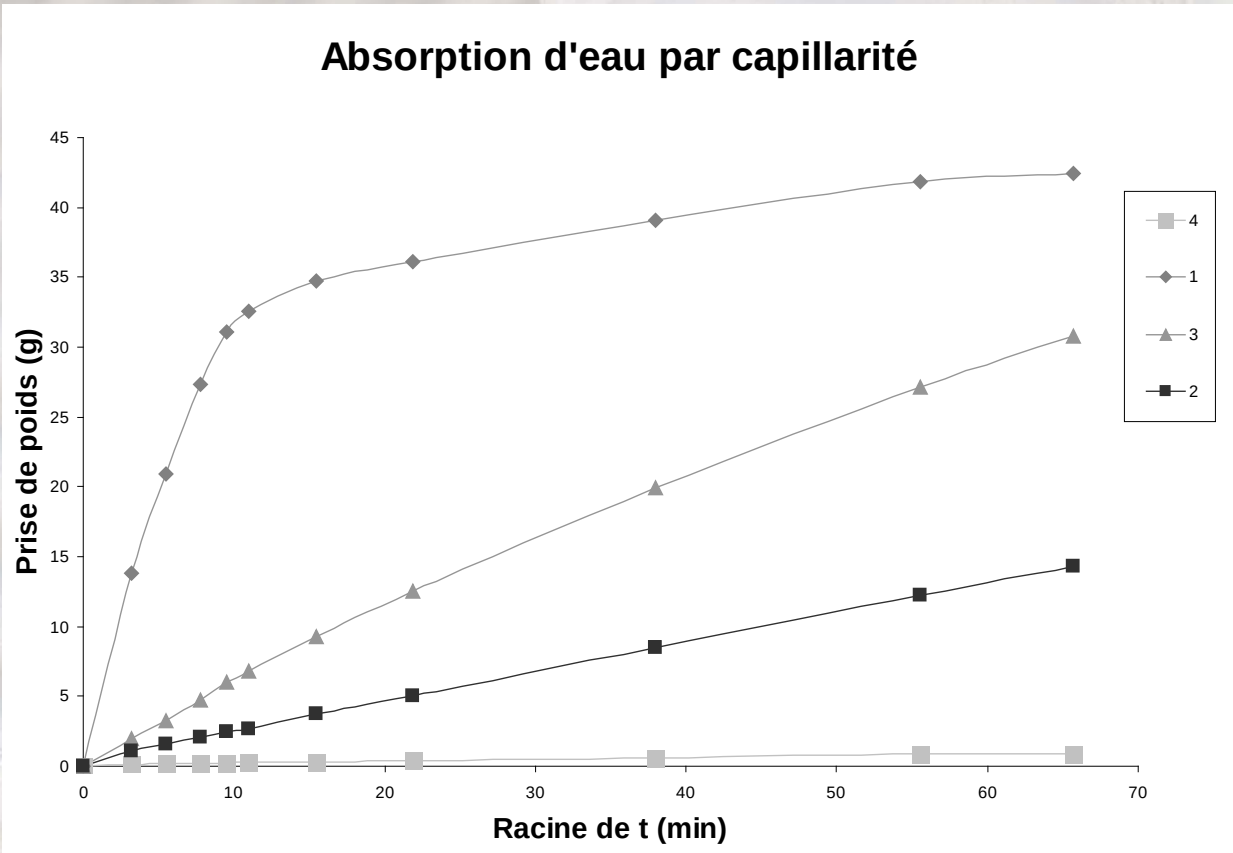
M1 : 0.53 ± 0.03 g/m2.h.mmHg

M2 : 0.72 ± 0.01 g/m2.h.mmHg

⇨ Perméabilité à la vapeur d'eau très faible pour le mortier 4

Absorption d’eau par capillarité

Capacité du mortier à s’imbiber d ’eau par des forces de succion



M1 : 20 ± 3.54 g/cm^{2}min^2

M3 : 3.94 ± 1.04 g/cm2min2

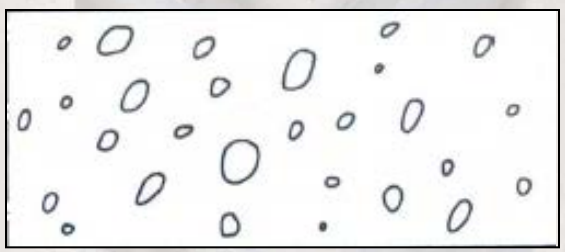
M2 : 1.35 ± 0.03 g/cm2min2

M4 : 0.10 ± 0.001 g/cm^{2}min^2

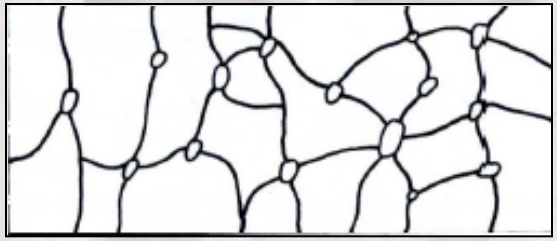
⇨ Absorption d’eau par capillarité très importante pour le mortier 1

Bilan des propriétés de transfert

- **Mortier 4** : de faible porosité et à porosité fermée, imperméable à l ’eau et à la vapeur d’eau



- **Mortiers 1 et 2** : porosités à l ’eau proches mais systèmes poreux différents
  - mortier 1 : perméabilité assez faible, capillarité forte
  - mortier 2 : perméabilité forte, capillarité faible

