



Séance technique CFMR - CFGI (08/10/2020) : Altération des pierres du patrimoine bâti

**Altération des pierres de construction utilisées dans le patrimoine bâti
sous l'effet de hautes températures**

Martin VIGROUX

*Les résultats présentés dans ce document proviennent d'une thèse de doctorat soutenue le
27/02/2020, financée par la Fondation des Sciences du Patrimoine et
co-dirigée par Albert NOUMOWE (L2MGC) et Ann BOURGES (ex-LRMH)*

Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

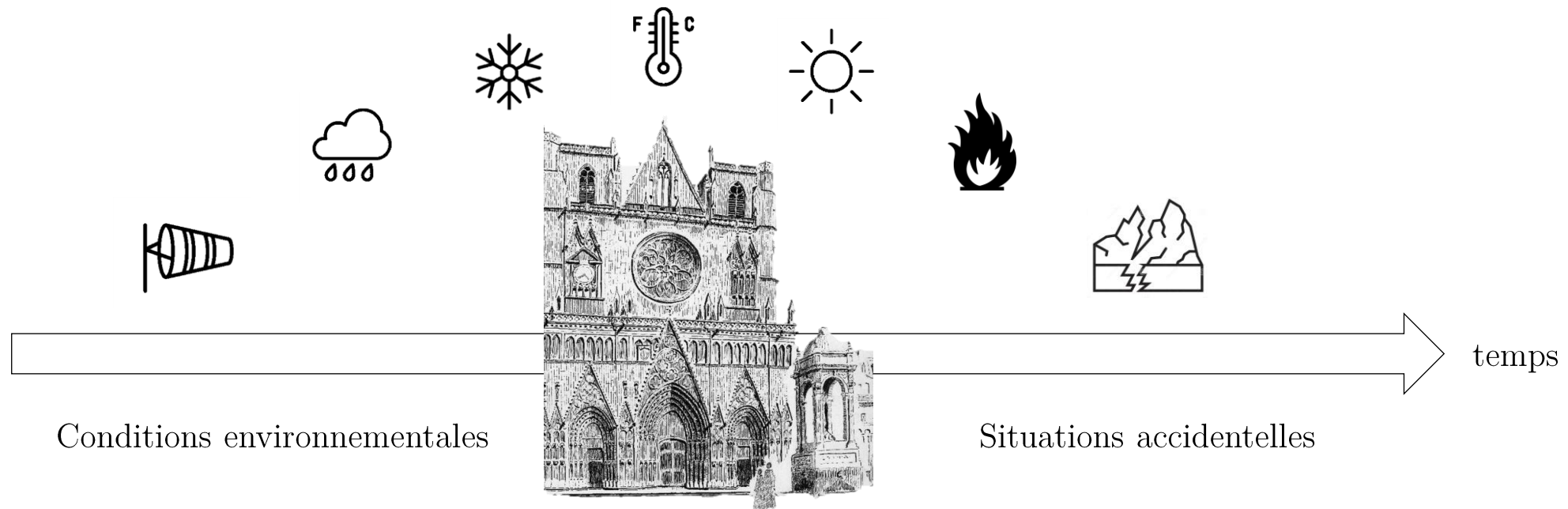
Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

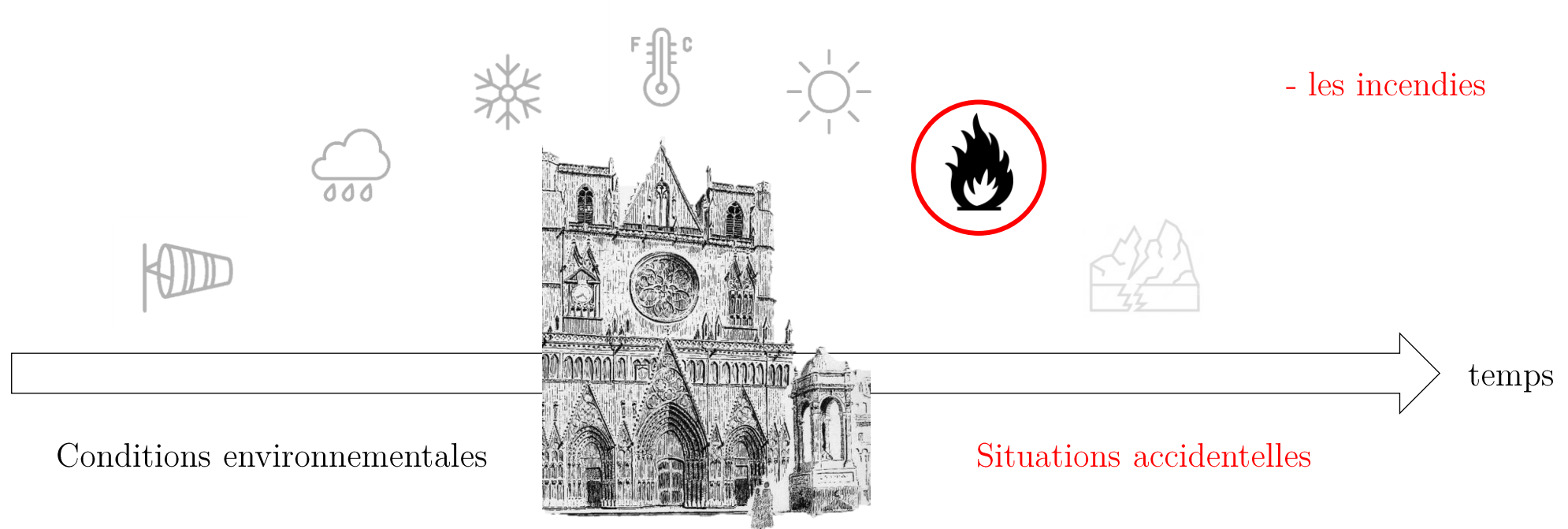
Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

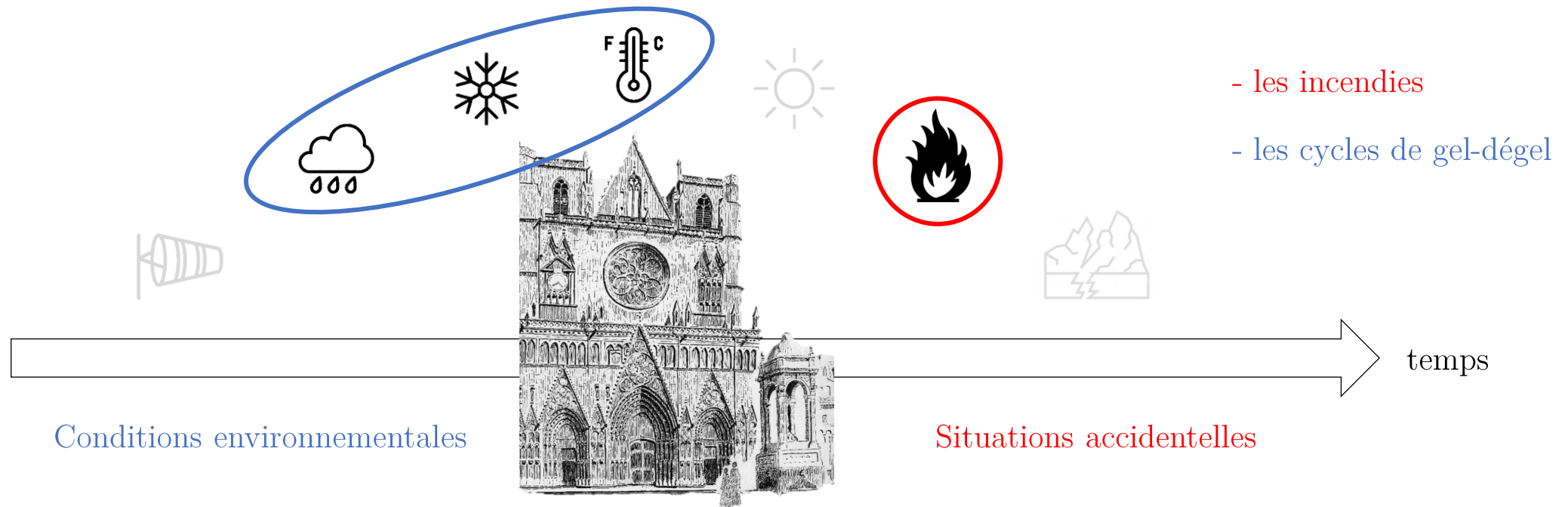
Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères

Objectifs : Contribuer à la compréhension des mécanismes de dégradation des pierres sollicitées

Faciliter le diagnostic sur l'altération des monuments historiques en pierre



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères

Objectifs : Contribuer à la compréhension des mécanismes de dégradation des pierres sollicitées

Faciliter le diagnostic sur l'altération des monuments historiques en pierre



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères

Objectifs : Contribuer à la compréhension des mécanismes de dégradation des pierres sollicitées

Faciliter le diagnostic sur l'altération des monuments historiques en pierre



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères

Objectifs : Contribuer à la compréhension des mécanismes de dégradation des pierres sollicitées

Faciliter le diagnostic sur l'altération des monuments historiques en pierre

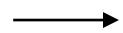


Comportement à haute température (75 %)



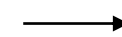
Comportement vis-à-vis du gel-dégel (25 %)

Nouvelle thématique abordée :

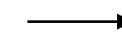


Étude expérimentale complétée
par un travail numérique

Poursuite des travaux de thèse de [Walbert, 2015] :



influence du degré de saturation S_R



passage échelle matériau à structurelle



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

Contexte : Préservation et conservation durable du patrimoine bâti en pierre

Problématique : Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères

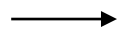
Objectifs : Contribuer à la compréhension des mécanismes de dégradation des pierres sollicitées

Faciliter le diagnostic sur l'altération des monuments historiques en pierre



Comportement à haute température (75 %)

Nouvelle thématique abordée :



Étude expérimentale complétée
par un travail numérique



Comportement vis-à-vis du gel-dégel (25 %)

Poursuite des travaux de thèse de [Walbert, 2015] :

- influence du degré de saturation S_R
- passage échelle matériau à structurelle



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Comportement à haute température des pierres de construction



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

🔥 Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

L'incendie : risque majeur de dégradation des monuments historiques



- Plan humain :

victimes, blessés, décès



- Plan économique :

travaux de restauration/reconstruction



- Plan culturel :

pertes de bien patrimoniaux



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

🔥 Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

L'incendie : risque majeur de dégradation des monuments historiques



- Plan humain :
victimes, blessés, décès



- Plan économique :
travaux de restauration/reconstruction



- Plan culturel :
pertes de bien patrimoniaux



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

🔥 Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

L'incendie : risque majeur de dégradation des monuments historiques



- Plan humain :

victimes, blessés, décès



- Plan économique :

travaux de restauration/reconstruction



- Plan culturel :

pertes de bien patrimoniaux



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

🔥 Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

L'incendie : risque majeur de dégradation des monuments historiques



- Plan humain :
victimes, blessés, décès



- Plan économique :
travaux de restauration/reconstruction



- Plan culturel :
pertes de bien patrimoniaux



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Comportement à haute température des pierres de construction



L'incendie : risque majeur de dégradation des monuments historiques



- 7 monuments historiques / an



- 12 monuments historiques / an



- 70 monuments historiques depuis 2010



- 30 monuments historiques / an

*[COST Action C17 Built Heritage :
Fire loss to historic buildings]*

ouest france
L'incendie, bête noire des monuments historiques
Modifié le 03/10/2013 à 03:25

LE MONITEUR
Un incendie ravage un ensemble de monuments historiques classés en Bretagne
Defawe Philippe | le 03/03/2006

La Tribune de l'Art
Encore un incendie pendant travaux sur un monument historique !
Didier Rykner — lundi 29 juillet 2013

C NEWS
EN IMAGES : CES MONUMENTS FRANÇAIS PARTIS EN FLAMME
Par CNEWS - Mis à jour le 31/10/2014 à 19:05
Publié le 31/10/2014 à 18:50

3 grand est
Vitry-la-ville : Un incendie ravage le château de la commune
Publié le 12/03/2019 à 19:36 Mis à jour le 13/03/2019 à 15:32

Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

🔥 Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

□
1994 : Parlement de Bretagne

→ 10 ans de travaux : 53 M€

2003 : Château de Lunéville

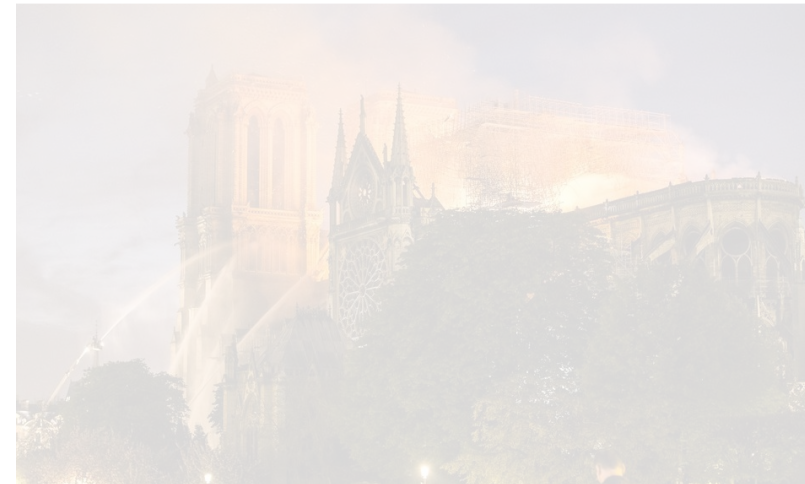
→ 20 ans de travaux : 100 M€

2013 : Hôtel de Ville, La Rochelle

→ 6 ans de travaux : 21 M€

2019 : Notre-Dame de Paris

...



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

🔥 Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

1994 : Parlement de Bretagne

→ 10 ans de travaux : 53 M€

2003 : Château de Lunéville

→ 20 ans de travaux : 100 M€

2013 : Hôtel de Ville, La Rochelle

→ 6 ans de travaux : 21 M€

2019 : Notre-Dame de Paris

...



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

🔥 Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

1994 : Parlement de Bretagne

→ 10 ans de travaux : 53 M€

2003 : Château de Lunéville

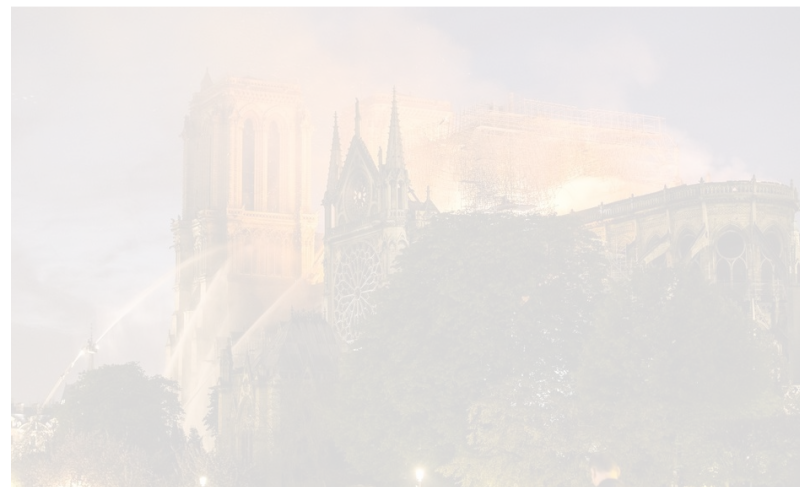
→ 20 ans de travaux : 100 M€

2013 : Hôtel de Ville, La Rochelle

→ 6 ans de travaux : 21 M€

2019 : Notre-Dame de Paris

...



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral

🔥 Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

1994 : Parlement de Bretagne

→ 10 ans de travaux : 53 M€

2003 : Château de Lunéville

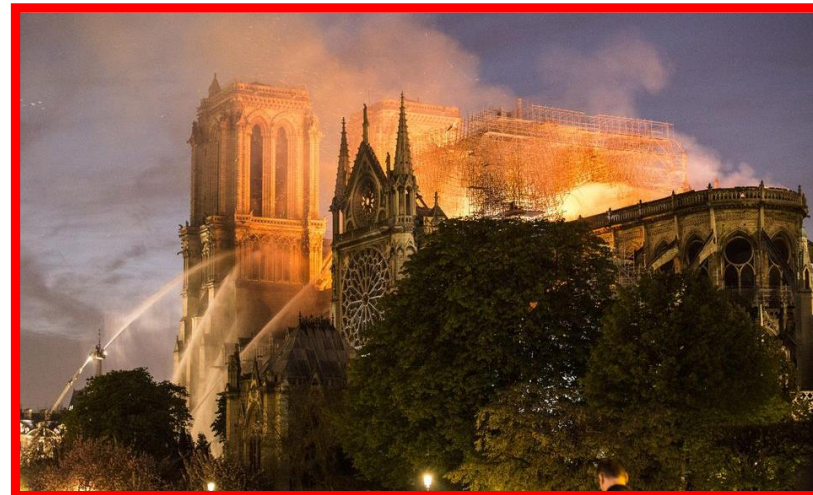
→ 20 ans de travaux : 100 M€

2013 : Hôtel de Ville, La Rochelle

→ 6 ans de travaux : 21 M€

2019 : Notre-Dame de Paris

...



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Comportement à haute température des pierres de construction



Objectifs fixés de la thèse :



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Comportement à haute température des pierres de construction



Objectifs fixés de la thèse :

- Identifier les mécanismes élémentaires affectant la stabilité thermique des pierres (jusqu'à 1050 °C) ;
- Dégager les paramètres intrinsèques gouvernant la sensibilité à haute température ;
- Évaluer les effets de hautes températures sur l'évolution des propriétés résiduelles des pierres ;
- Contribuer au diagnostic post-incendie et à la durabilité de l'ouvrage ;
- Amener des résultats qui contribueront à l'amélioration des dispositions préventives et des textes réglementaires



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Comportement à haute température des pierres de construction



Objectifs fixés de la thèse :

- Identifier les mécanismes élémentaires affectant la stabilité thermique des pierres (jusqu'à 1050 °C) ;
- Dégager les paramètres intrinsèques gouvernant la sensibilité à haute température ;
- Évaluer les effets de hautes températures sur l'évolution des propriétés résiduelles des pierres ;
- Contribuer au diagnostic post-incendie et à la durabilité de l'ouvrage ;
- Amener des résultats qui contribueront à l'amélioration des dispositions préventives et des textes réglementaires



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Comportement à haute température des pierres de construction



Objectifs fixés de la thèse :

- Identifier les mécanismes élémentaires affectant la stabilité thermique des pierres (jusqu'à 1050 °C) ;
- Dégager les paramètres intrinsèques gouvernant la sensibilité à haute température ;
- Évaluer les effets de hautes températures sur l'évolution des propriétés résiduelles des pierres ;
- Contribuer au diagnostic post-incendie et à la durabilité de l'ouvrage ;
- Amener des résultats qui contribueront à l'amélioration des dispositions préventives et des textes réglementaires



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Comportement à haute température des pierres de construction



Objectifs fixés de la thèse :

- Identifier les mécanismes élémentaires affectant la stabilité thermique des pierres (jusqu'à 1050 °C) ;
- Dégager les paramètres intrinsèques gouvernant la sensibilité à haute température ;
- Évaluer les effets de hautes températures sur l'évolution des propriétés résiduelles des pierres ;
- Contribuer au diagnostic post-incendie et à la durabilité de l'ouvrage ;
- Amener des résultats qui contribueront à l'amélioration des dispositions préventives et des textes réglementaires



Contexte, problématique et objectifs du projet doctoral



Comportement à haute température des pierres de construction

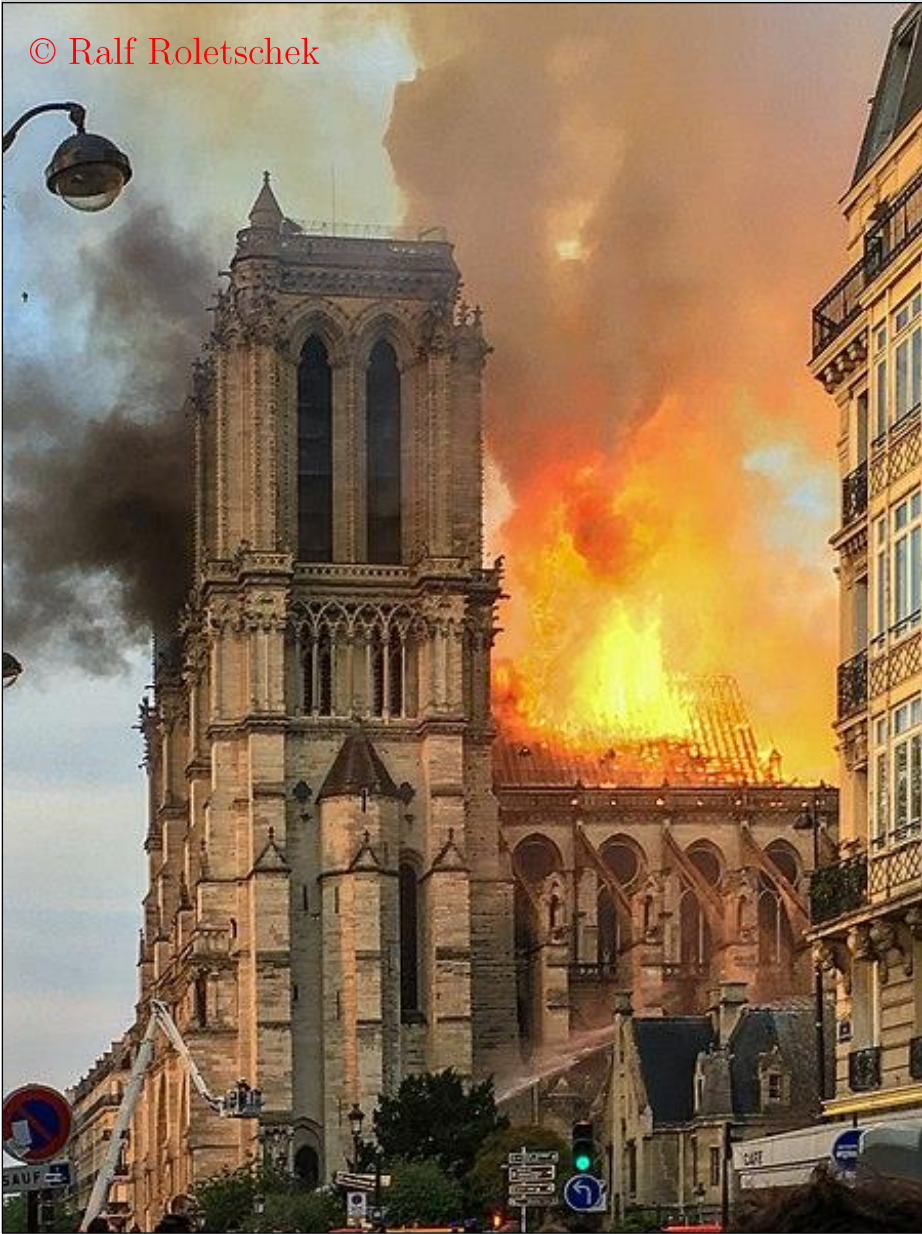


Objectifs fixés de la thèse :