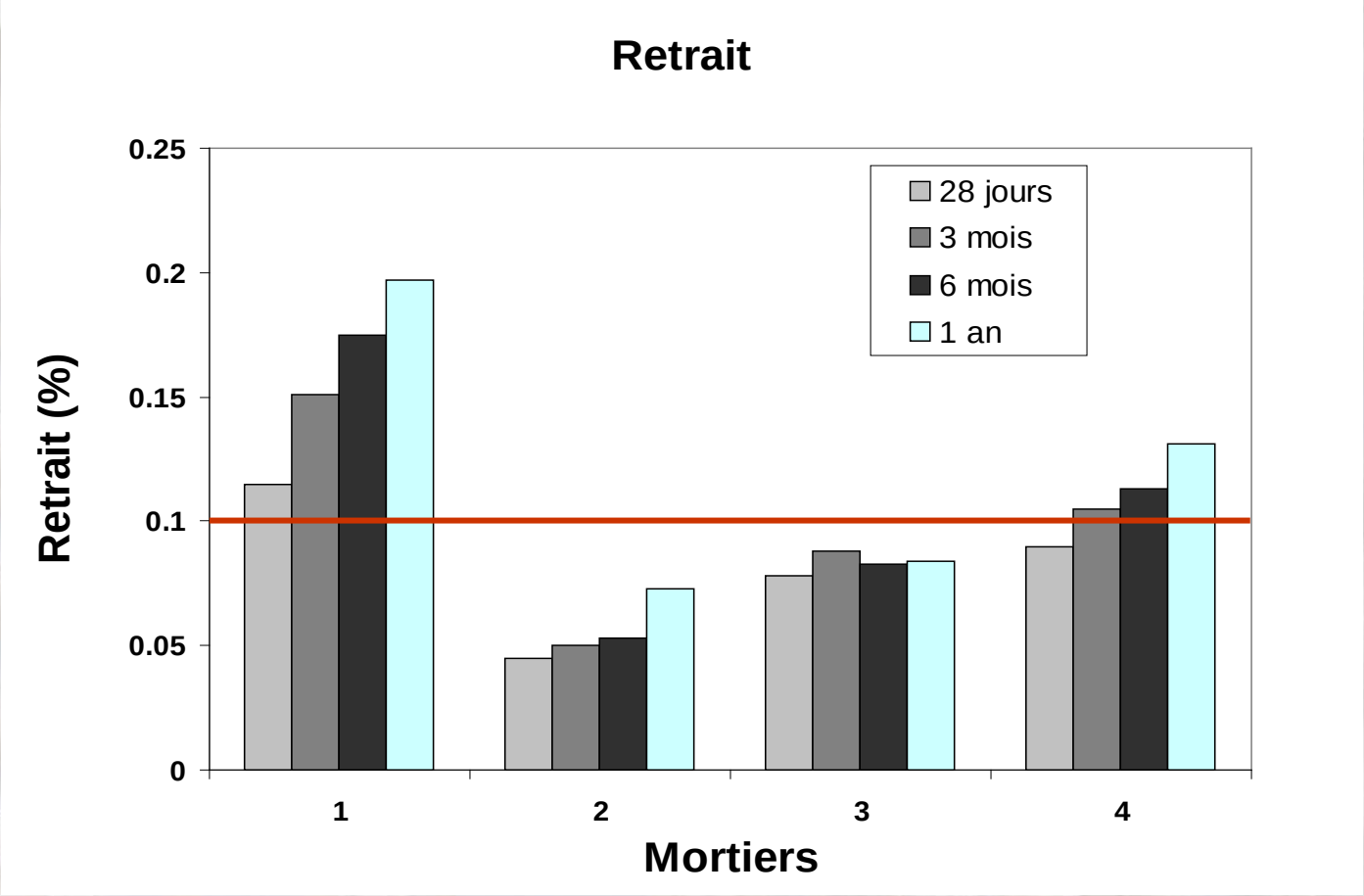




- **Mortier 3** : porosité moyenne, intermédiaire

Retrait

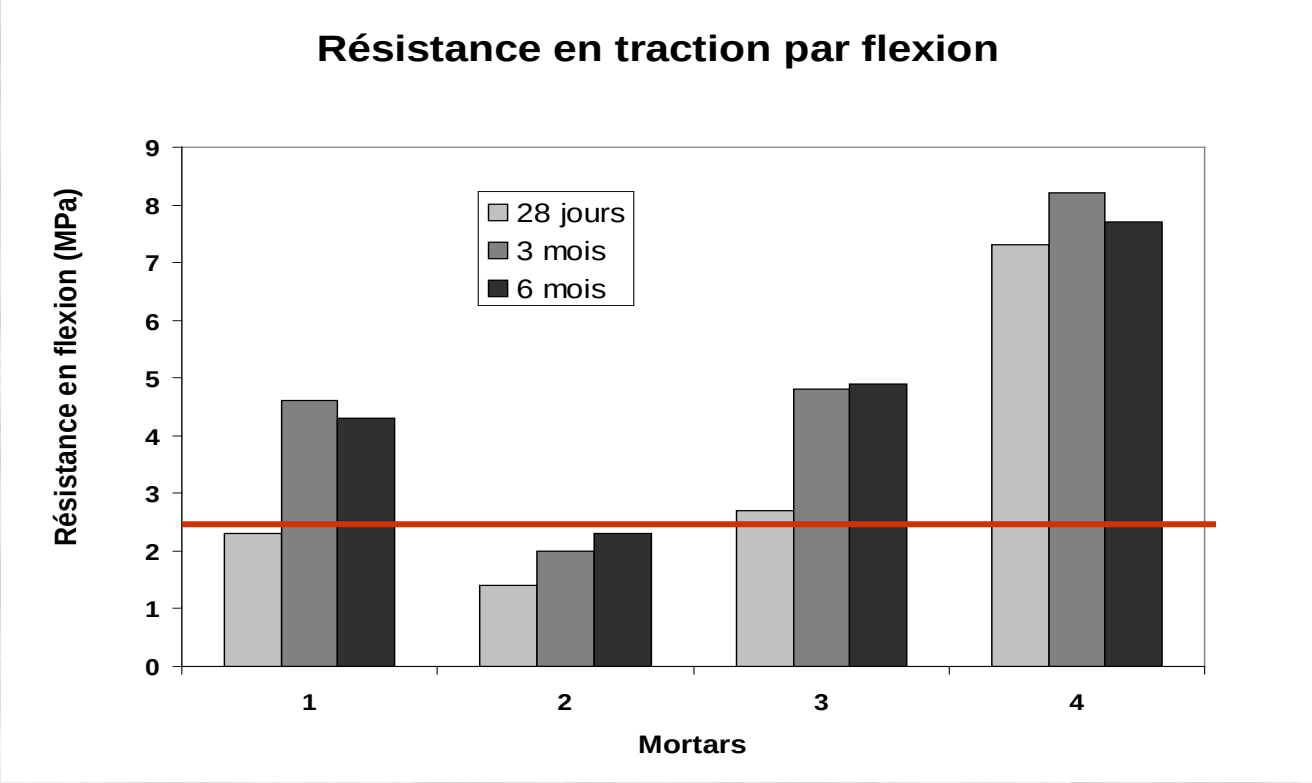
Diminution de volume du mortier après prise



⇨ Après 1 an, seuls les mortiers 2 et 3 présentent un retrait inférieur au seuil de 0.1% prescrit dans le cahier des charges

Résistance en traction par flexion

Quotient de la charge maximale enregistrée lors de la flexion d'une éprouvette par la section initiale de cette éprouvette