- Identifier les mécanismes élémentaires affectant la stabilité thermique des pierres (jusqu'à 1050 °C) ;
- Dégager les paramètres intrinsèques gouvernant la sensibilité à haute température ;
- Évaluer les effets de hautes températures sur l'évolution des propriétés résiduelles des pierres ;
- Contribuer au diagnostic post-incendie et à la durabilité de l'ouvrage ;
- Amener des résultats qui contribueront à l'amélioration des dispositions préventives et des textes réglementaires



© Ralf Roletschek



Structure et organisation de la soutenance :

1. Introduction
2. Présentation des matériaux de l'étude
3. Méthodes & Protocoles
4. Résultats expérimentaux
5. Conclusion
6. Perspectives

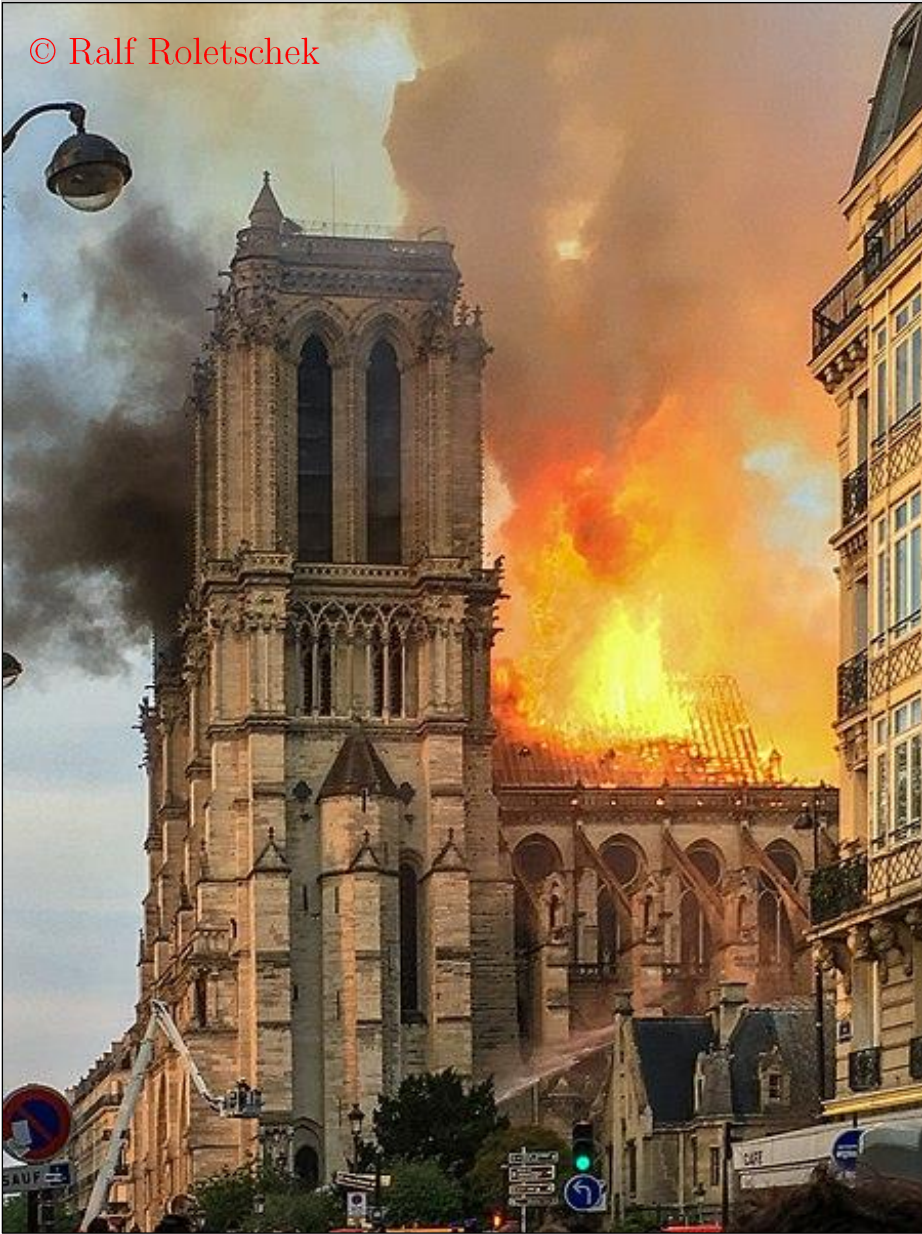
© Ralf Roletschek



Structure et organisation de la soutenance :

1. Introduction
2. Présentation des matériaux de l'étude
3. Méthodes & Protocoles
4. Résultats expérimentaux
5. Conclusion
6. Perspectives

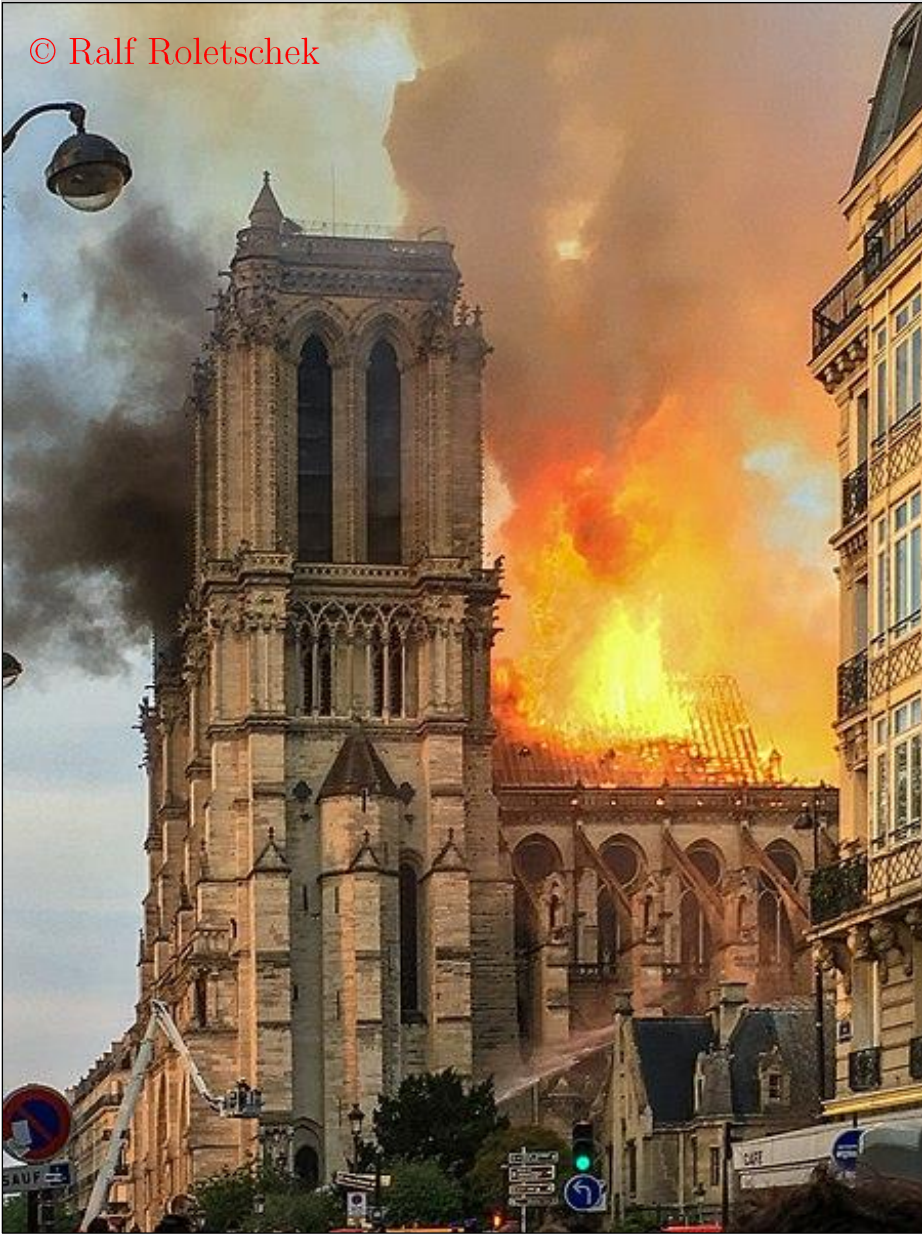
© Ralf Roletschek



Structure et organisation de la soutenance :

1. Introduction
2. Présentation des matériaux de l'étude
3. Méthodes & Protocoles
4. Résultats expérimentaux
5. Conclusion
6. Perspectives

© Ralf Roletschek



Structure et organisation de la soutenance :

1. Introduction
2. Présentation des matériaux de l'étude
3. Méthodes & Protocoles
4. Résultats expérimentaux
5. Conclusion
6. Perspectives

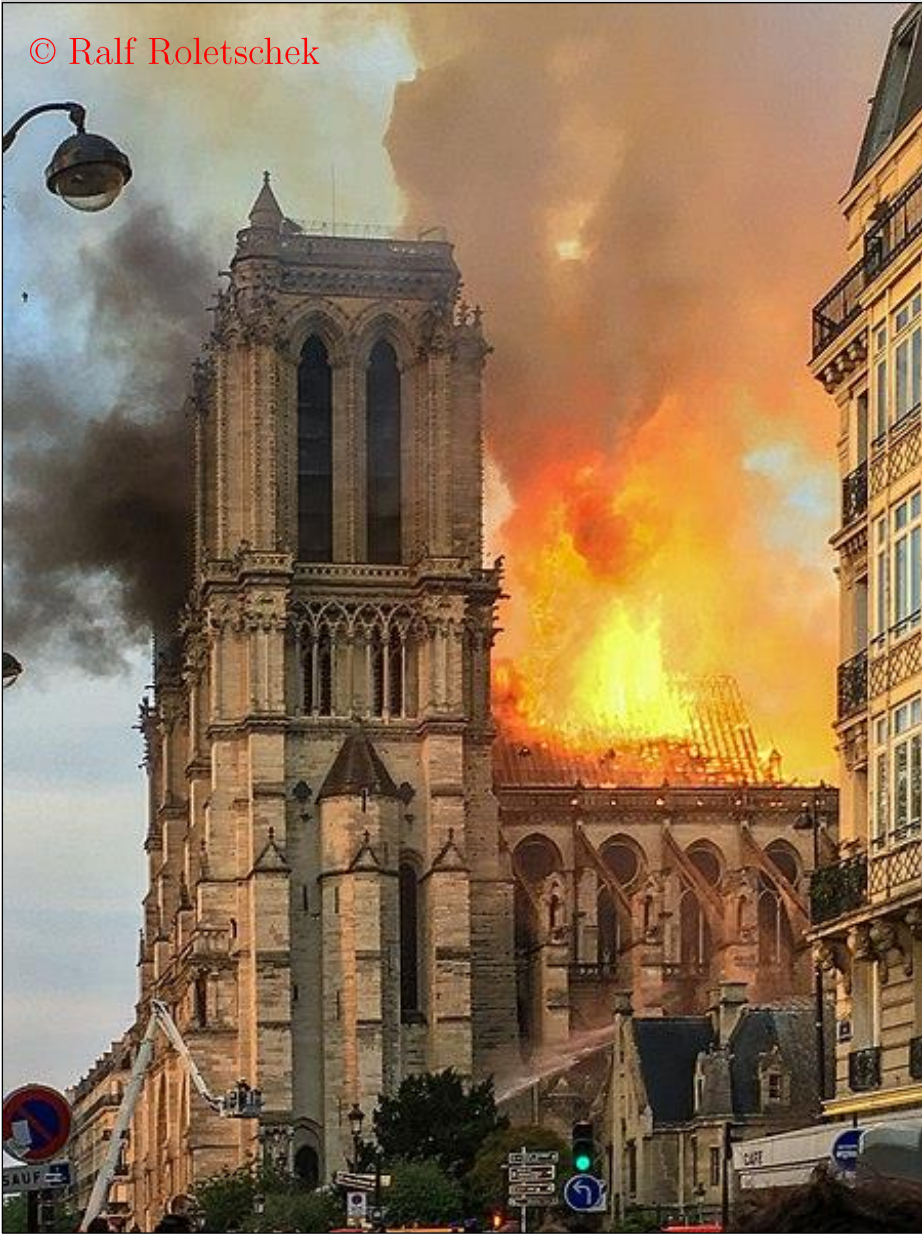
© Ralf Roletschek



Structure et organisation de la soutenance :

1. Introduction
2. Présentation des matériaux de l'étude
3. Méthodes & Protocoles
4. Résultats expérimentaux
5. Conclusion
6. Perspectives

© Ralf Roletschek



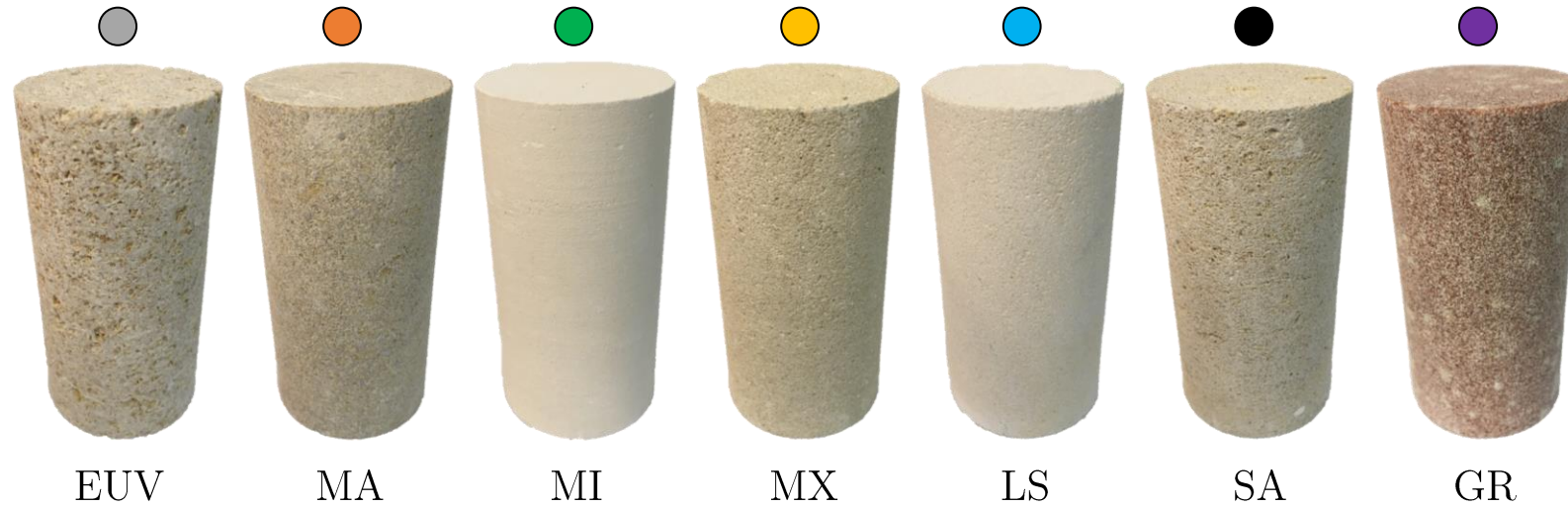
Structure et organisation de la soutenance :

1. Introduction
2. Présentation des matériaux de l'étude
3. Méthodes & Protocoles
4. Résultats expérimentaux
5. Conclusion
6. Perspectives

Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques



Nature des 7 pierres :

6 calcaires

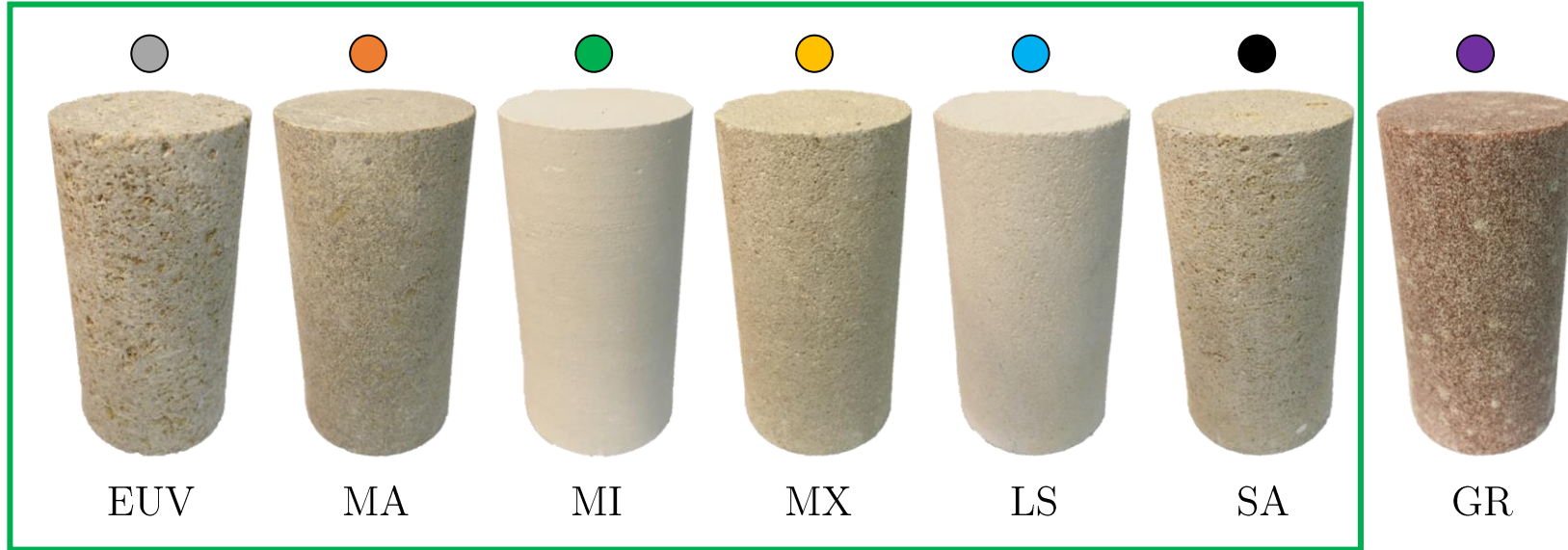
+

1 grès

- Largement utilisées dans les monuments historiques mais aussi en restauration ;
- Issues de carrières françaises en activité ;
- Représentent une grande diversité en termes de paramètres intrinsèques : propriétés mécanique, physique, microstructurale, minéralogique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques



Nature des 7 pierres :

6 calcaires

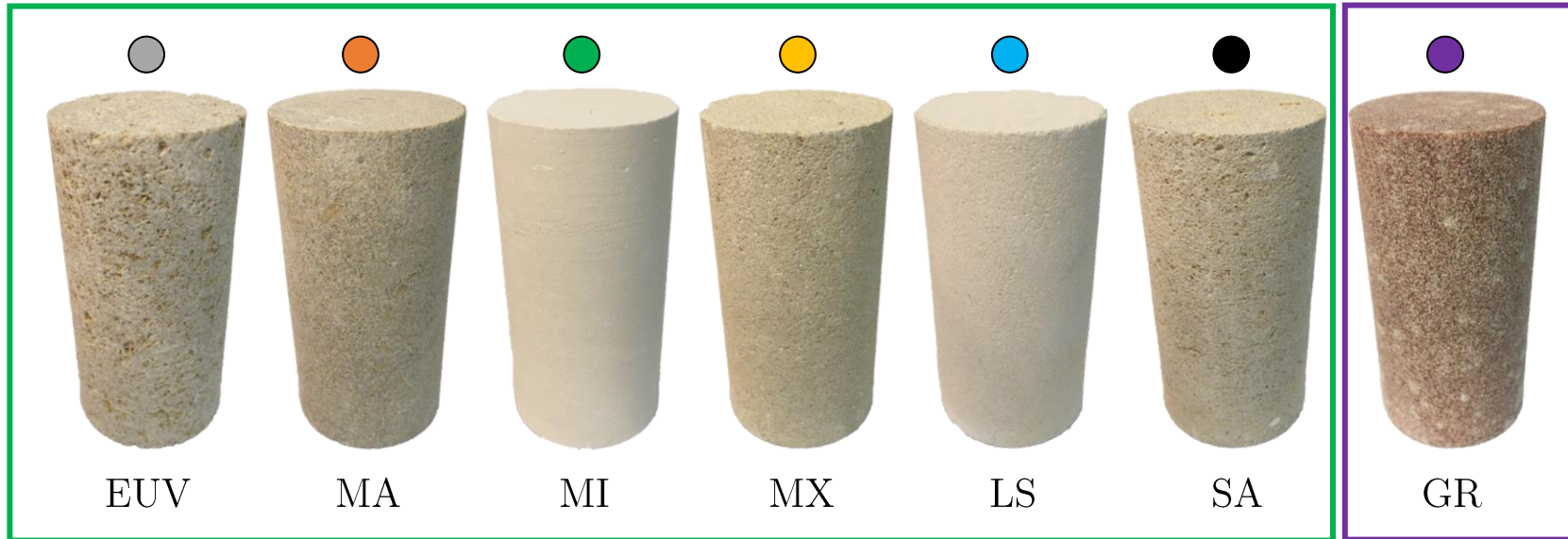
+

1 grès

- Largement utilisées dans les monuments historiques mais aussi en restauration ;
- Issues de carrières françaises en activité ;
- Représentent une grande diversité en termes de paramètres intrinsèques : propriétés mécanique, physique, microstructurale, minéralogique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques



Nature des 7 pierres :

6 calcaires

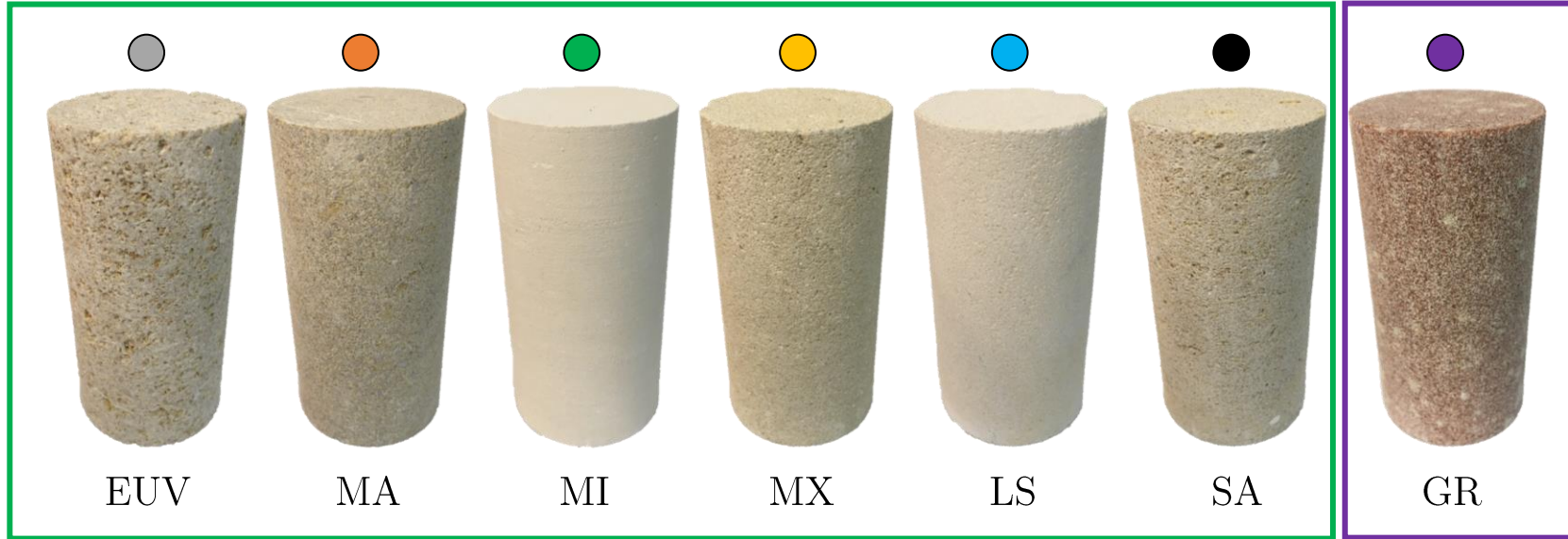
+

1 grès

- Largement utilisées dans les monuments historiques mais aussi en restauration ;
- Issues de carrières françaises en activité ;
- Représentent une grande diversité en termes de paramètres intrinsèques : propriétés mécanique, physique, microstructurale, minéralogique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques



Nature des 7 pierres :

6 calcaires

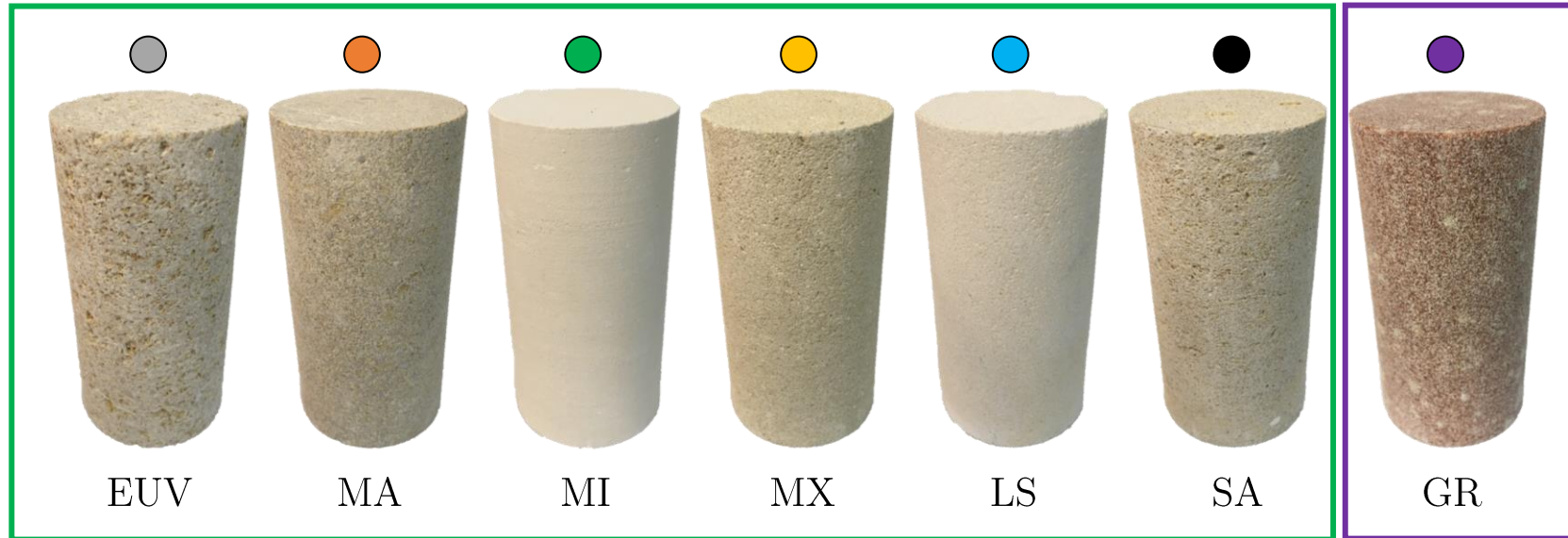
+

1 grès

- Largement utilisées dans les monuments historiques mais aussi en restauration ;
- Issues de carrières françaises en activité ;
- Représentent une grande diversité en termes de paramètres intrinsèques : propriétés mécanique, physique, microstructurale, minéralogique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques



Nature des 7 pierres :

6 calcaires

+

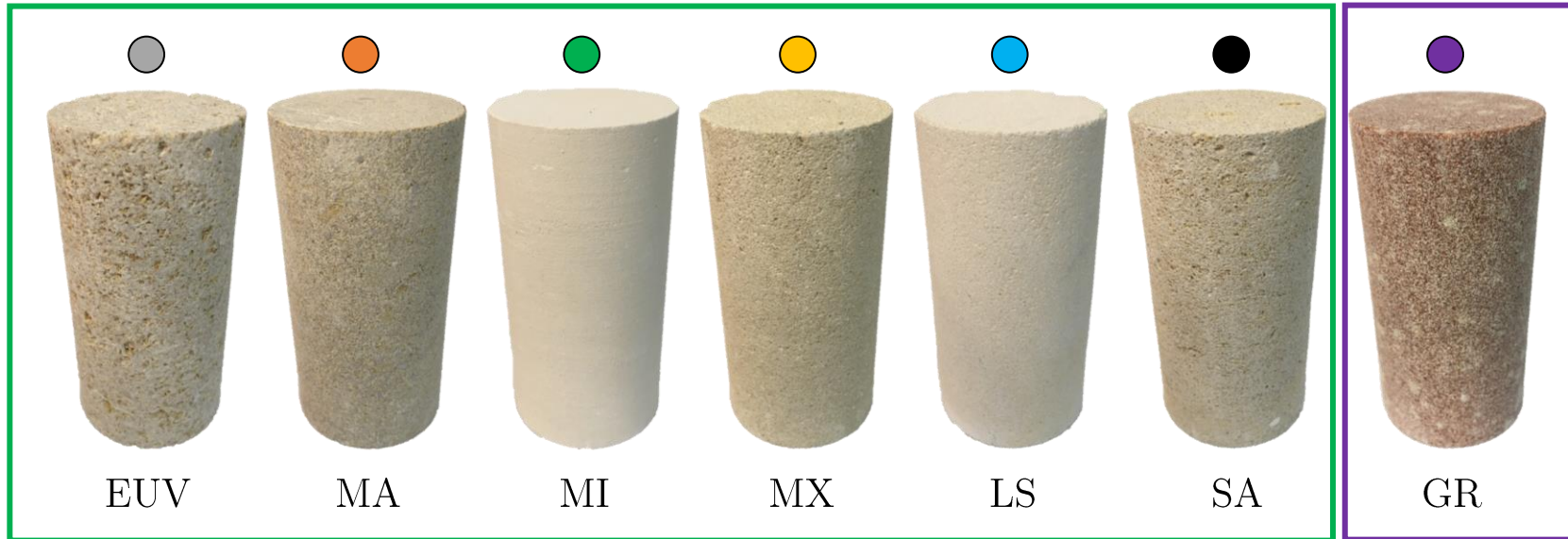
1 grès



- Largement utilisées dans les monuments historiques mais aussi en restauration ;
- Issues de carrières françaises en activité ;
- Représentent une grande diversité en termes de paramètres intrinsèques : propriétés mécanique, physique, microstructurale, minéralogique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques



Nature des 7 pierres :

6 calcaires

+

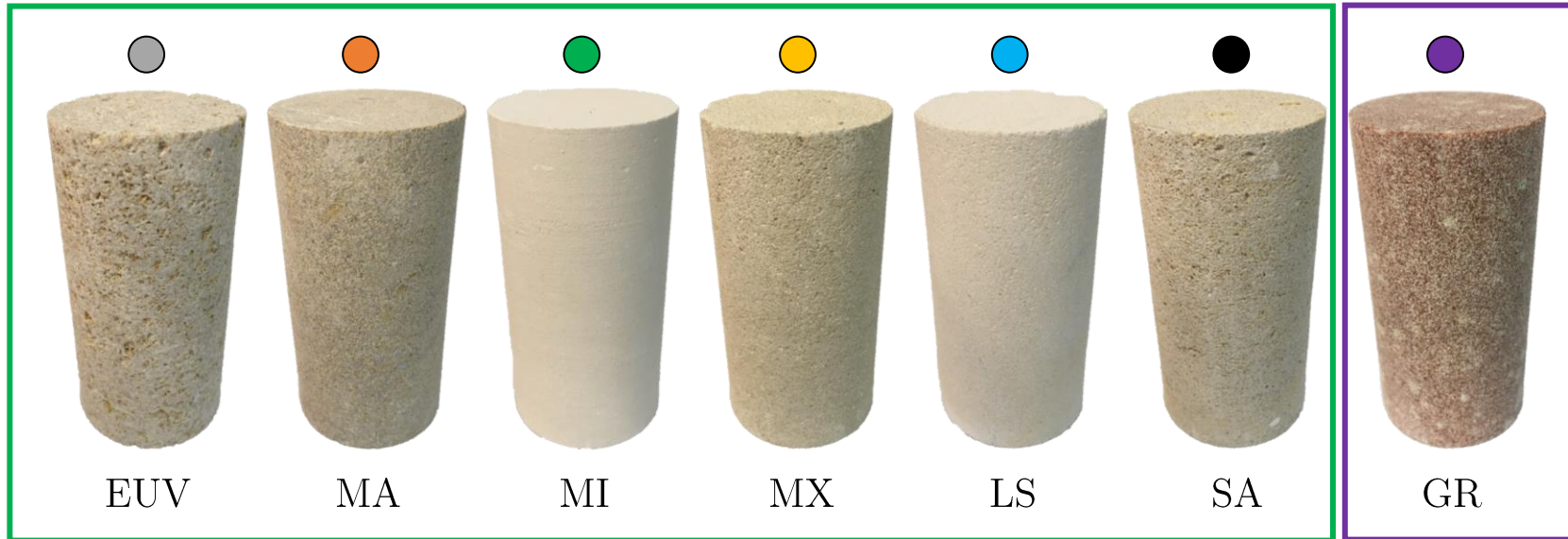
1 grès



- Largement utilisées dans les monuments historiques mais aussi en restauration ;
- Issues de carrières françaises en activité ;
- Représentent une grande diversité en termes de paramètres intrinsèques : propriétés mécanique, physique, microstructurale, minéralogique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques



Nature des 7 pierres :

6 calcaires

+

1 grès



- Largement utilisées dans les monuments historiques mais aussi en restauration ;
- Issues de carrières françaises en activité ;
- Représentent une grande diversité en termes de paramètres intrinsèques : propriétés mécanique, physique, microstructurale, minéralogique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



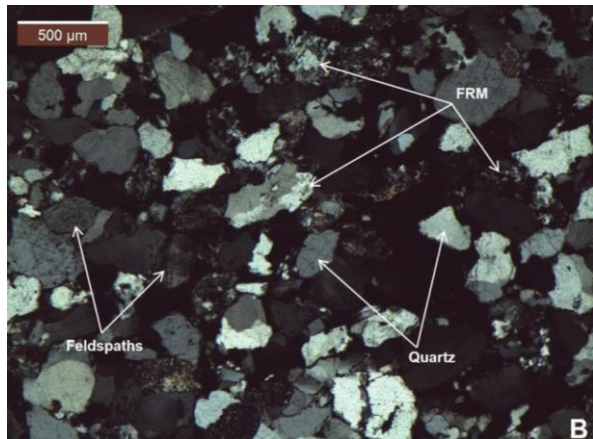
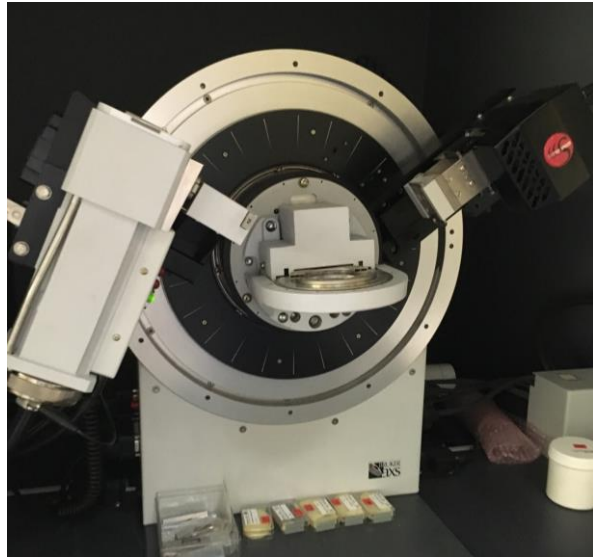
Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

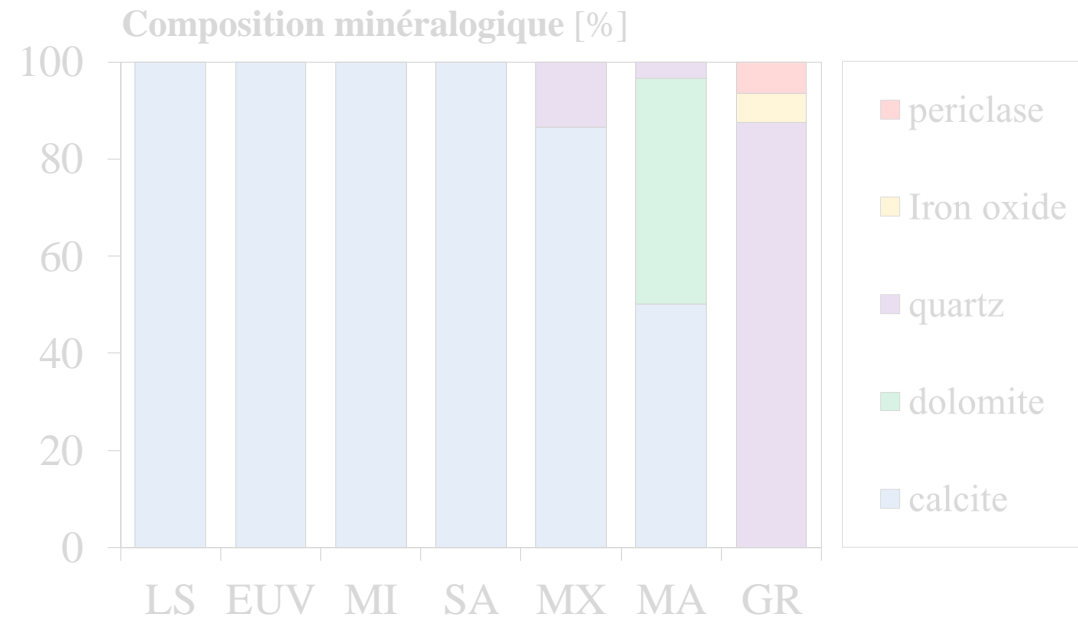
Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Identification minéralogique :

observations microscopiques sur lames minces + analyses DRX sur poudre



Analyse quantitative basée sur la méthode de [Rietveld, 1969]

■ Nature monophasiqueCalcite - (CaCO_3)■ Nature polyphasiqueCalcite - (CaCO_3)Quartz - (SiO_2)Dolomite - ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)Oxyde de fer - (Fe_2O_3)Périclase - (MgO)

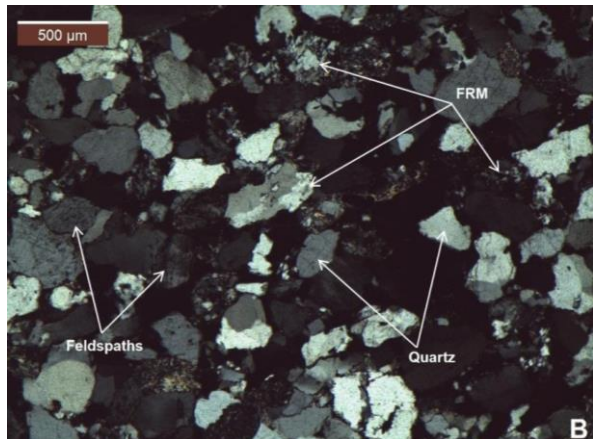
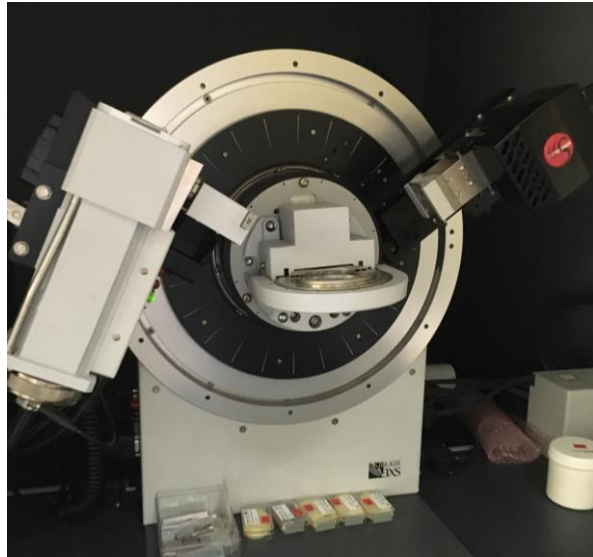
Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

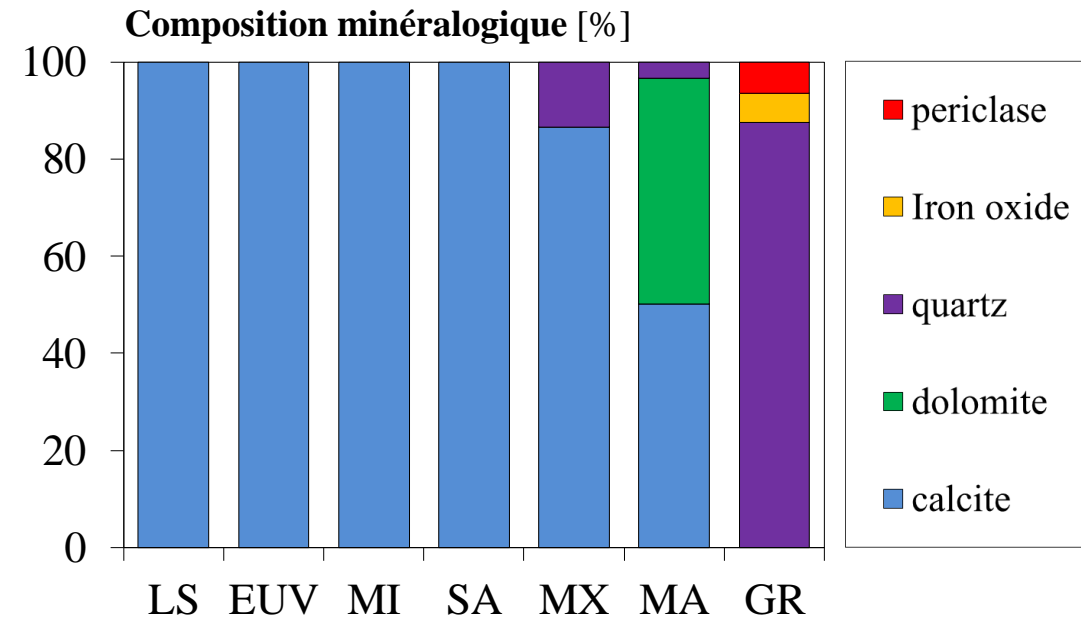
Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Identification minéralogique :

observations microscopiques sur lames minces + analyses DRX sur poudre



Analyse quantitative basée sur la méthode de [Rietveld, 1969]

■ Nature monophasique

Calcite - (CaCO_3)

■ Nature polyphasique

Calcite - (CaCO_3)

Quartz - (SiO_2)

Dolomite - ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Oxyde de fer - (Fe_2O_3)

Périclase - (MgO)



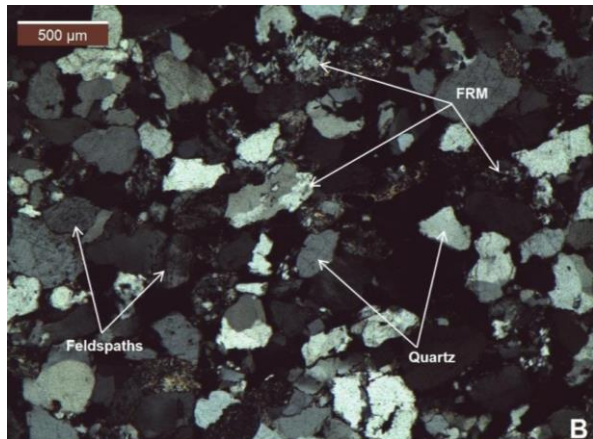
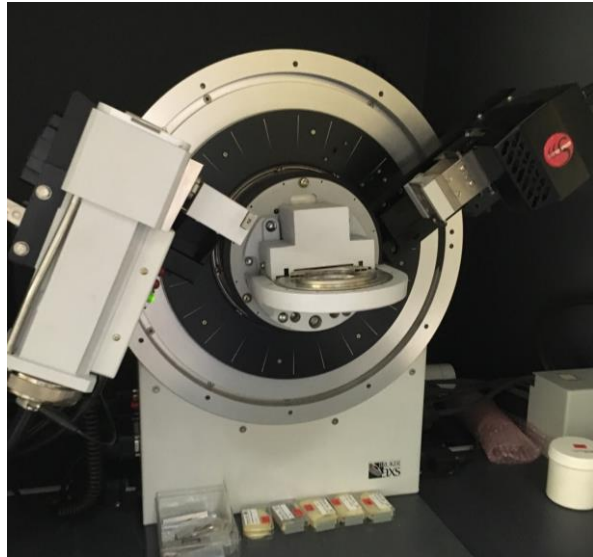
Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