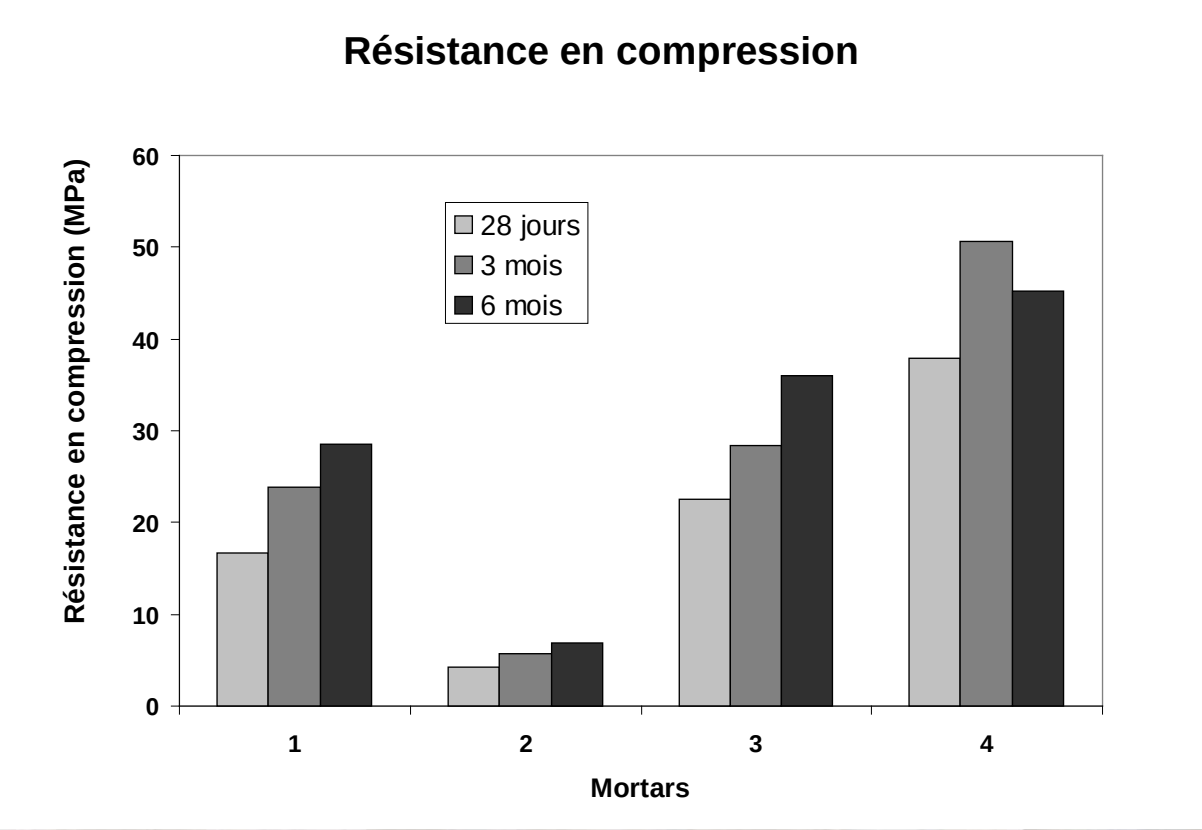


⇨ Mortier 4 ⇨ le plus performant

⇨ Rt du Mortier 2 inférieure à 2.5MPa ⇨ valeur limite pour un mortier de réparation

Résistance en compression

Quotient de la charge maximale enregistrée lors de la compression d'une éprouvette par la section initiale de cette éprouvette



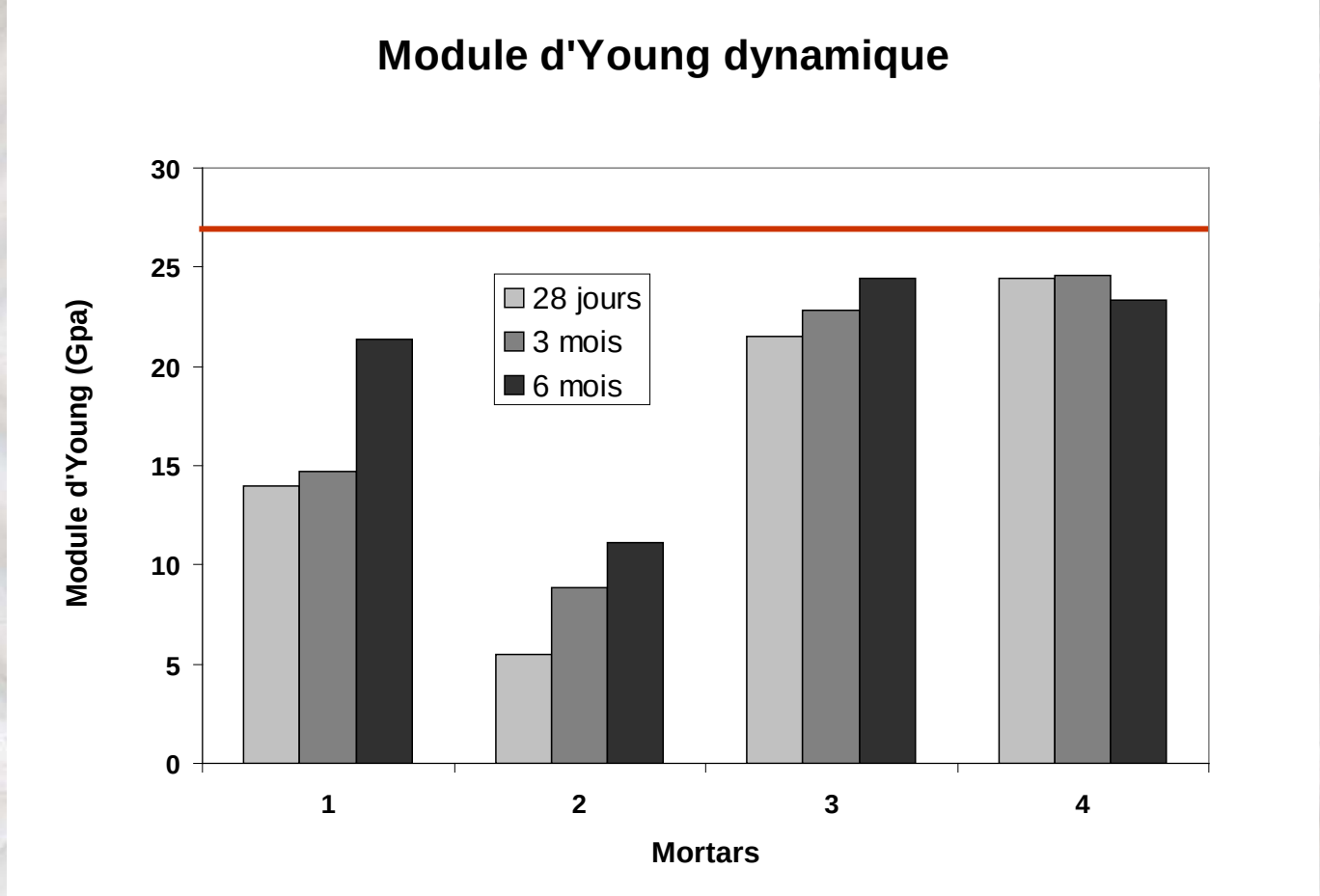
⇨ Mortier 4 (à base de ciment portland) ⇨ le plus performant

⇨ Mortier 2 ⇨ le moins performant

⇨ Amélioration des performances des mortiers à base de prompt avec le temps

Module d'Young dynamique

Déformabilité du mortier sous l 'effet de contraintes. Plus E_{dyn} est élevé, plus le matériau est rigide.



⇨ Modules des 4 mortiers inférieurs à 27 Gpa (valeur la plus basse mesurée sur les bétons anciens)

Bilan des propriétés physiques et mécaniques

- Le retrait des mortiers 1 et 4 est trop fort et pourrait être à l'origine de fissurations
- Pas d'incompatibilité de rigidité entre les 4 mortiers et les bétons anciens (tous moins rigides)
- Si on considère le rapport R = Rt/Rc, qui caractérise la fragilité du matériau :

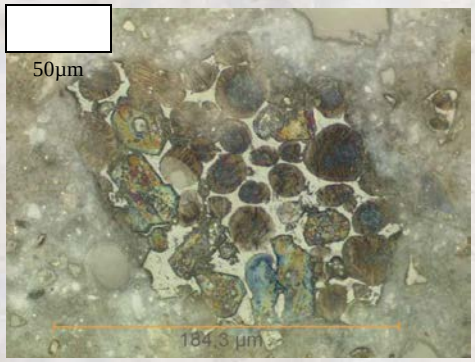
R1 = 0.14
R2 = 0.33 → Le moins fragile, le plus déformable
R3 = 0.12
R4 = 0.19

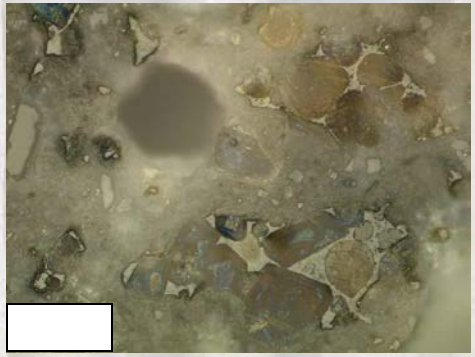
Microstructure

- Microscopique optique (Gx500, après attaque borax)
  - Phases non hydratées, différences entre les liants

Mortier 4 *(à base de portland)*

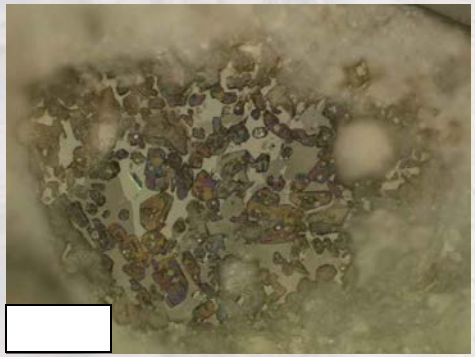
- Alite et Bélite bien cristallisés
- Pas de séparation nette entre C4AF et C3A

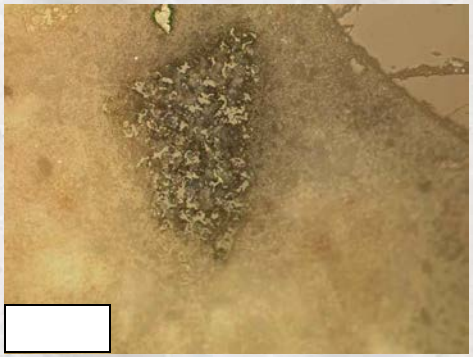




Mortiers 1, 2 et 3 *(à base de prompt)*

- Cristaux d'Alite et de Bélite de petites dimensions
- Grains anhydres résiduels mal cristallisés
- Phases C4AF et C3A bien séparées



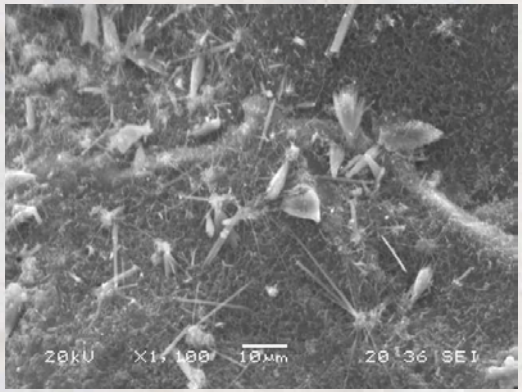


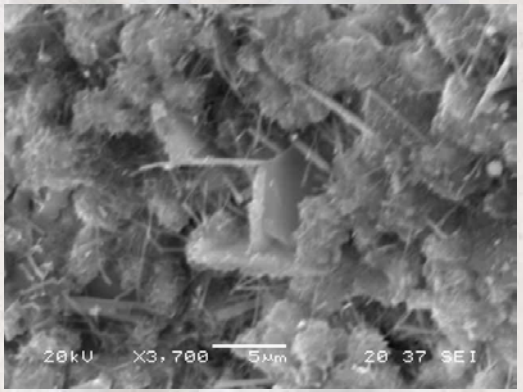
Microstructure

- Microscopique électronique à balayage

Mortiers 1, 2 et 3 *(à base de prompt)*

• Cristallisations de CSH, d ’ettringite et ponctuellement de portlandite



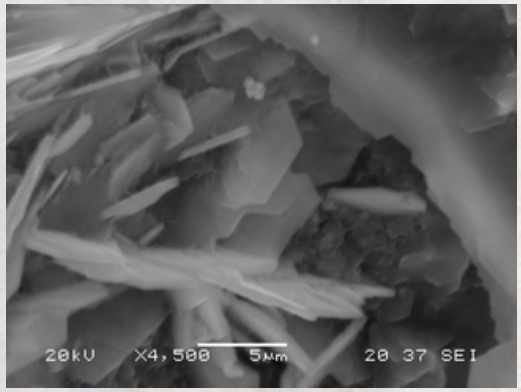


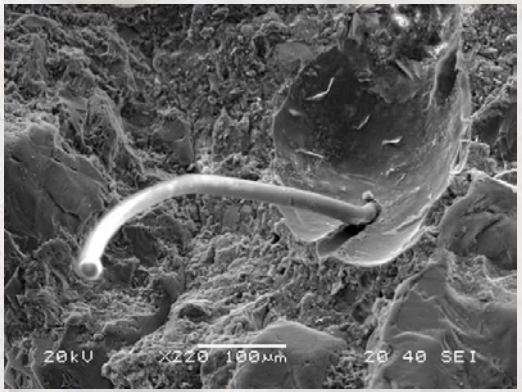
Microstructure proche des bétons anciens