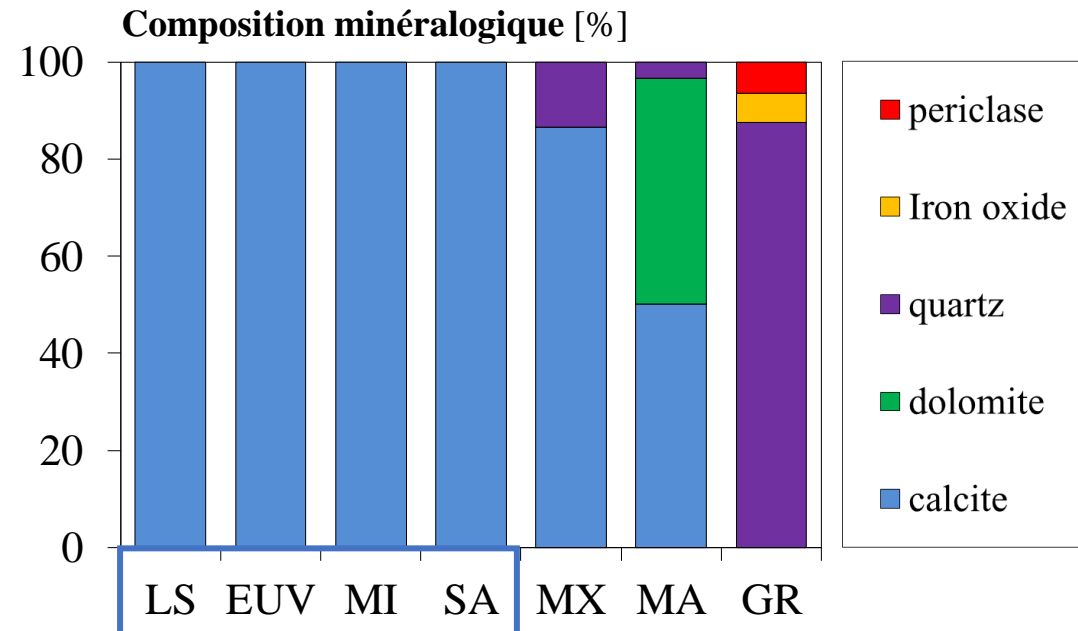
Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Identification minéralogique :

observations microscopiques sur lames minces + analyses DRX sur poudre



Analyse quantitative basée sur la méthode de [Rietveld, 1969]

■ Nature monophasique

Calcite - (CaCO_3)

■ Nature polyphasique

Calcite - (CaCO_3)

Quartz - (SiO_2)

Dolomite - ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Oxyde de fer - (Fe_2O_3)

Périclase - (MgO)



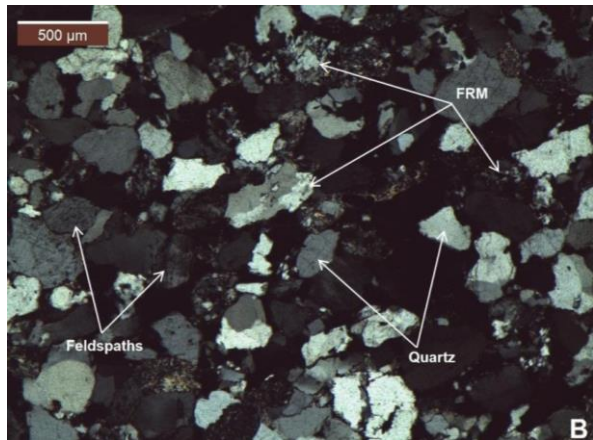
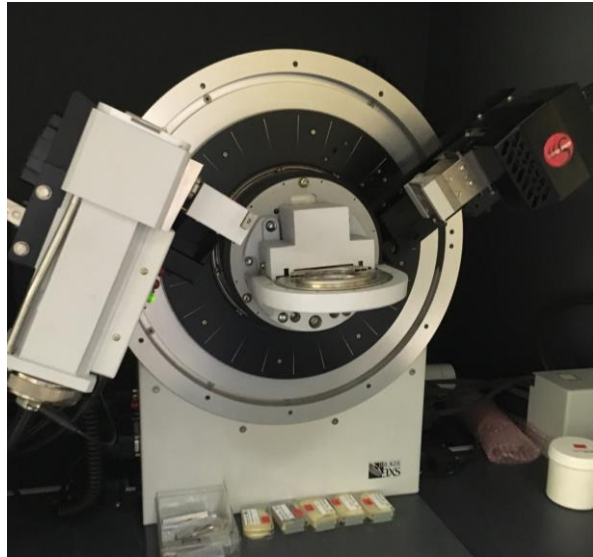
Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

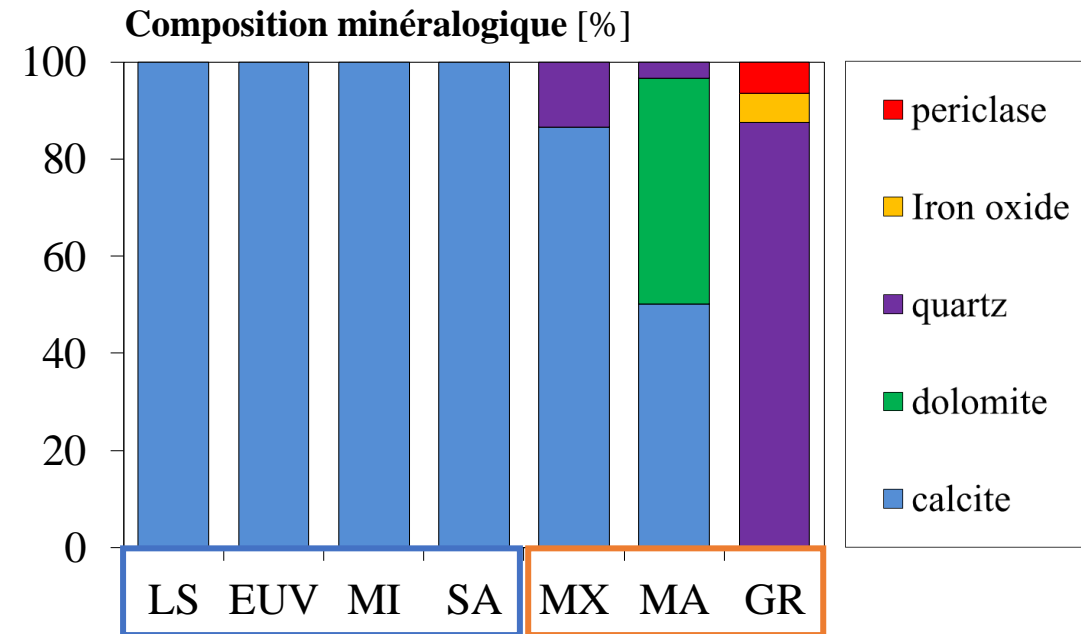
Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Identification minéralogique :

observations microscopiques sur lames minces + analyses DRX sur poudre



Analyse quantitative basée sur la méthode de [Rietveld, 1969]

■ Nature monophasique

Calcite - (CaCO_3)

■ Nature polyphasique

Calcite - (CaCO_3)

Quartz - (SiO_2)

Dolomite - ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Oxyde de fer - (Fe_2O_3)

Périclase - (MgO)



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

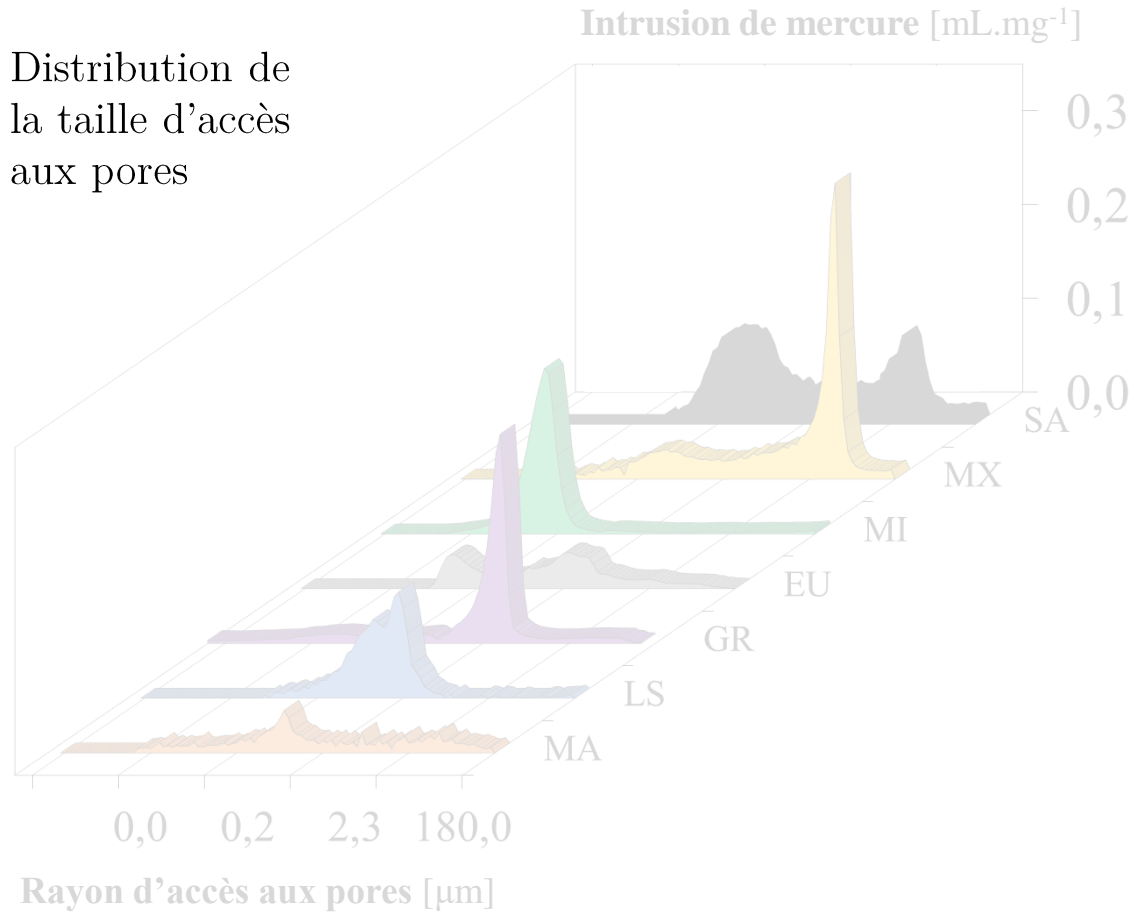
Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

Distribution de la taille d'accès aux pores

Porosimétrie au mercure sur fragment ($>1 \text{ cm}^3$)

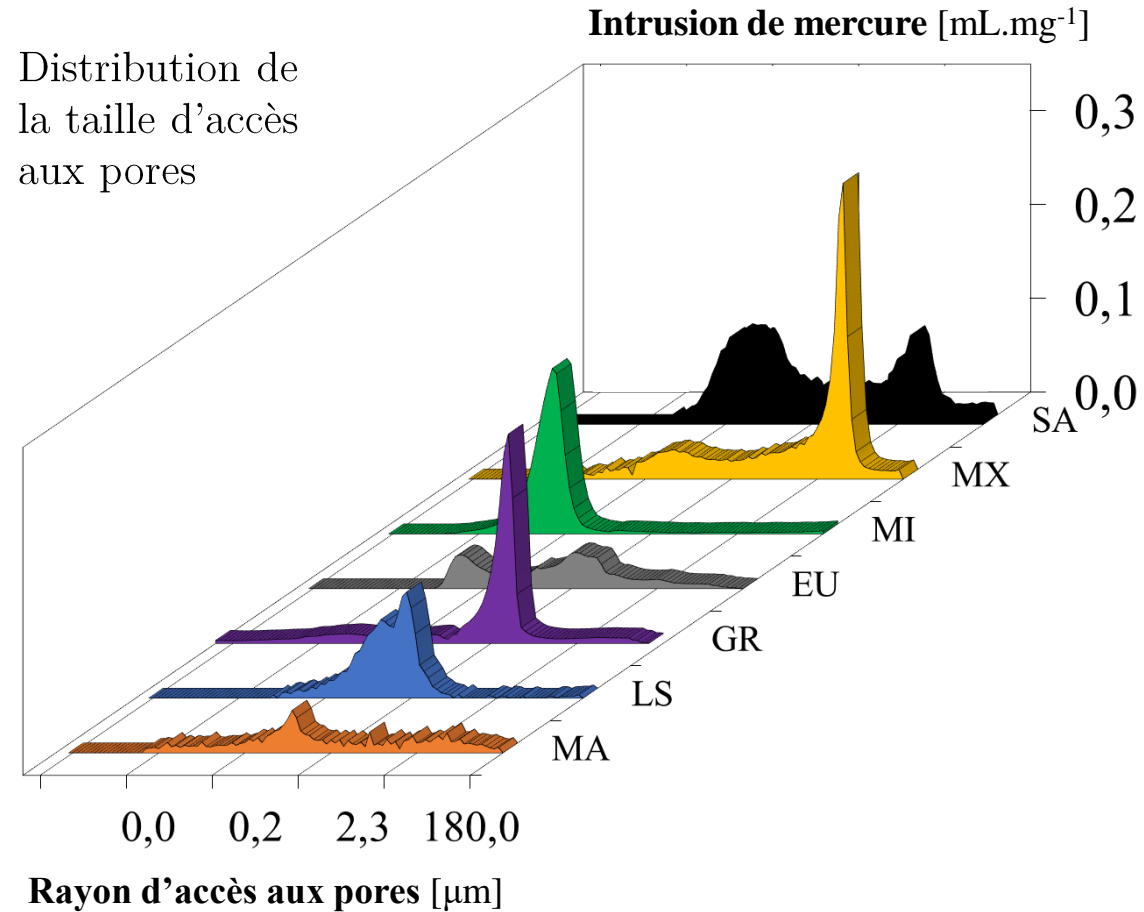
Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Porosimétrie au mercure sur fragment ($>1 \text{ cm}^3$)

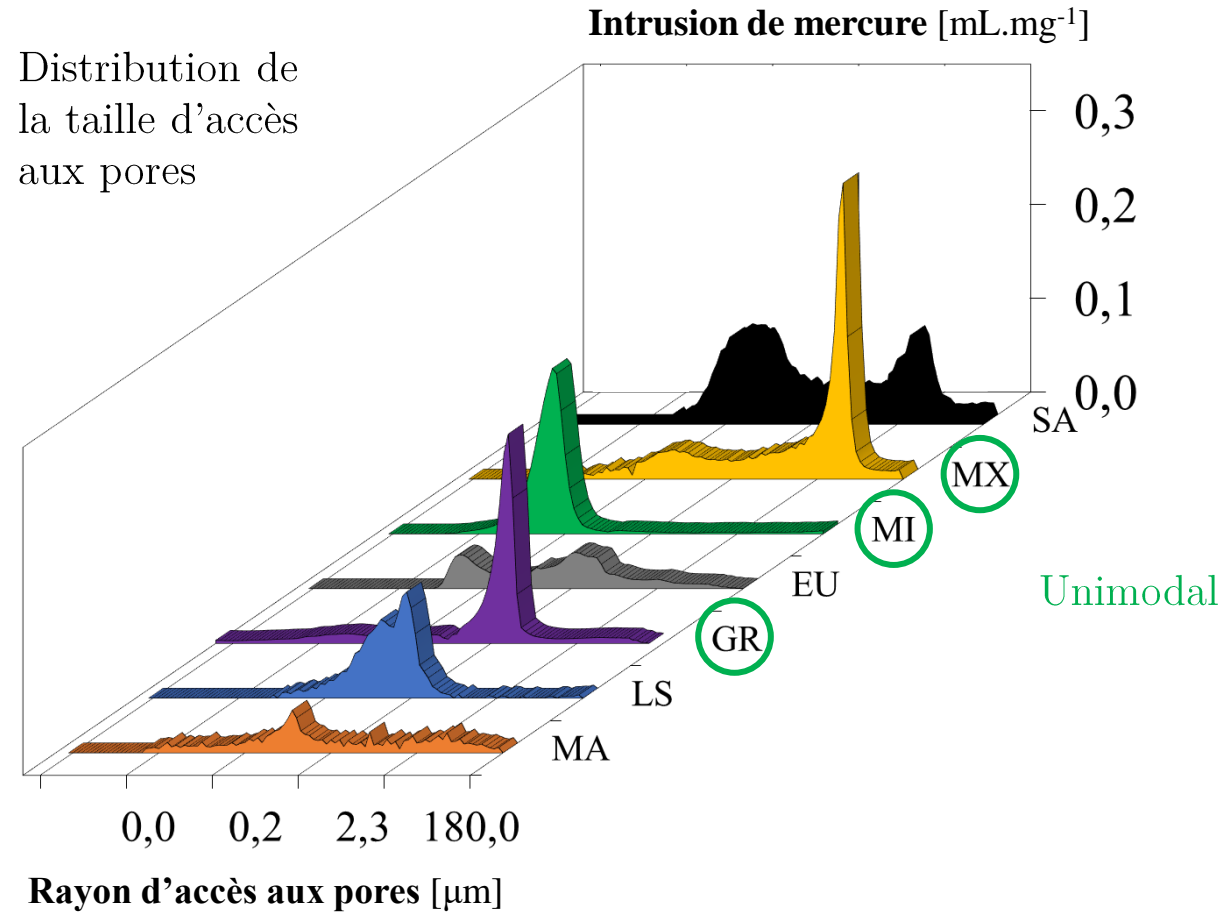
Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

Porosimétrie au mercure sur fragment ($>1 \text{ cm}^3$)

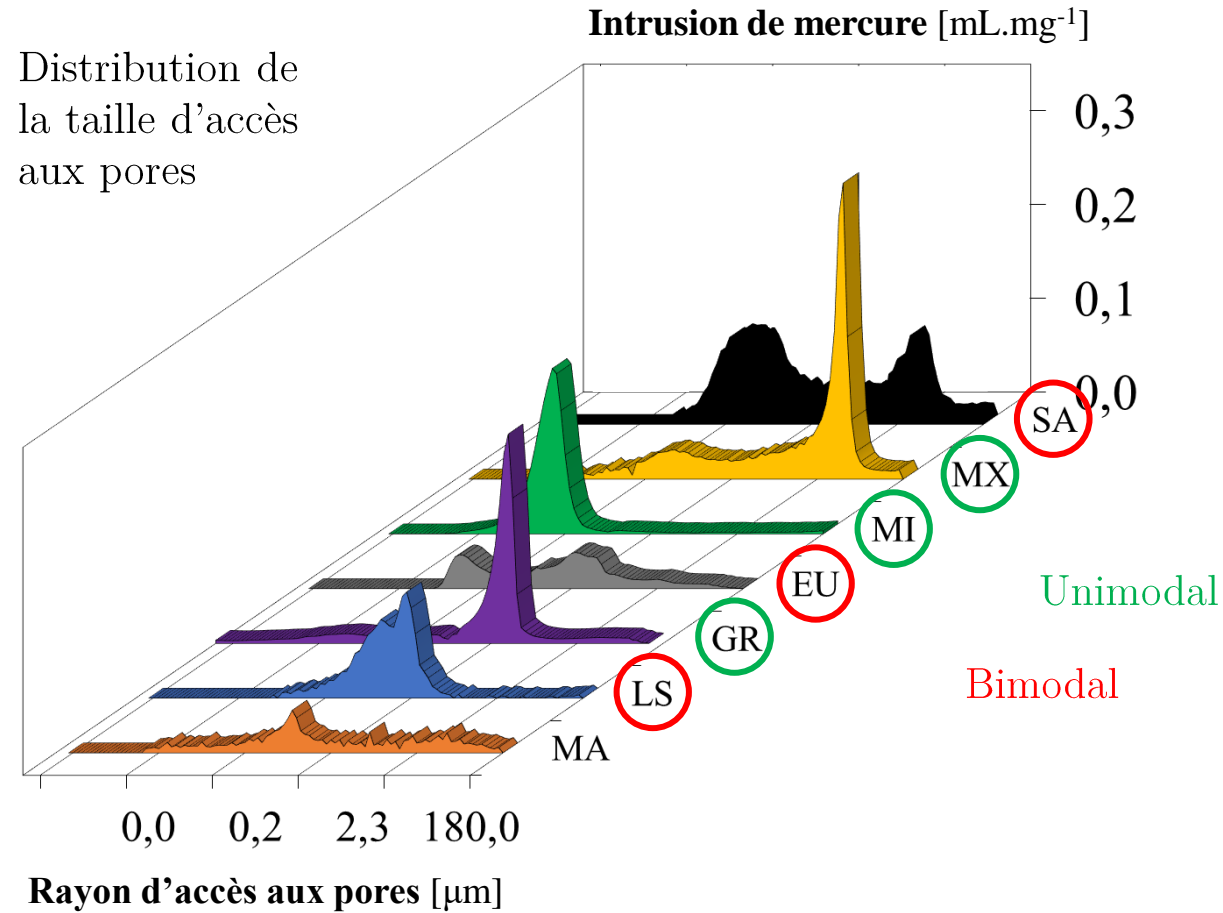
Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

Porosimétrie au mercure sur fragment ($>1 \text{ cm}^3$)

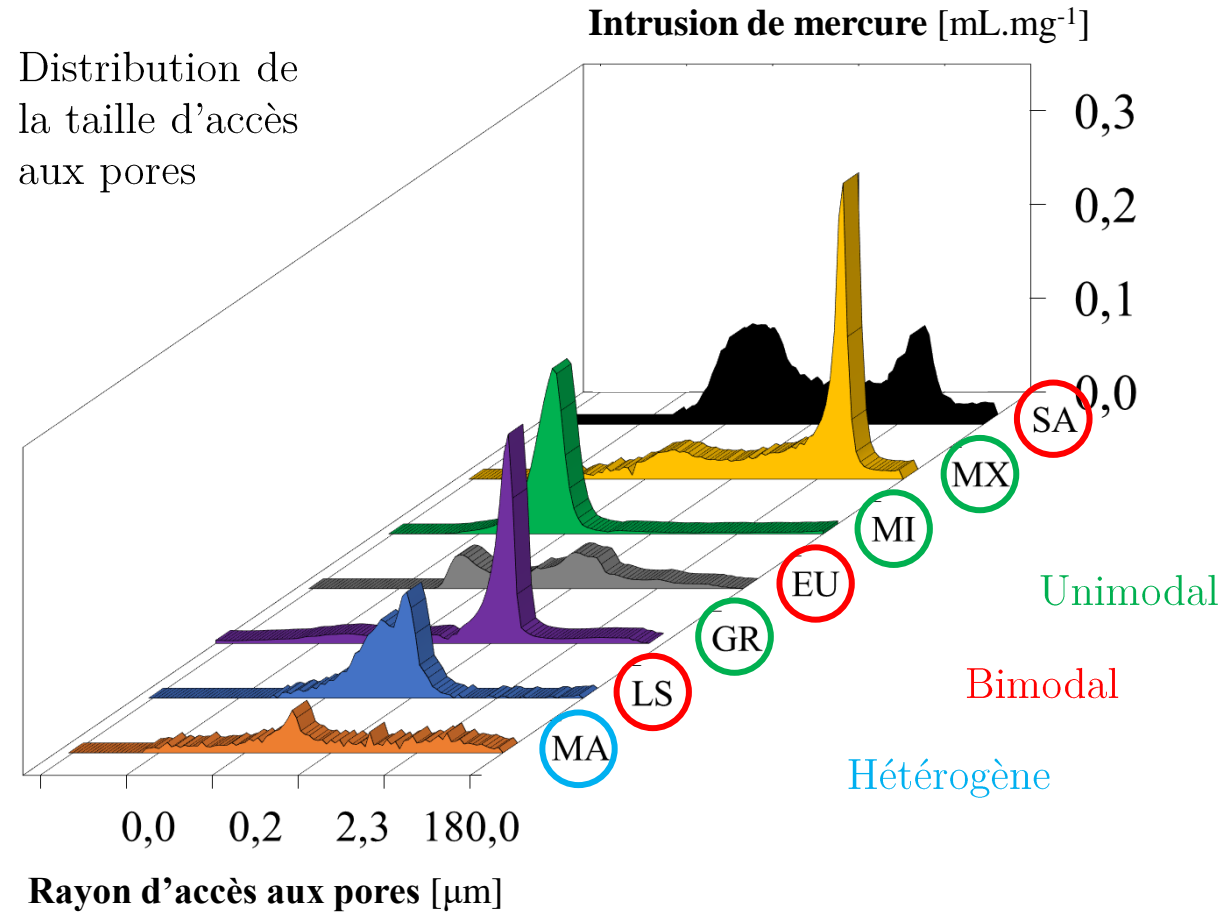
Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