Mortier 4 *(à base de portland)*

• Cristallisations de CSH et de Portlandite

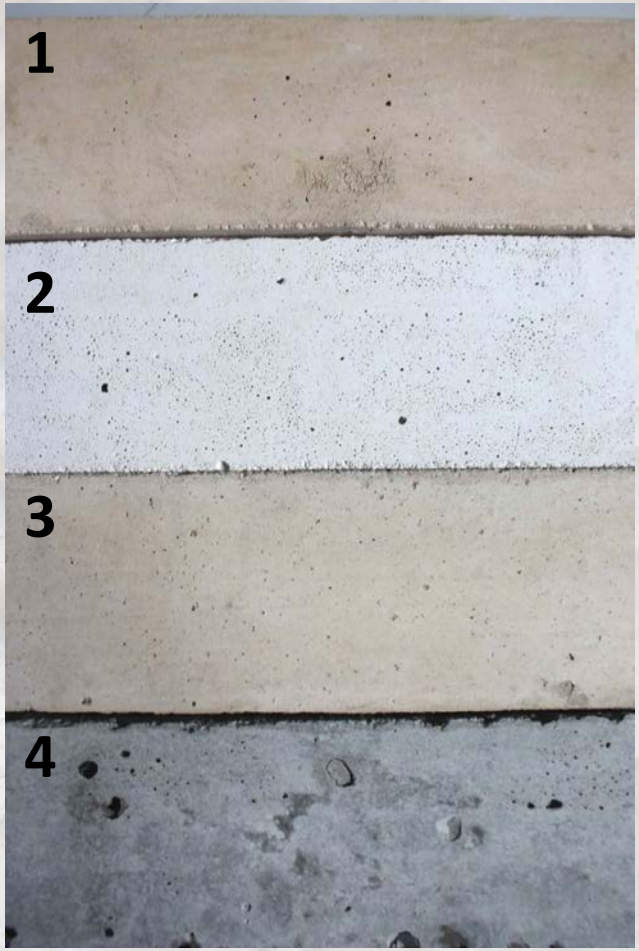
• Présence de fibres



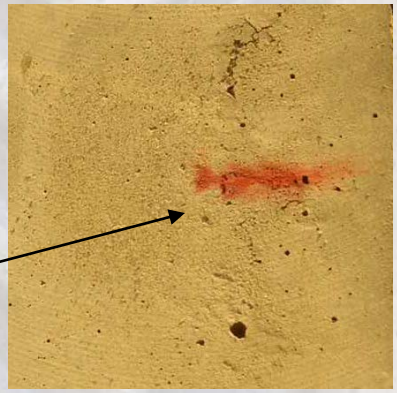


Microstructure différente des bétons anciens
(résistance aux sulfates non déterminée)

Esthétique - Observations à l'œil nu



Mortier 1 : couleur ocre adaptée mais traces de pigments



Mortier 2 : trop blanc, mais facilement teintable

Mortier 3 : couleur ocre adaptée aux bétons anciens

Mortier 4 : couleur gris foncé, inadaptée, difficilement teintable

3 - Caractérisation de la compatibilité mortier/béton

Démarche des essais sur dallettes

1. Fabrication des dallettes

2. Application des mortiers

3. Essais d'adhérence avant et après vieillissement

Fabrication des dallettes

- Utilisation d’une formule de béton « pierre factice » du 19e siècle
- Mélange d’un ciment prompt et d’agrégats de la région Rhône-Alpes
- Utilisation d’un produit de désactivation, pour simuler les faciès d ’érosion





Application des mortiers

- **Maniabilité**



Mortier 1
trop fluide

Mortier 4
trop « collant »