Porosimétrie au mercure sur fragment ($>1 \text{ cm}^3$)

Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

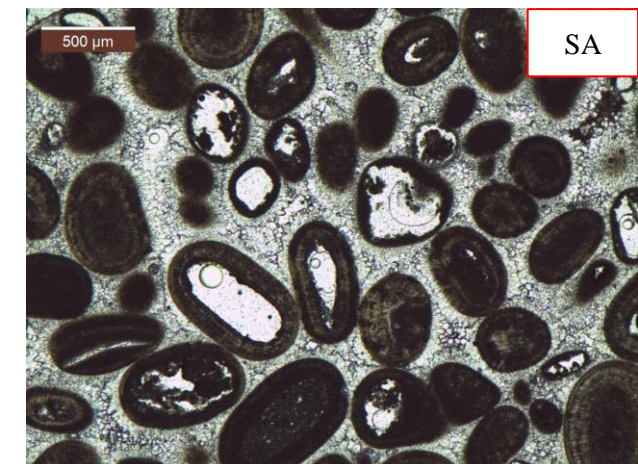
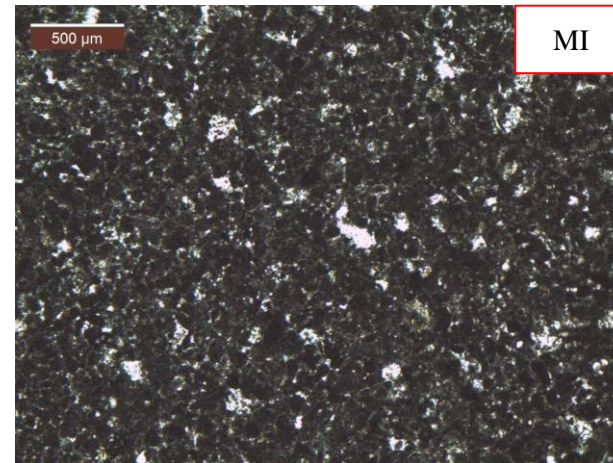
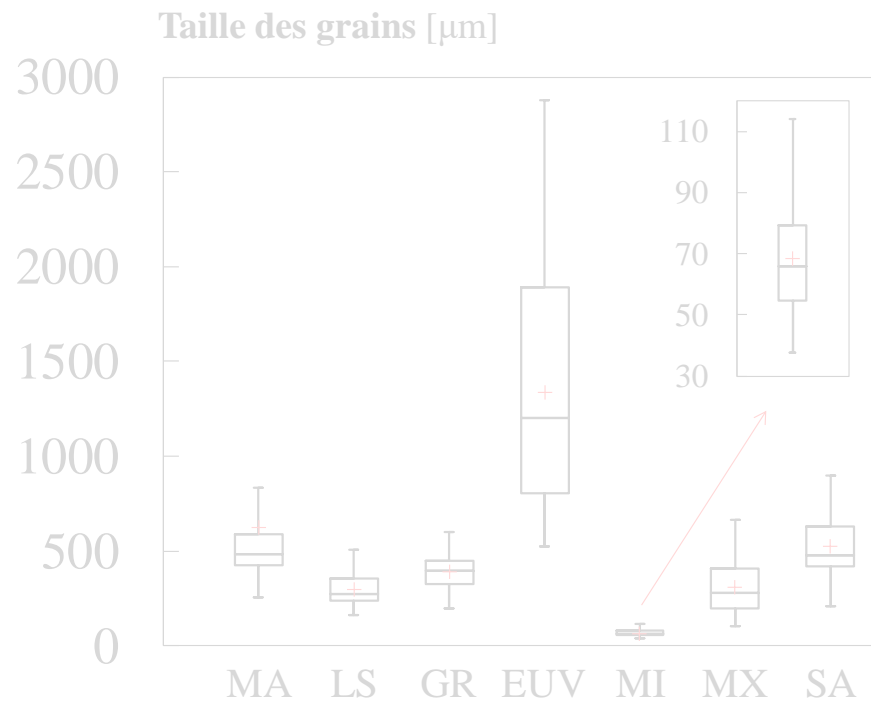
Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

Distribution de la taille des grains sur observations microscopiques



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

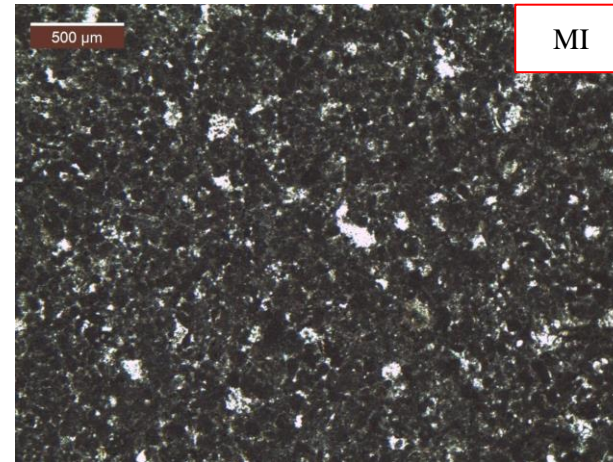
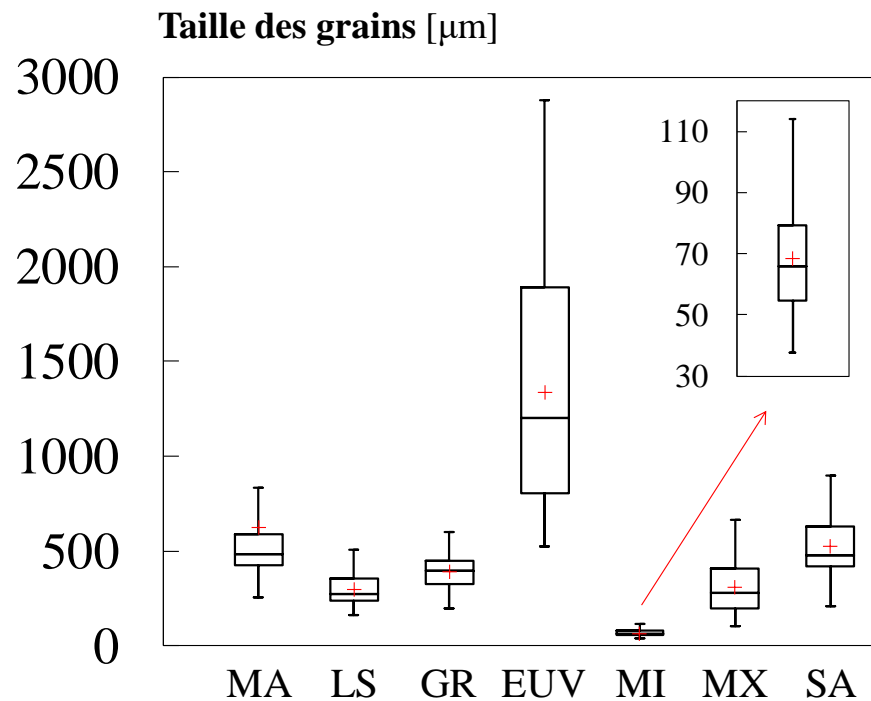
Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

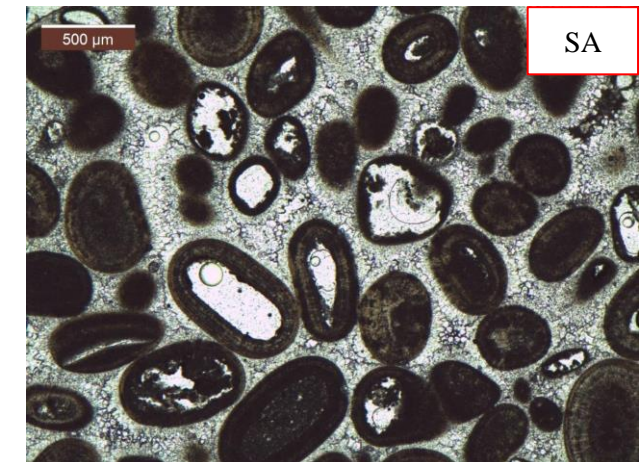
Distribution de la taille des grains sur observations microscopiques



MI



EUV



SA



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

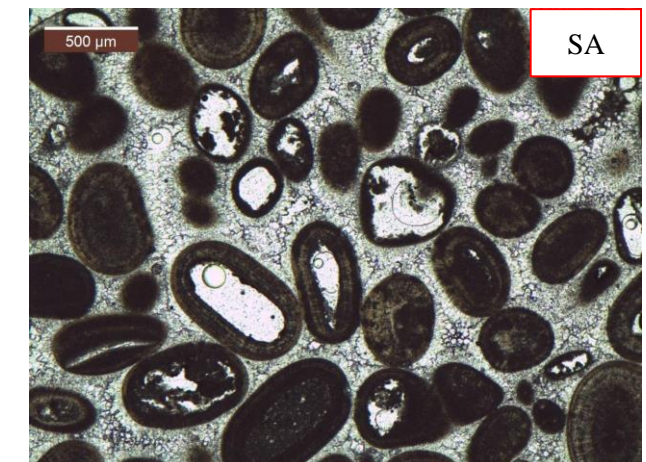
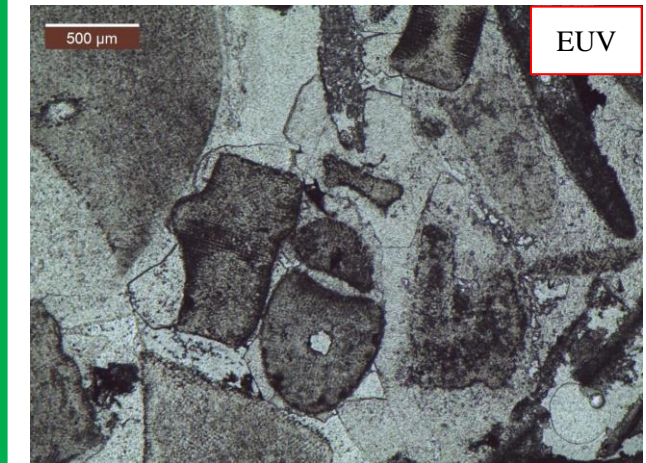
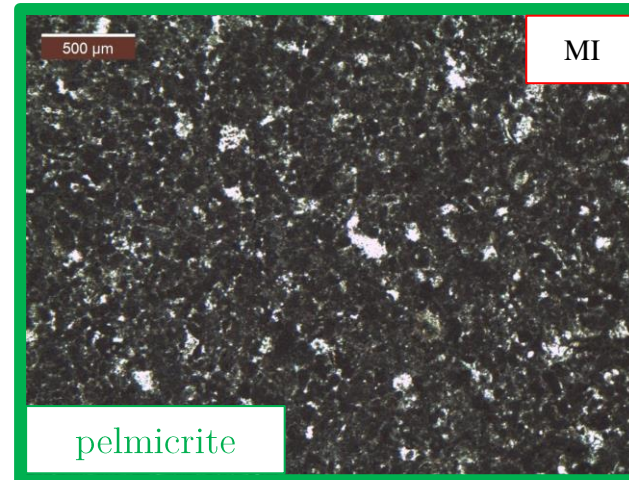
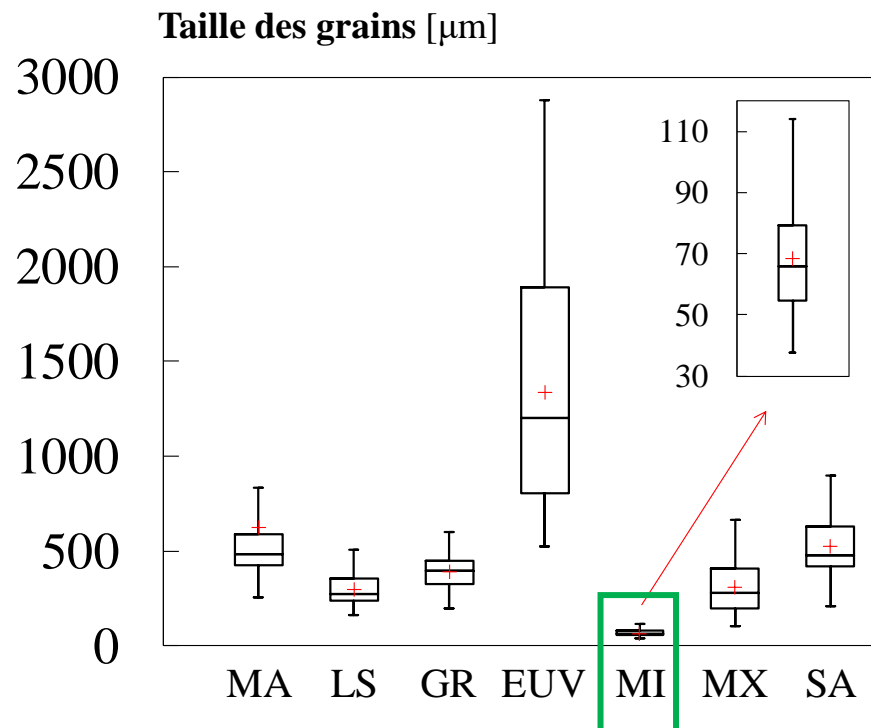
Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

Distribution de la taille des grains sur observations microscopiques



- homogène / très petit

Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

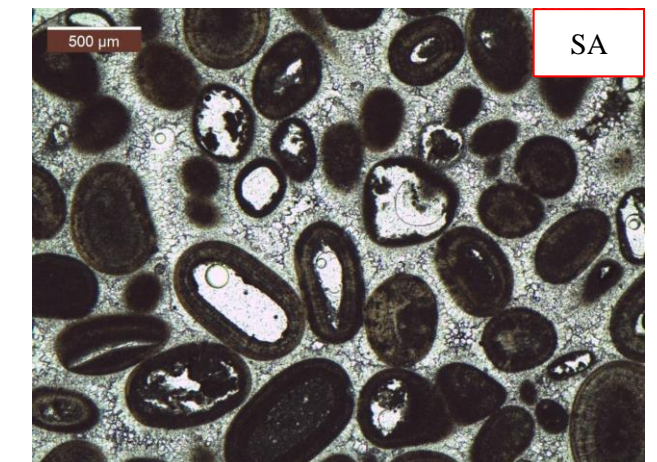
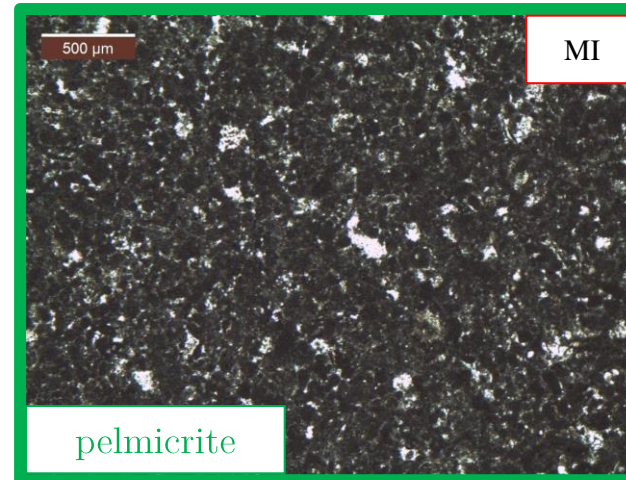
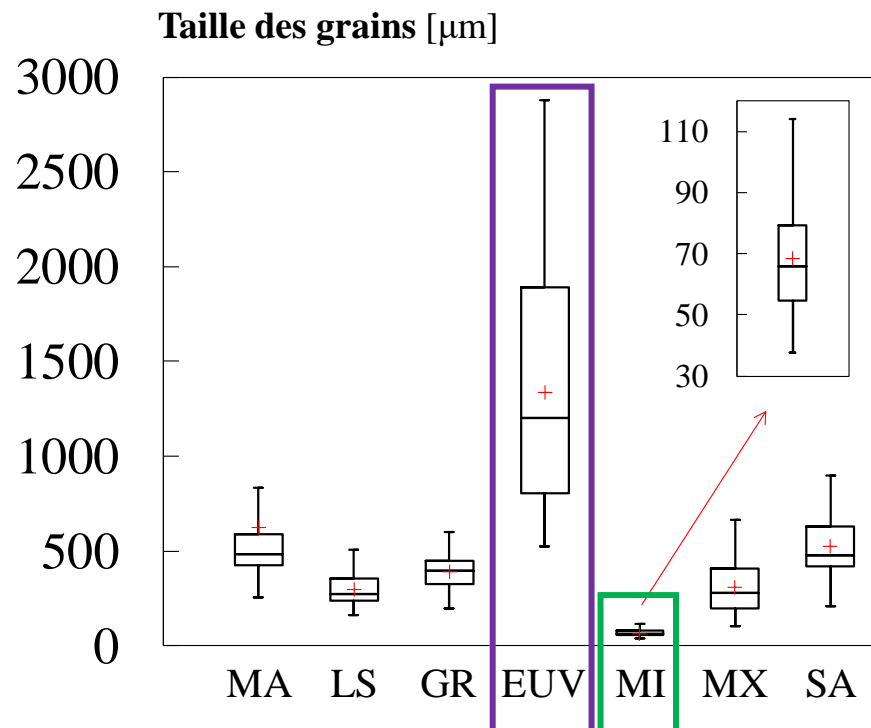
Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

Distribution de la taille des grains sur observations microscopiques



- homogène / très petit
- hétérogène / très grand

Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

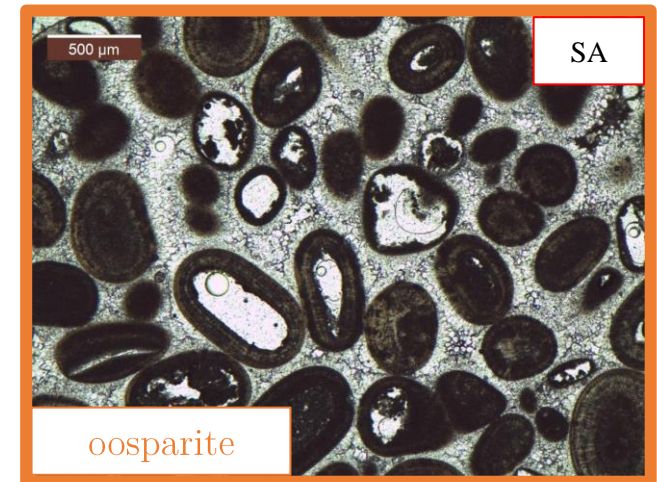
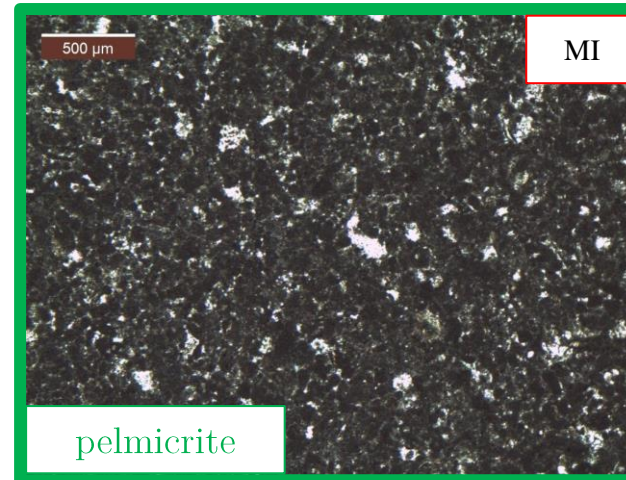
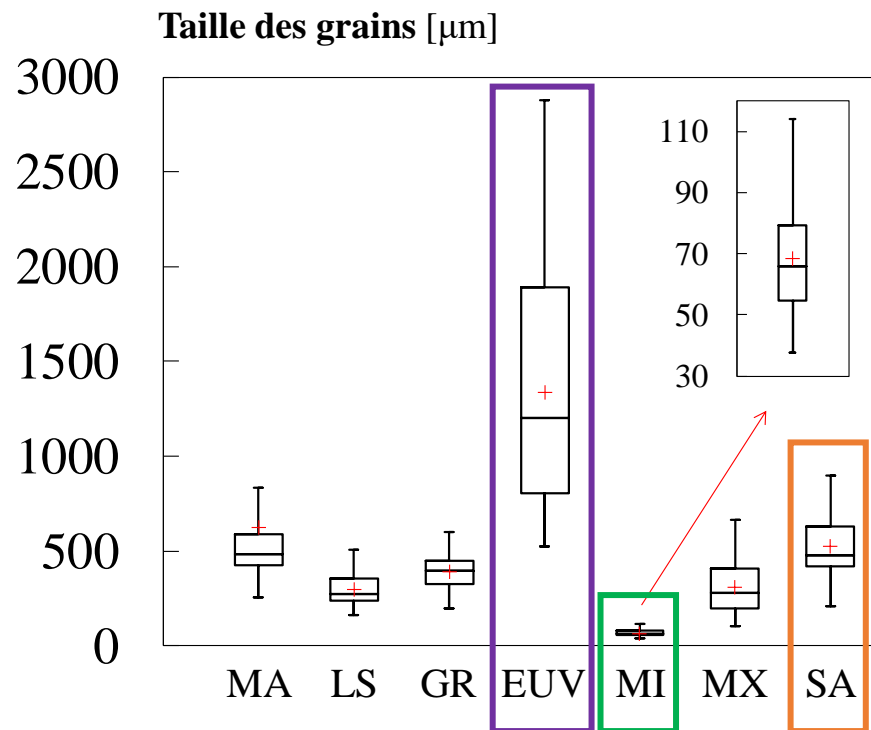
Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

Distribution de la taille des grains sur observations microscopiques



- homogène / très petit
- hétérogène / très grand
- hétérogène / moyen, grand

Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique



Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

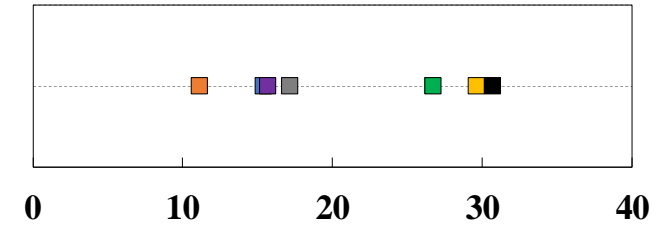
Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