- **Comportement à la prise**



Mortier 1
faïençage durant
la prise

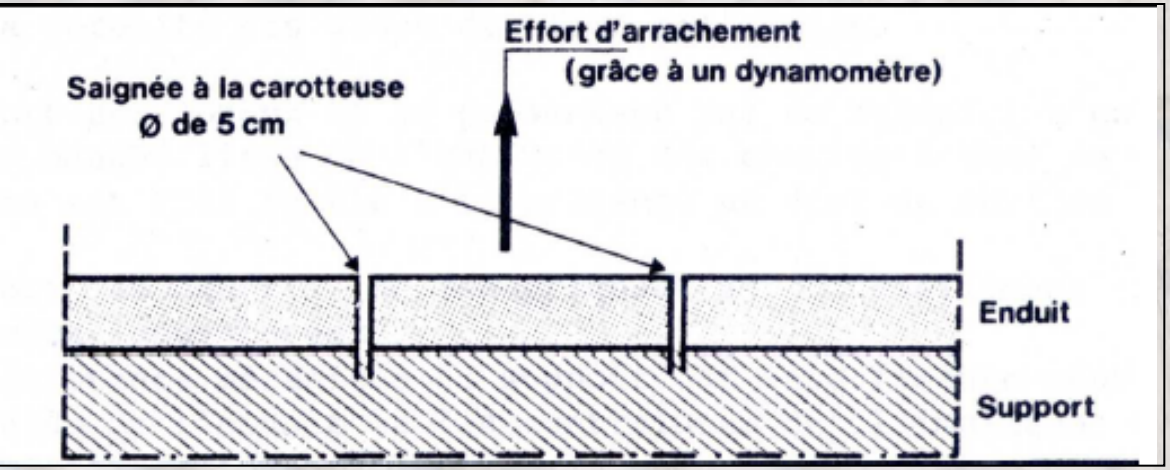
Mortier 4
efflorescences
après la prise



Essais d'adhérence

Traduit la capacité du mortier à adhérer au support

- **Principe**



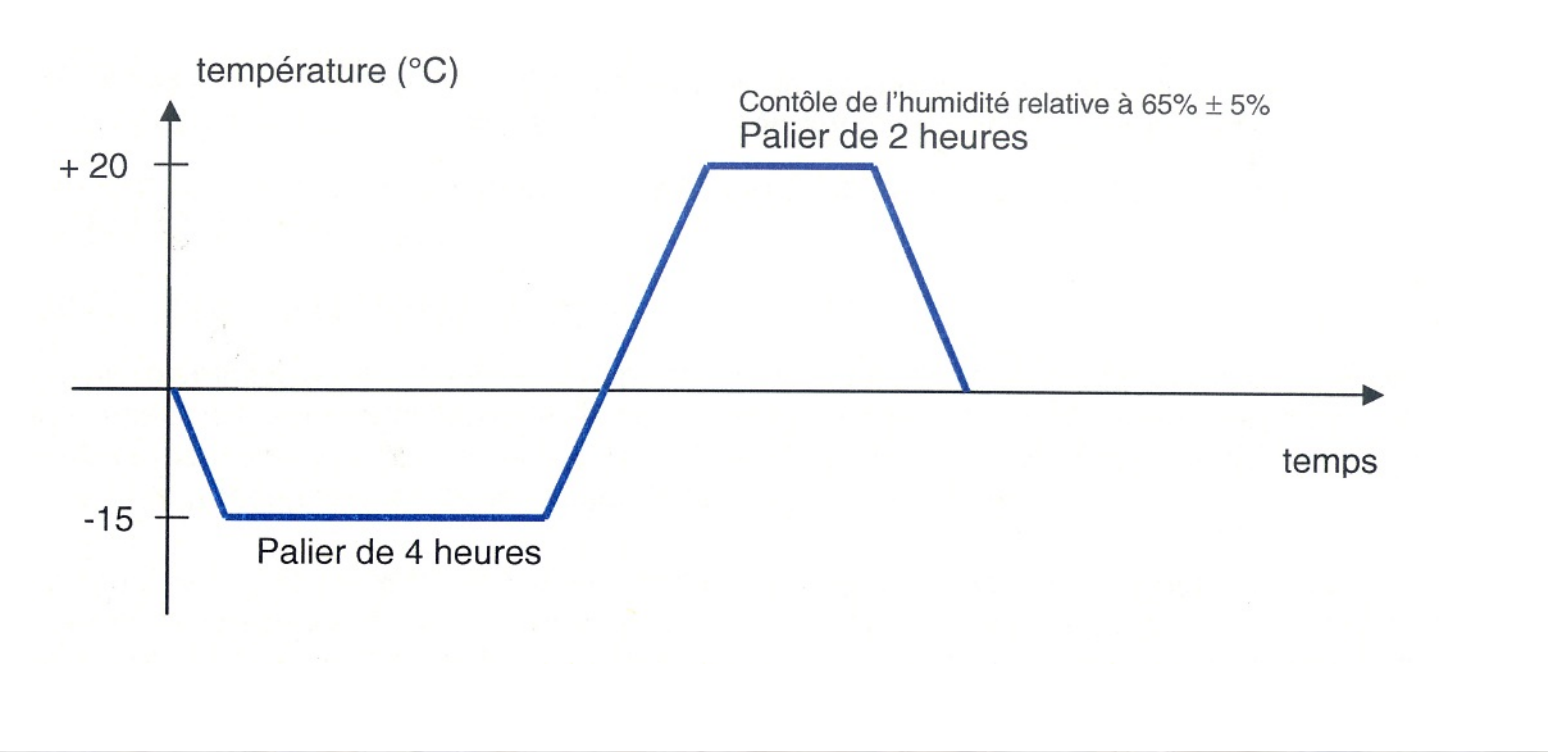


Mesure de la charge à la rupture, calcul de la résistance à l'arrachement et identification du type de rupture

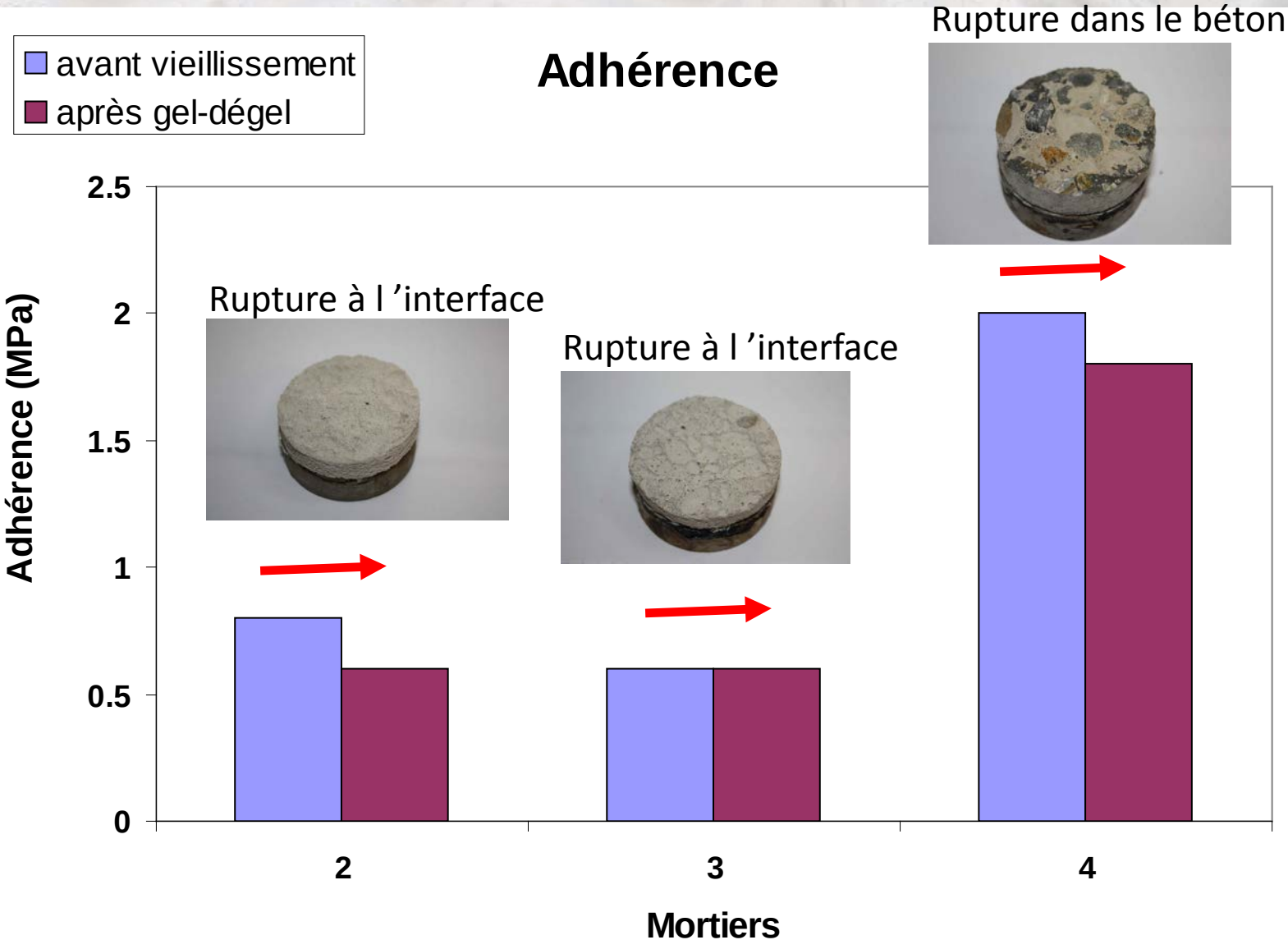
Vieillissements artificiels

Impossible sur les dallettes avec le mortier 1

1 Cycles gel-dégel



Adhérence après cycles gel-dégel



Aspect des dallettes après cycles gel-dégel

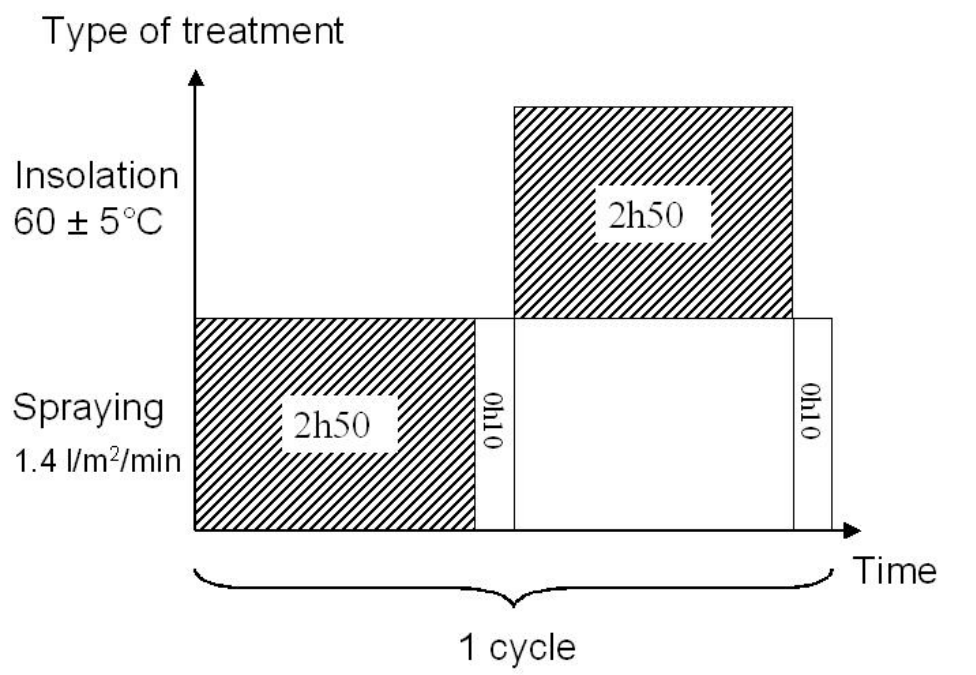
- Pas de désordre apparent pour les mortiers 2, 3 et 4