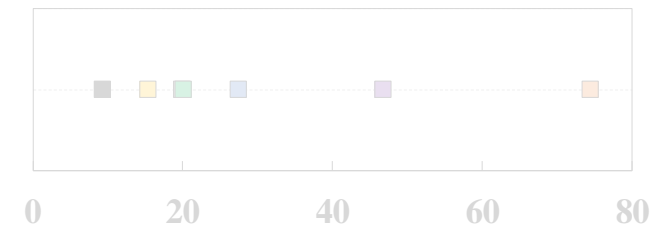
NF EN 1936
Saturation à l'eau
sous vide

Porosité totale :

 N_T
[%]


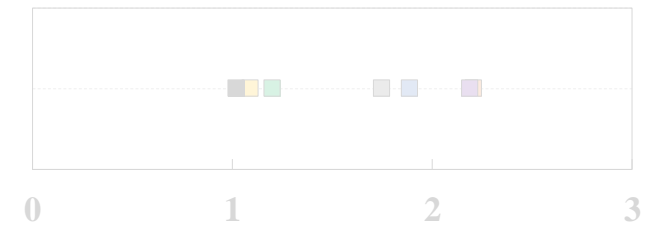
NF EN 1926
Chargement uniaxial

Résistance en compression :

 R_c
[MPa]


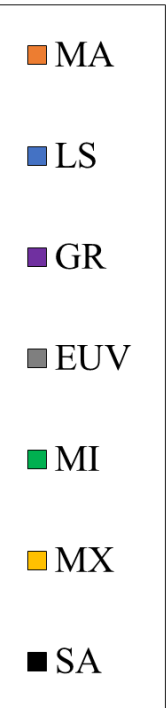
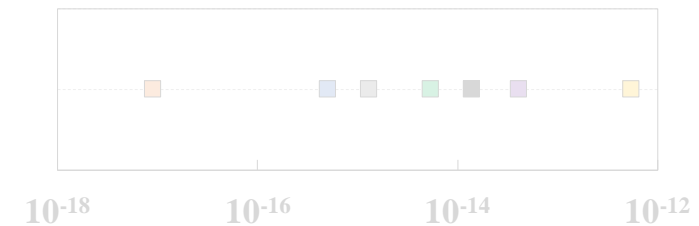
Méthode
Hotdisk TPS 1500

Conductivité thermique :

 λ
[W.m⁻¹.K⁻¹]


Contrôleur GDS
Cellule triaxiale

Perméabilité à l'eau :

 K_{eau}
[m²]


Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

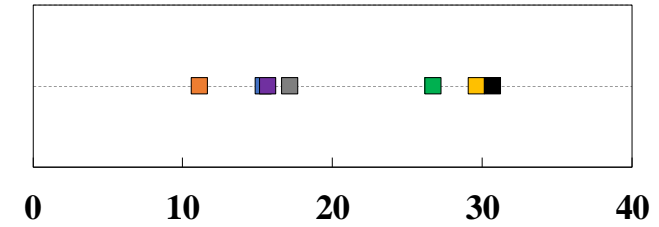
Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

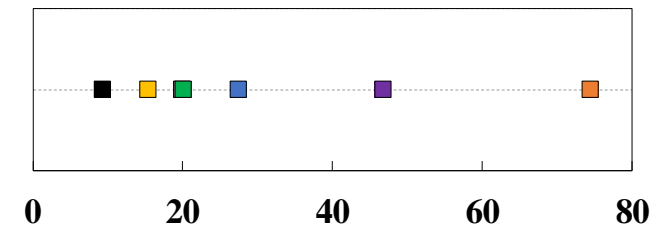
NF EN 1936
Saturation à l'eau
sous vide

Porosité totale :

 N_T
[%]


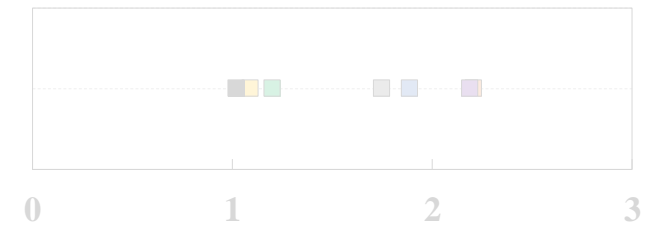
NF EN 1926
Chargement uniaxial

Résistance en compression :

 R_C
[MPa]


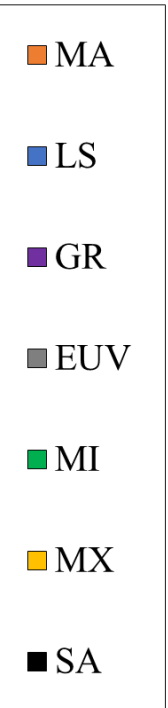
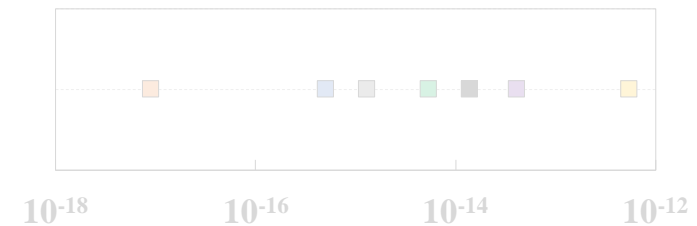
Méthode
Hotdisk TPS 1500

Conductivité thermique :

 λ
[W.m⁻¹.K⁻¹]


Contrôleur GDS
Cellule triaxiale

Perméabilité à l'eau :

 K_{eau}
[m²]


Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

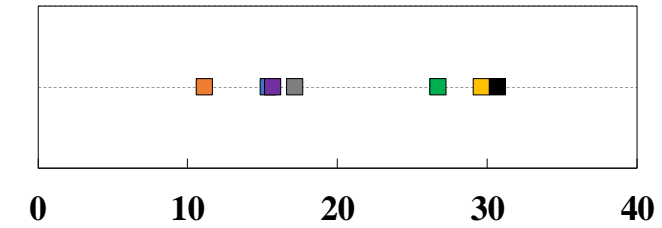
Réseau poreux

Texture

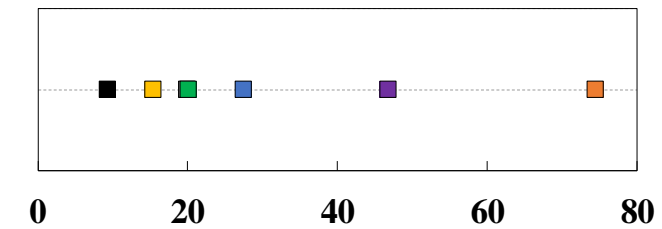
Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

NF EN 1936
Saturation à l'eau
sous vide

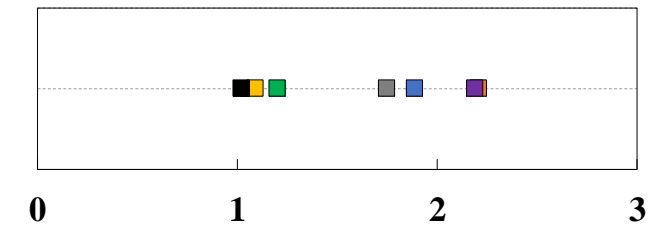
Porosité totale :

 N_T
[%]NF EN 1926
Chargement uniaxial

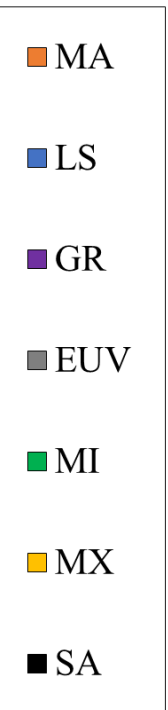
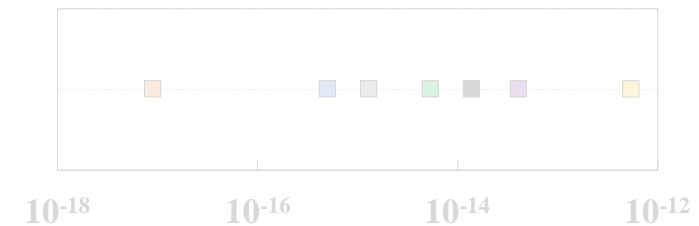
Résistance en compression :

 R_C
[MPa]Méthode
Hotdisk TPS 1500

Conductivité thermique :

 λ
[W.m⁻¹.K⁻¹]Contrôleur GDS
Cellule triaxiale

Perméabilité à l'eau :

 K_{eau}
[m²]

Présentation des 7 pierres de l'étude : origine et emploi, diversité des propriétés intrinsèques

Composition minéralogique

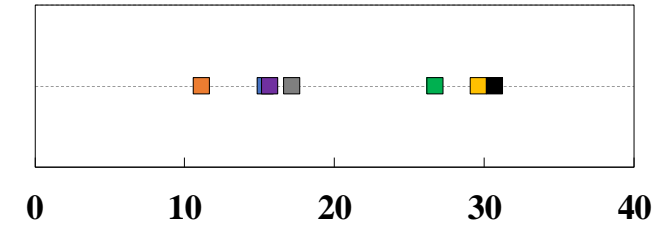
Réseau poreux

Texture

Propriétés physique - mécanique - thermique - hydrique

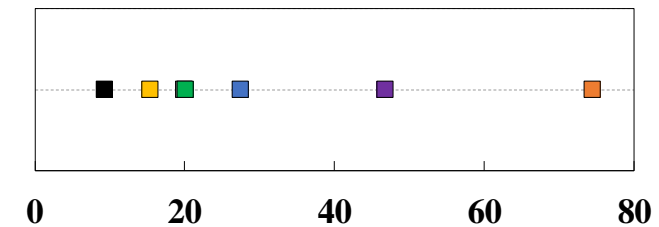
NF EN 1936
Saturation à l'eau
sous vide

Porosité totale :

 N_T
[%]


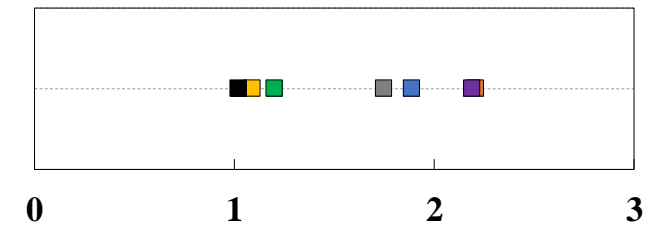
NF EN 1926
Chargement uniaxial

Résistance en compression :

 R_C
[MPa]


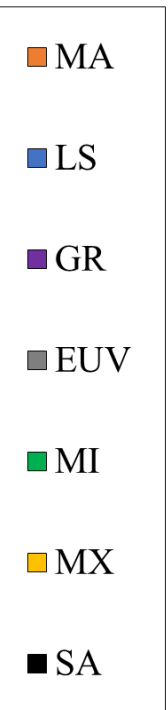
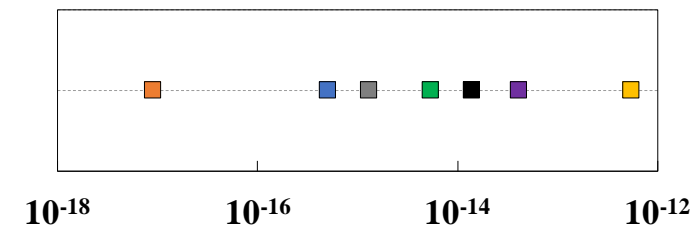
Méthode
Hotdisk TPS 1500

Conductivité thermique :

 λ
[W.m⁻¹.K⁻¹]


Contrôleur GDS
Cellule triaxiale

Perméabilité à l'eau :

 K_{eau}
[m²]


Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Identification des mécanismes élémentaires au cours du chauffage et refroidissement



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Identification des mécanismes élémentaires au cours du chauffage et refroidissement

Analyses ATG-DSC

ATG : évolution de la perte de masse jusqu'à 1 000 °C

DSC : évolution du flux de chaleur jusqu'à 1 000 °C

→ transformations thermo-chimique associées ou non à une perte de masse

- réalisées sur quelques mg de matériau broyé en poudre
- vitesse de chauffage et refroidissement : 10 °C/min
- répétition de 3 essais par pierre

Essai de dilatométrie

↪ évolution de la déformation jusqu'à 1 050 °C
↪ détermination du coefficient de dilatation α

→ comportement thermo-mécanique guidé par divers paramètres intrinsèques

- réalisé sur échantillons cylindriques $\phi 1 \times 5$ cm
- vitesse de chauffage et refroidissement : 4 °C/min
- répétition de 3 essais par pierre



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Identification des mécanismes élémentaires au cours du chauffage et refroidissement

Analyses ATG-DSC

ATG : évolution de la perte de masse jusqu'à 1 000 °C

DSC : évolution du flux de chaleur jusqu'à 1 000 °C

→ transformations thermo-chimique associées ou non à une perte de masse

- réalisées sur quelques mg de matériau broyé en poudre
- vitesse de chauffage et refroidissement : 10 °C/min
- répétition de 3 essais par pierre

Essai de dilatométrie

↪ évolution de la déformation jusqu'à 1 050 °C
↪ détermination du coefficient de dilatation α

→ comportement thermo-mécanique guidé par divers paramètres intrinsèques

- réalisé sur échantillons cylindriques $\phi 1 \times 5$ cm
- vitesse de chauffage et refroidissement : 4 °C/min
- répétition de 3 essais par pierre



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Identification des mécanismes élémentaires au cours du chauffage et refroidissement

Analyses ATG-DSC

ATG : évolution de la perte de masse jusqu'à 1 000 °C

DSC : évolution du flux de chaleur jusqu'à 1 000 °C

→ transformations thermo-chimique associées ou non à une perte de masse

- réalisées sur quelques mg de matériau broyé en poudre
- vitesse de chauffage et refroidissement : 10 °C/min
- répétition de 3 essais par pierre

Essai de dilatométrie

↪ évolution de la déformation jusqu'à 1 050 °C

↪ détermination du coefficient de dilatation α

→ comportement thermo-mécanique guidé par divers paramètres intrinsèques

- réalisé sur échantillons cylindriques $\phi 1 \times 5$ cm
- vitesse de chauffage et refroidissement : 4 °C/min
- répétition de 3 essais par pierre



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Identification des mécanismes élémentaires au cours du chauffage et refroidissement

Analyses ATG-DSC

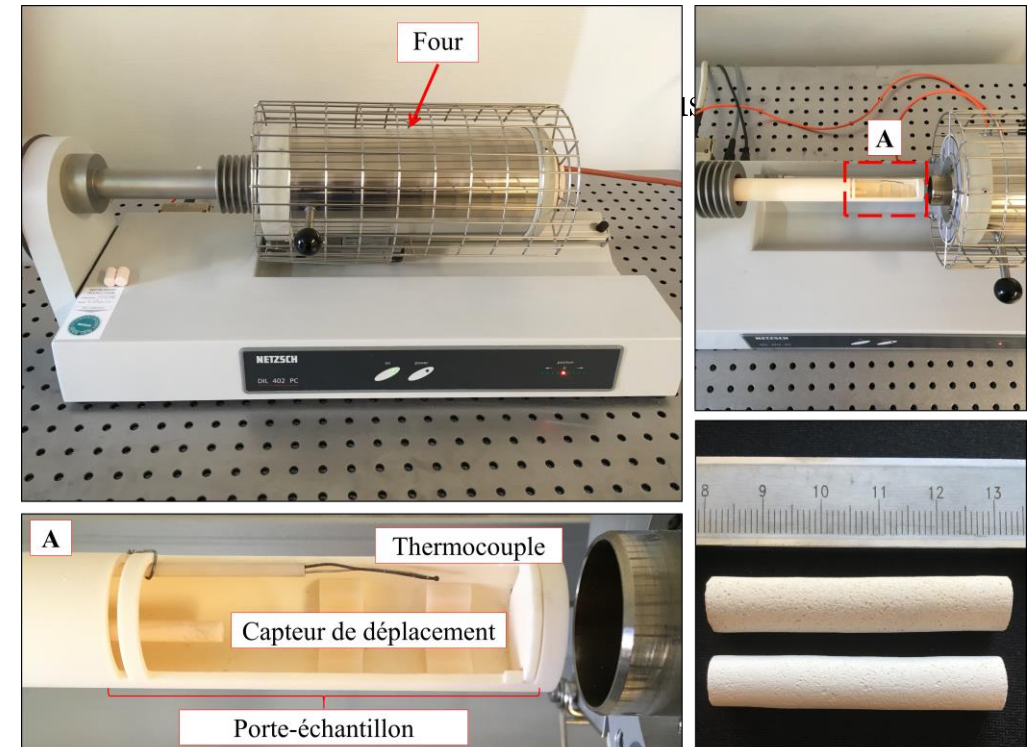
ATG : évolution de la perte de masse jusqu'à 1 000 °C

DSC : évolution du flux de chaleur jusqu'à 1 000 °C

→ transformations thermo-chimique associées ou non à une perte de masse

- réalisées sur quelques mg de matériau broyé en poudre
- vitesse de chauffage et refroidissement : 10 °C/min
- répétition de 3 essais par pierre

Essai de dilatométrie



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Évaluer les effets de différents niveaux de températures sur l'évolution des propriétés des pierres

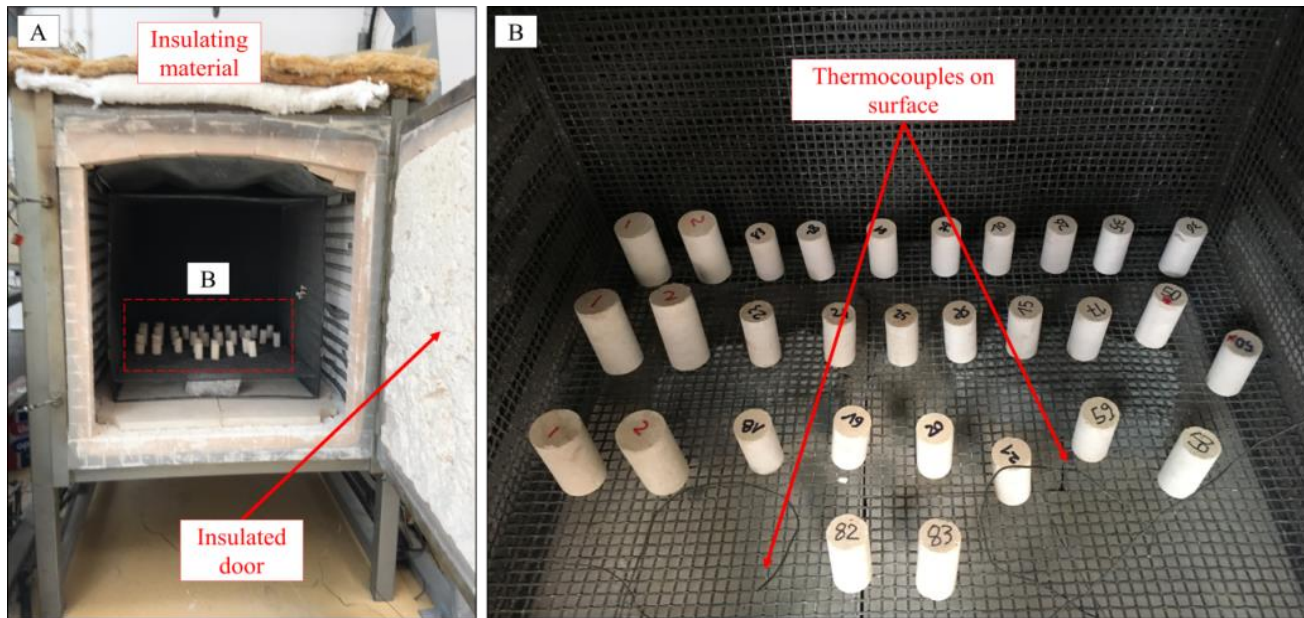


Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

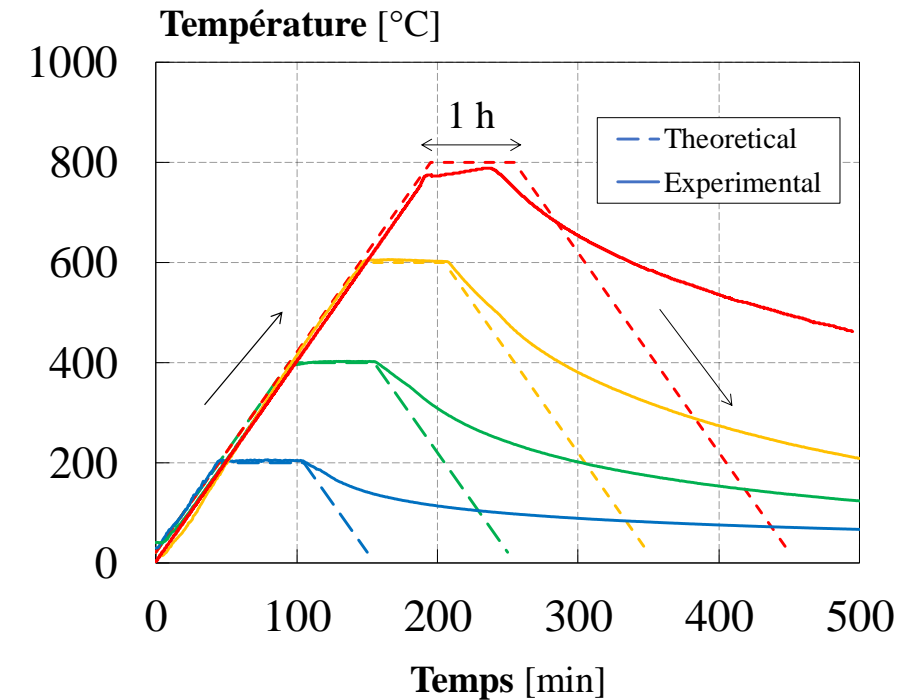
Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Évaluer les effets de différents niveaux de températures sur l'évolution des propriétés des pierres



Échantillons de pierre au sein du four



- 10 éprouvettes cylindriques $\phi 4 \times 8$ cm (séchées) testées /pierre /cycle
- vitesse de chauffage : $4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, selon recommandations RILEM