Mortier 2

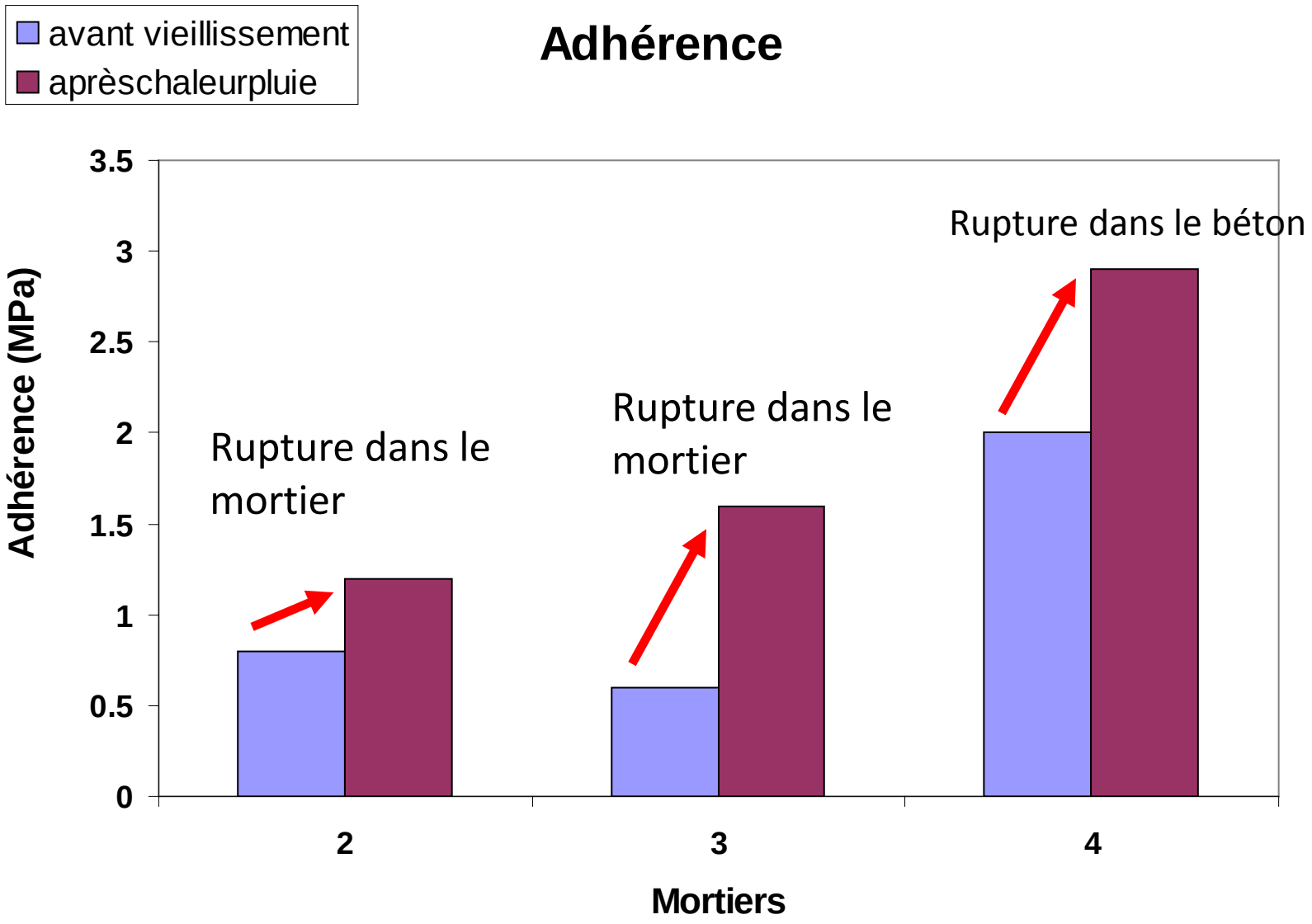


Vieillissements artificiels

2 Cycles chaleur-pluie



Adhérence après cycles chaleur-pluie



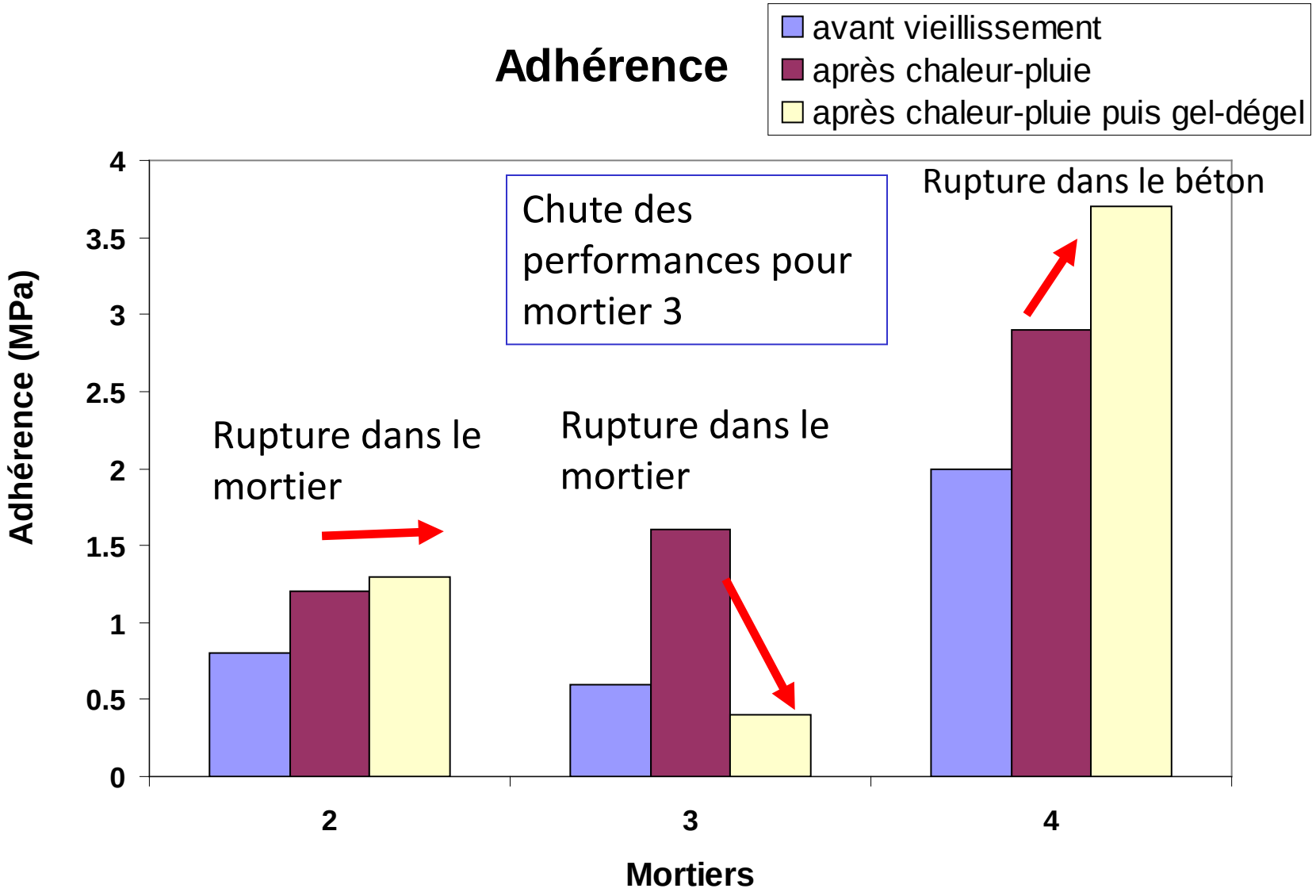
Aspect des dallettes après cycles chaleur-pluie

- Faïençage avec les mortiers 3 et 4



- Pas de désordre avec le mortier 2

Cycles chaleur-pluie puis gel-dégel



Aspect des dallettes après cycles chaleur-pluie puis gel-dégel

- Pas de désordre supplémentaire
  - Faïençage avec les mortiers 3 et 4
  - Pas de désordre avec le mortier 2

Bilan des essais sur dallettes

Adhérence

- **Mortier 1** ⇨ faïençage immédiat, très mauvaise adhérence
- **Mortier 4** ⇨ beaucoup trop adhérent, avec des ruptures dans le support
- **Mortiers 2 et 3** ⇨ bonne adhérence, avec des ruptures situées à l ’interface mortier/béton ou dans le mortier

Bilan des essais sur dallettes

Durabilité

- **Mortier 2** ⇨bonne durabilité, aucune dégradation
- **Mortiers 3 et 4** ⇨ dégradations observées avec ces mortiers pour les cycles chaleur-pluie probablement liées à un déficit de déformabilité

Bilan - Cahier des charges

- **Agrégats** : sable, non réactif vis à vis de l'alcali-réaction

  ⇨**tous les mortiers**

- **Liant** : résistant aux sulfates

  ⇨**mortiers 1, 2 et 3**

- **Retrait** : faible (< 0.1% après 1 an)

  ⇨**mortiers 2 et 3**

- **Propriétés de transfert et propriétés mécaniques** : adaptées à celles des supports anciens

  ⇨**mortiers 2 et 3**

- **Compatibilité esthétique**

  ⇨**mortier 3**

- Et **durabilité**

  ⇨**mortier 2**

Le **mortier 2** est le plus adapté

Conclusion

- **Mortiers 1 et 4** ⇨ incompatibles
- **Mortier 2** ⇨ correspond au cahier des charges mais sa couleur reste à adapter (ajouts de pigments…)
- **Mortier 3** ⇨ bonnes performances en général mais durabilité insuffisante aux cycles chaleur-pluie



Merci de votre attention