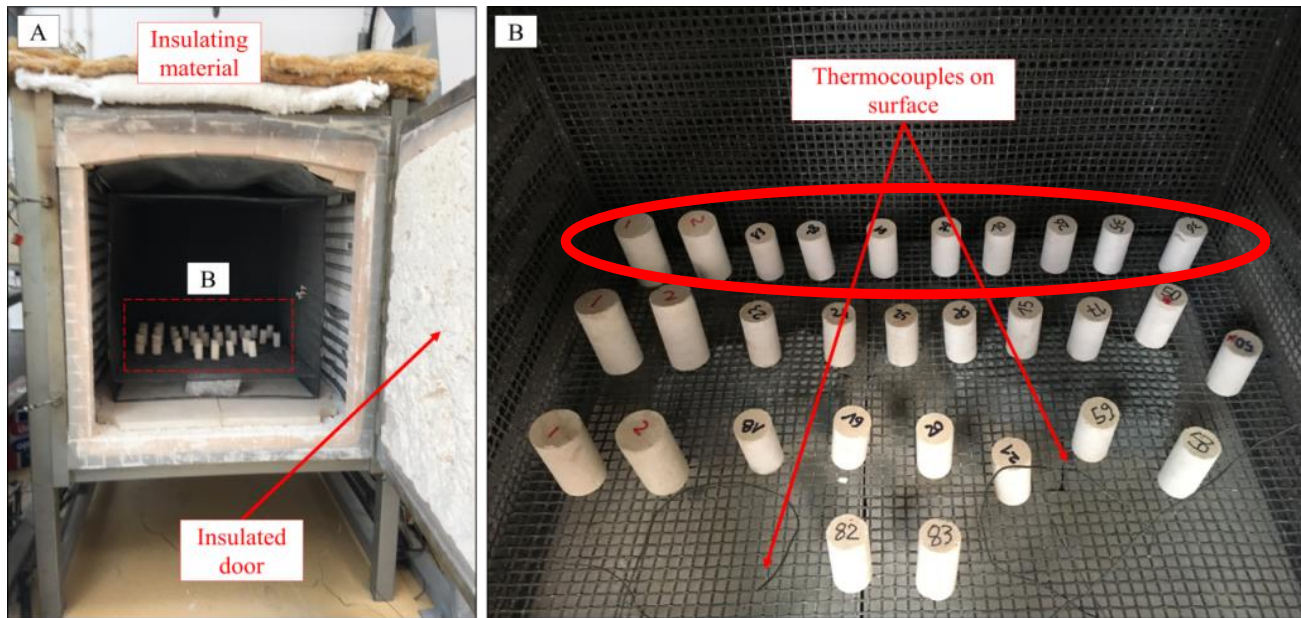
- 4 cycles de c/r : 200, 400, 600, 800 $^\circ\text{C}$

Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

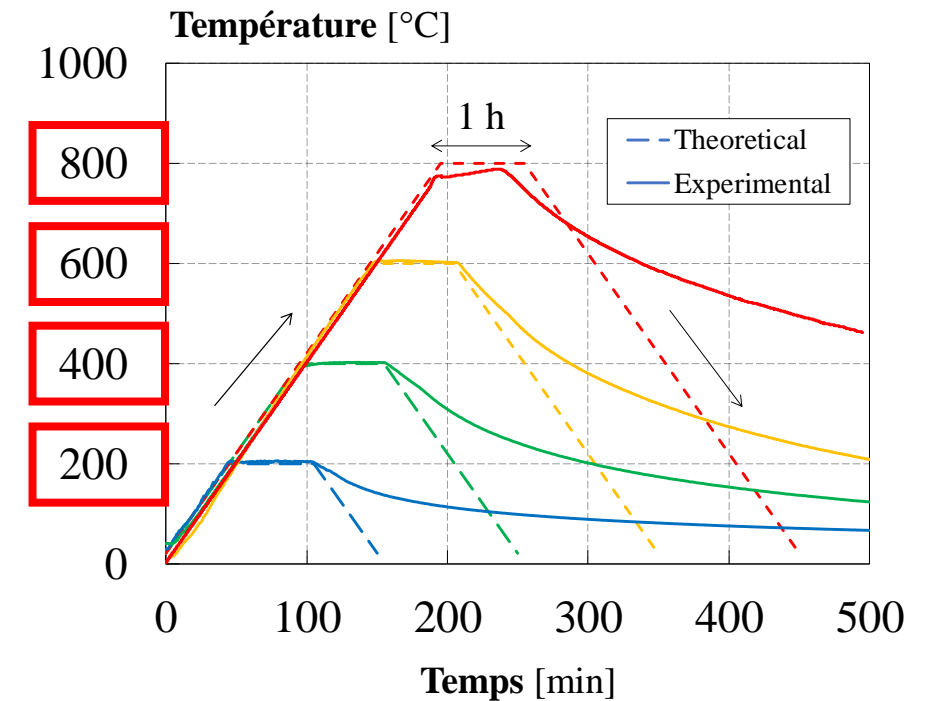
Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Évaluer les effets de différents niveaux de températures sur l'évolution des propriétés des pierres



Échantillons de pierre au sein du four



- 10 éprouvettes cylindriques $\phi 4 \times 8$ cm (séchées) testées /pierre /cycle
- vitesse de chauffage : $4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, selon recommandations RILEM

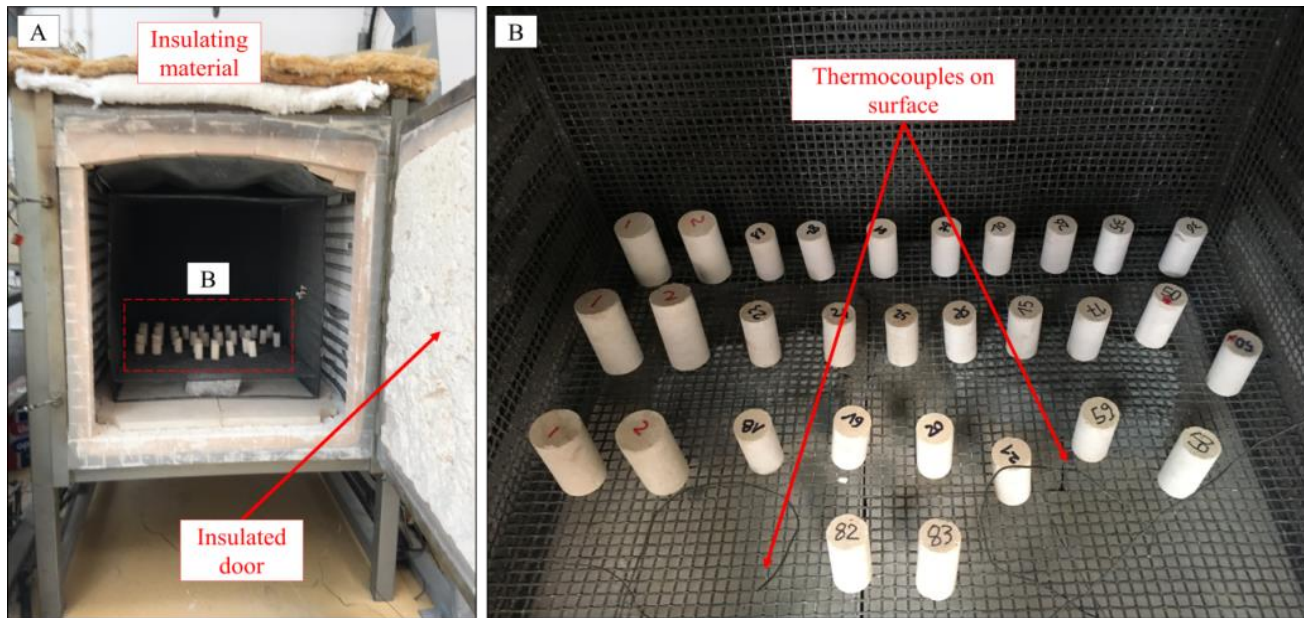
- 4 cycles de c/r : 200, 400, 600, 800 $^\circ\text{C}$

Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

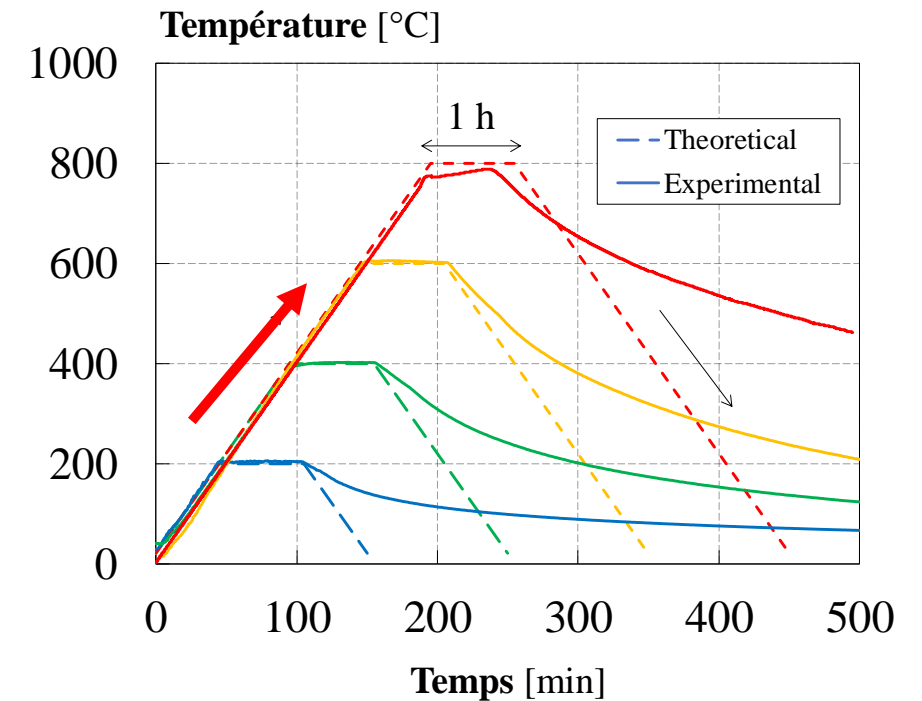
Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Évaluer les effets de différents niveaux de températures sur l'évolution des propriétés des pierres



Échantillons de pierre au sein du four



- 10 éprouvettes cylindriques $\phi 4 \times 8$ cm (séchées) testées /pierre /cycle
- vitesse de chauffage : 4 °C/min, selon recommandations RILEM

- 4 cycles de c/r : 200, 400, 600, 800 °C

Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Évaluer les effets de différents niveaux de températures sur l'évolution des propriétés des pierres

Essais de caractérisation dont les résultats sont présentés par la suite :

Type d'essai	Paramètres	Nb d'échantillons
Colorimétrie : analyse du changement de couleur	a^* , b^* , L^*	3 mesures \times 3
Résistance en compression	R_C	3
Résistance en traction	R_T	4
Vitesse des ondes P	V_P , E_{dyn}	10
Porosité totale accessible à l'eau	N_T	5
Absorption d'eau par capillarité	A	3

Pour chaque type de pierre, et par cycle de chauffage-refroidissement



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Évaluer les effets de différents niveaux de températures sur l'évolution des propriétés des pierres

Essais de caractérisation dont les résultats sont présentés par la suite :

Type d'essai	Paramètres	Nb d'échantillons	
Colorimétrie : analyse du changement de couleur	a^* , b^* , L^*	3 mesures \times 3	
Résistance en compression	R_C	3	
Résistance en traction	R_T	4	essais destructifs
Vitesse des ondes P	V_P , E_{dyn}	10	ou nécessitant éprouvettes
Porosité totale accessible à l'eau	N_T	5	
Absorption d'eau par capillarité	A	3	

Pour chaque type de pierre, et par cycle de chauffage-refroidissement



Organisation de la campagne expérimentale : équipements, méthodes et protocoles d'essai

Essais dits *à chaud*, réalisés au cours du chauffage et refroidissement

Essais dits *en résiduel*, réalisés après chauffage

Évaluer les effets de différents niveaux de températures sur l'évolution des propriétés des pierres

Essais de caractérisation dont les résultats sont présentés par la suite :

Type d'essai	Paramètres	Nb d'échantillons	
Colorimétrie : analyse du changement de couleur	a^* , b^* , L^*	3 mesures \times 3	
Résistance en compression	R_C	3	
Résistance en traction	R_T	4	essais non-destructifs
Vitesse des ondes P	V_P , E_{dyn}	10	et réalisables in-situ
Porosité totale accessible à l'eau	N_T	5	
Absorption d'eau par capillarité	A	3	

Pour chaque type de pierre, et par cycle de chauffage-refroidissement



Comportement à haute température des pierres de construction



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

~~Simulation numérique~~

Non-présenté aujourd'hui

Comportement à haute température des pierres de construction



Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

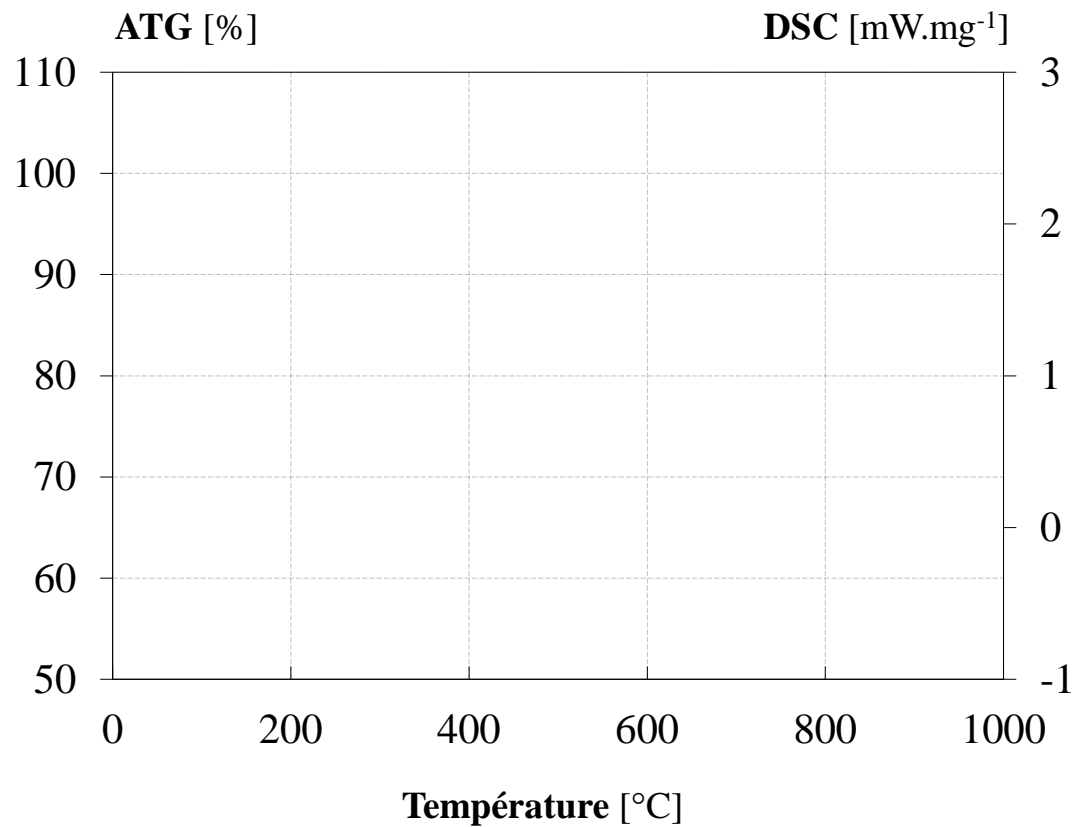
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

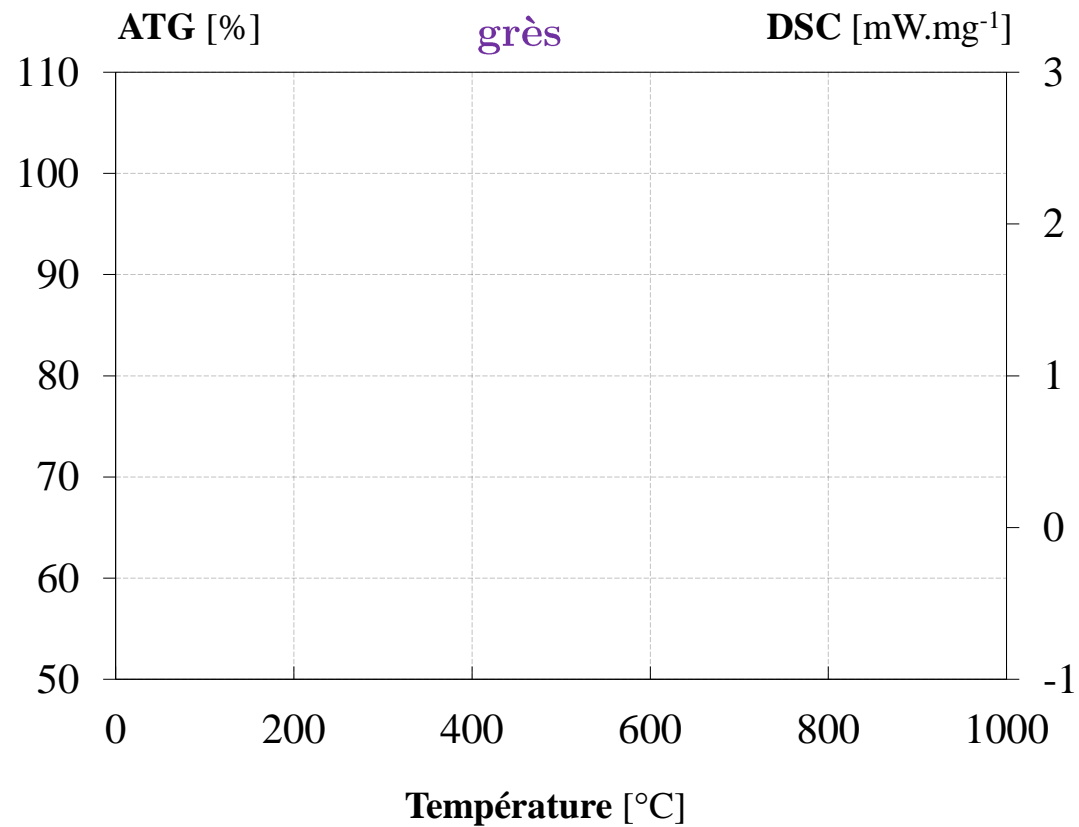
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

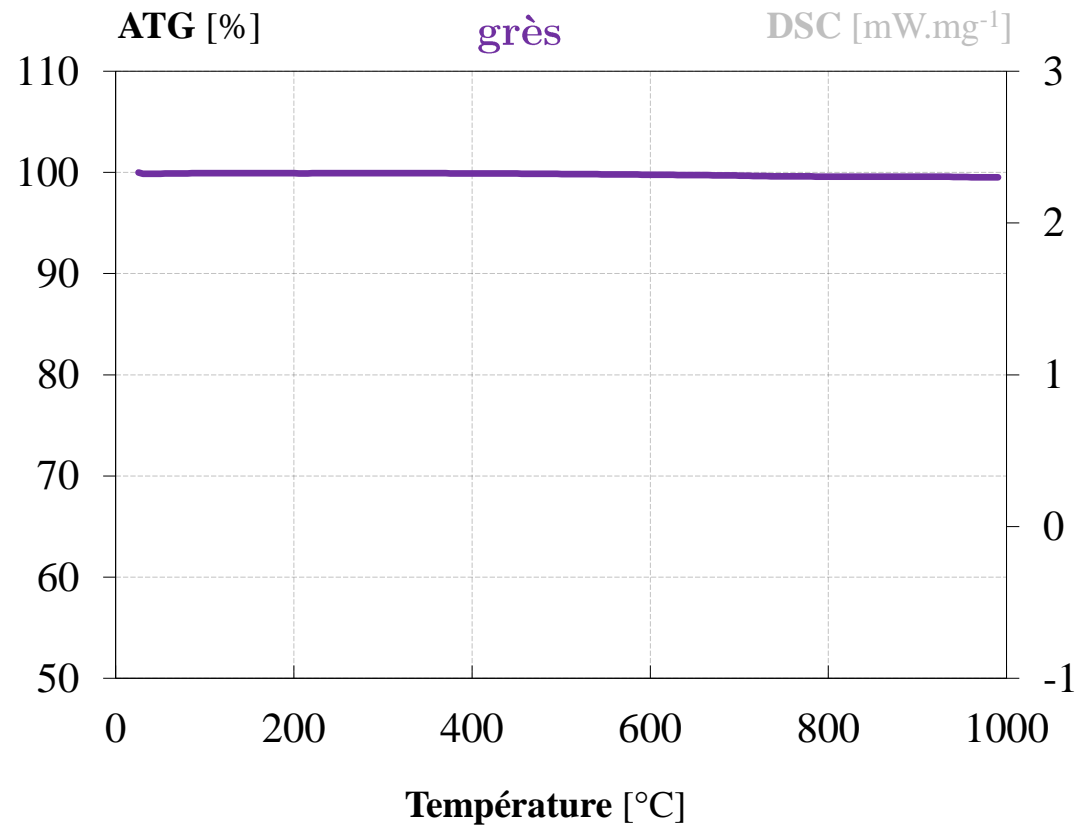
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du quartz :



- Décomposition de la calcite :



- Décomposition de la dolomite :



- Combustion de matière organique

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

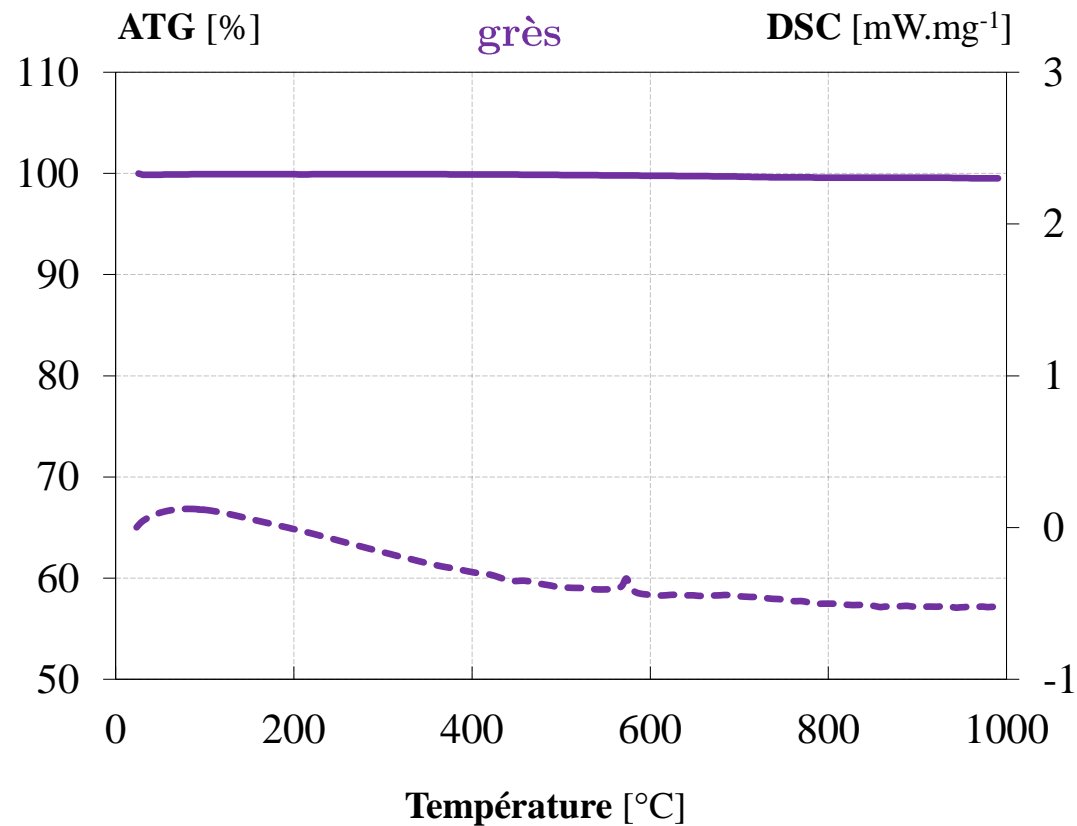
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du quartz :



- Décomposition de la calcite :



- Décomposition de la dolomite :



- Combustion de matière organique

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

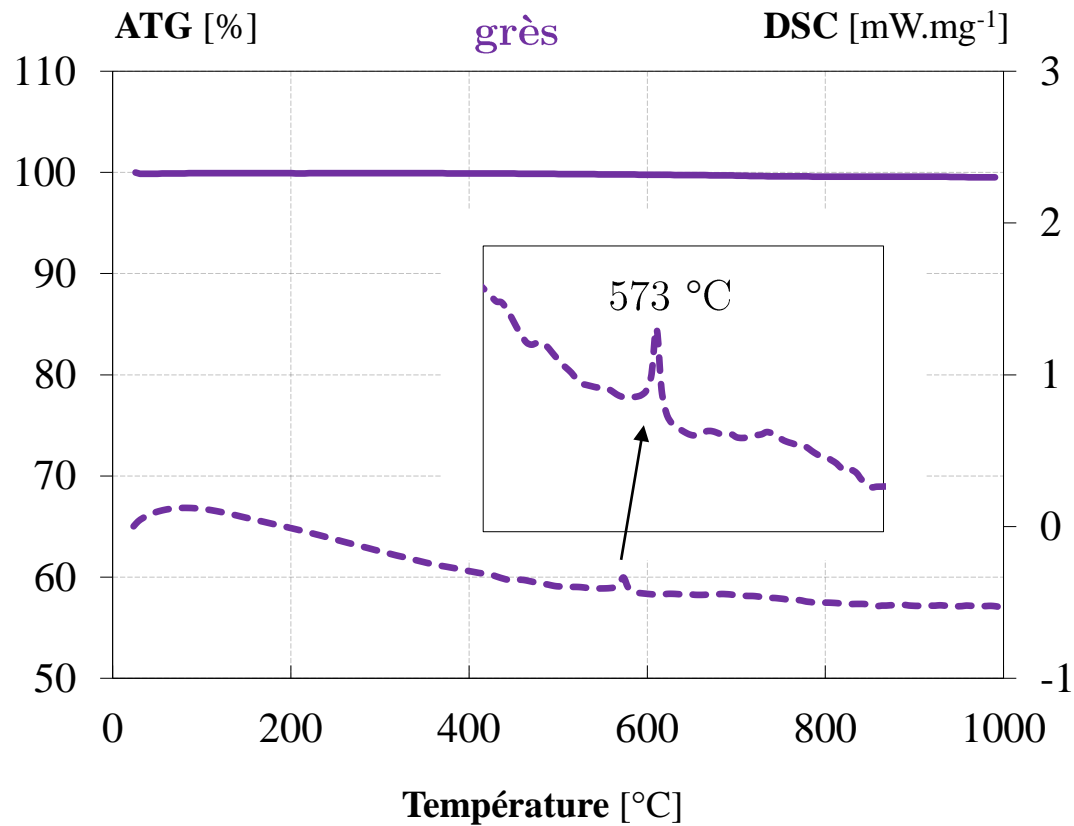
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 

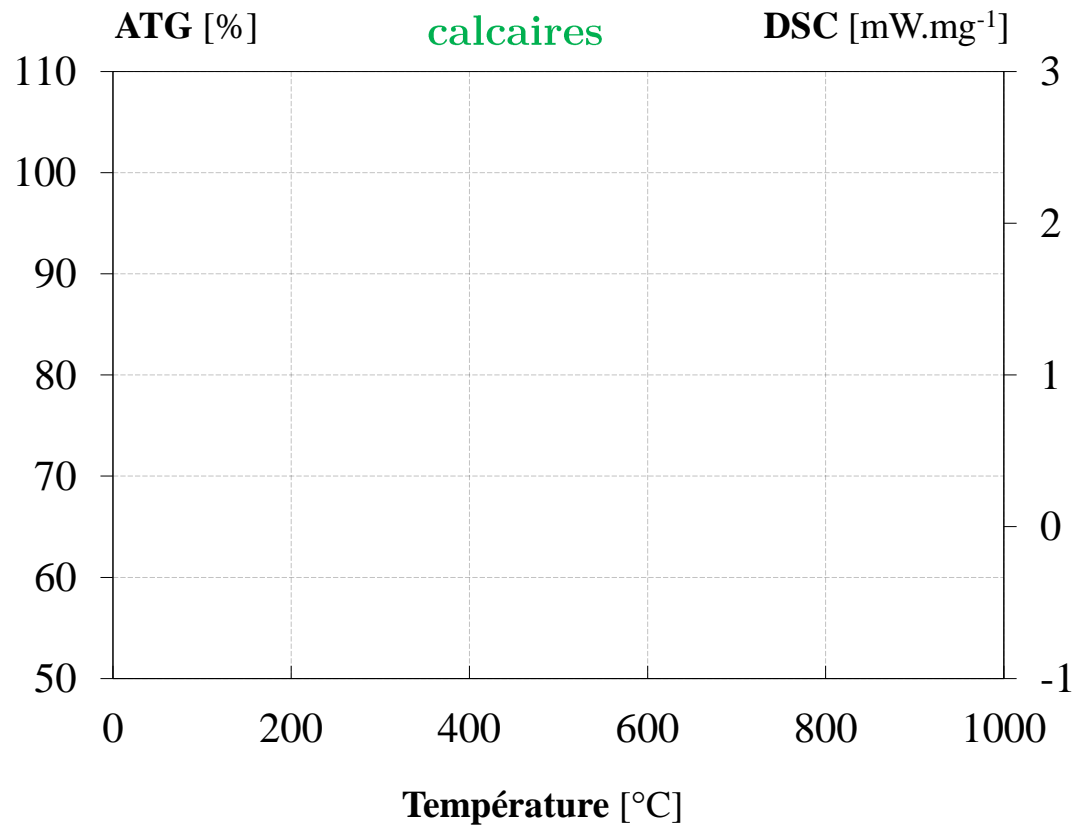
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

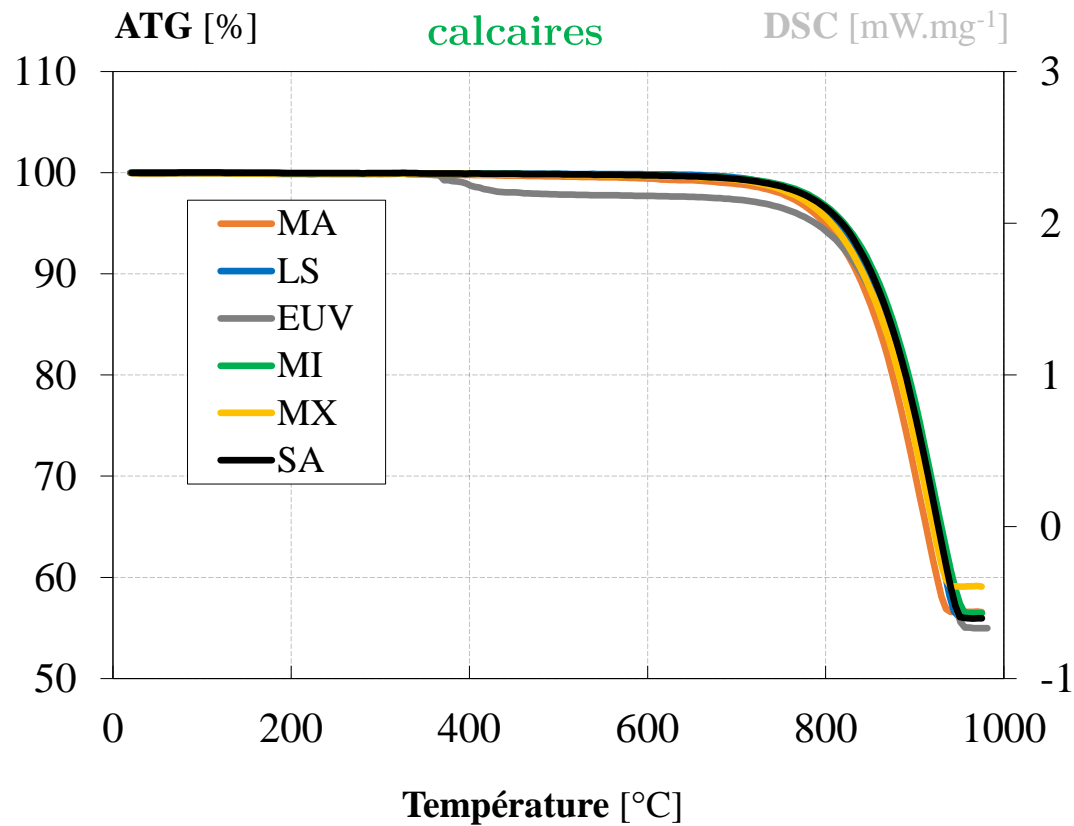
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

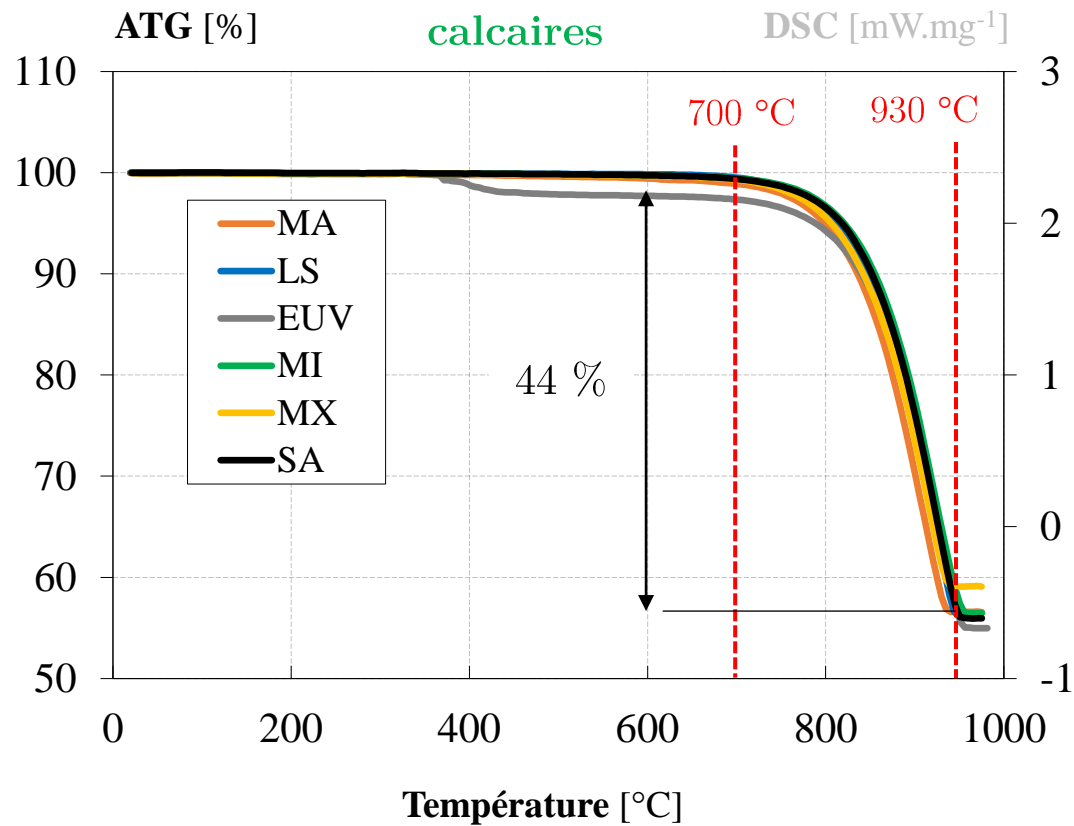
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

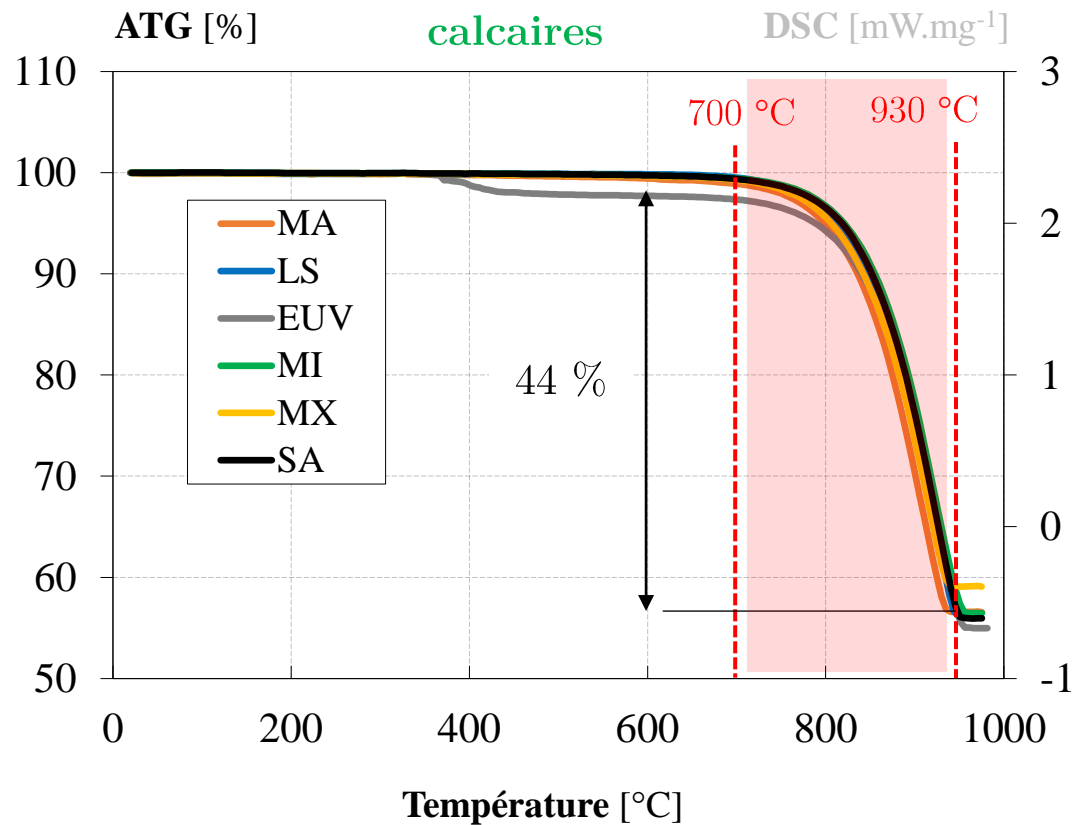
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

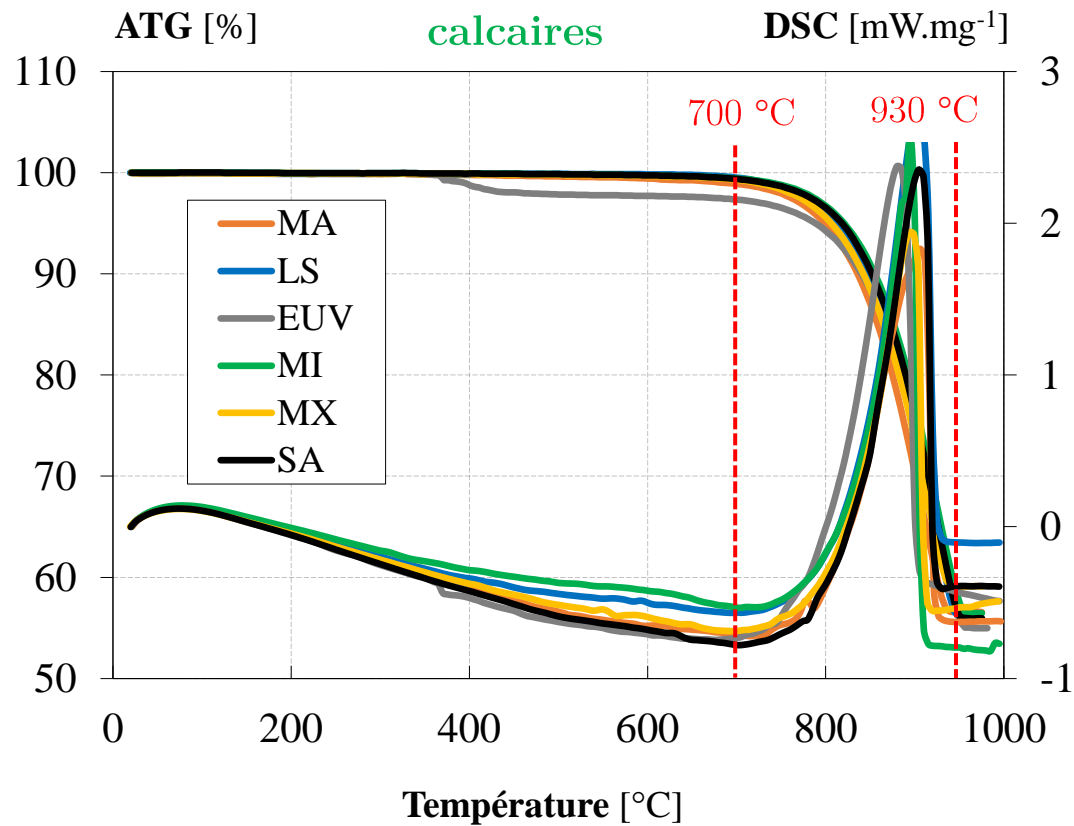
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

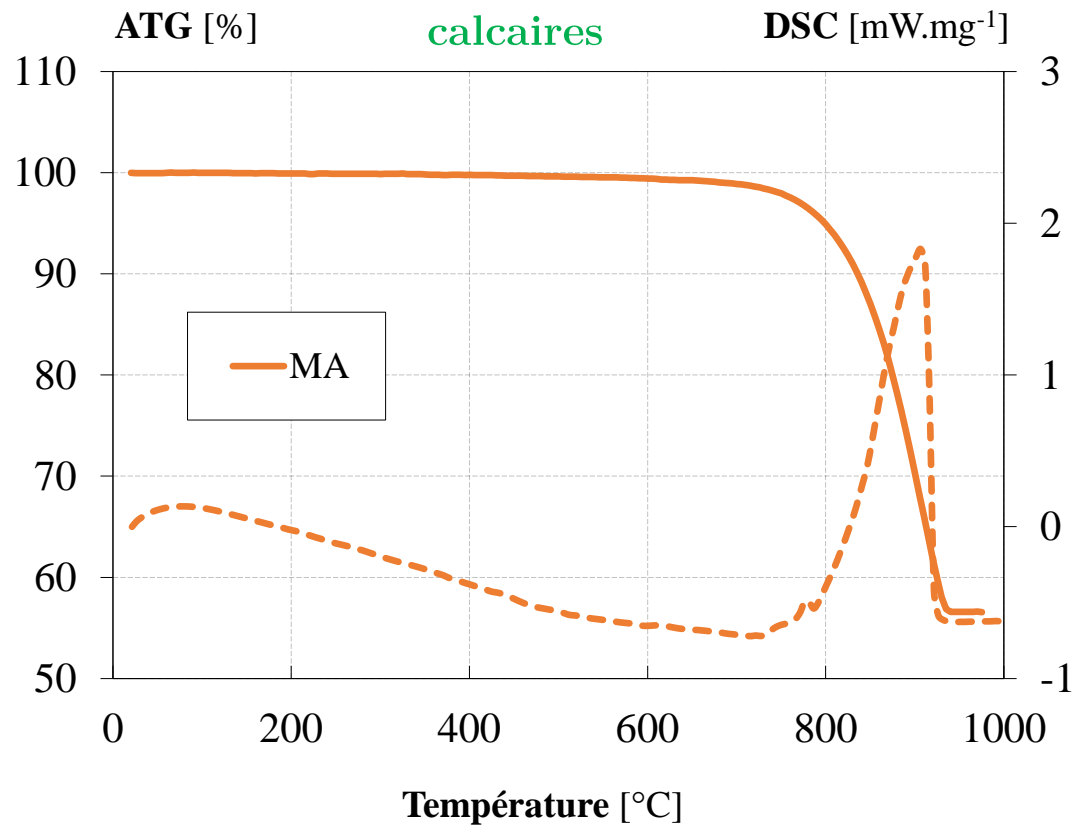
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

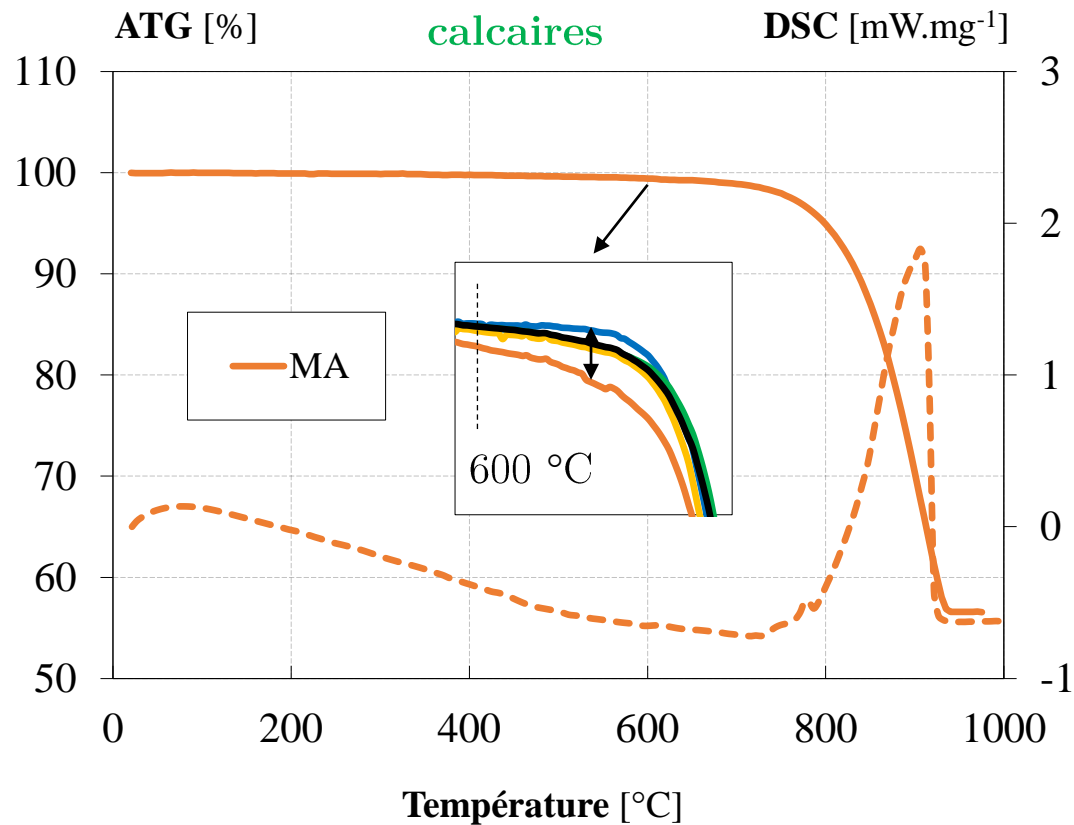
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

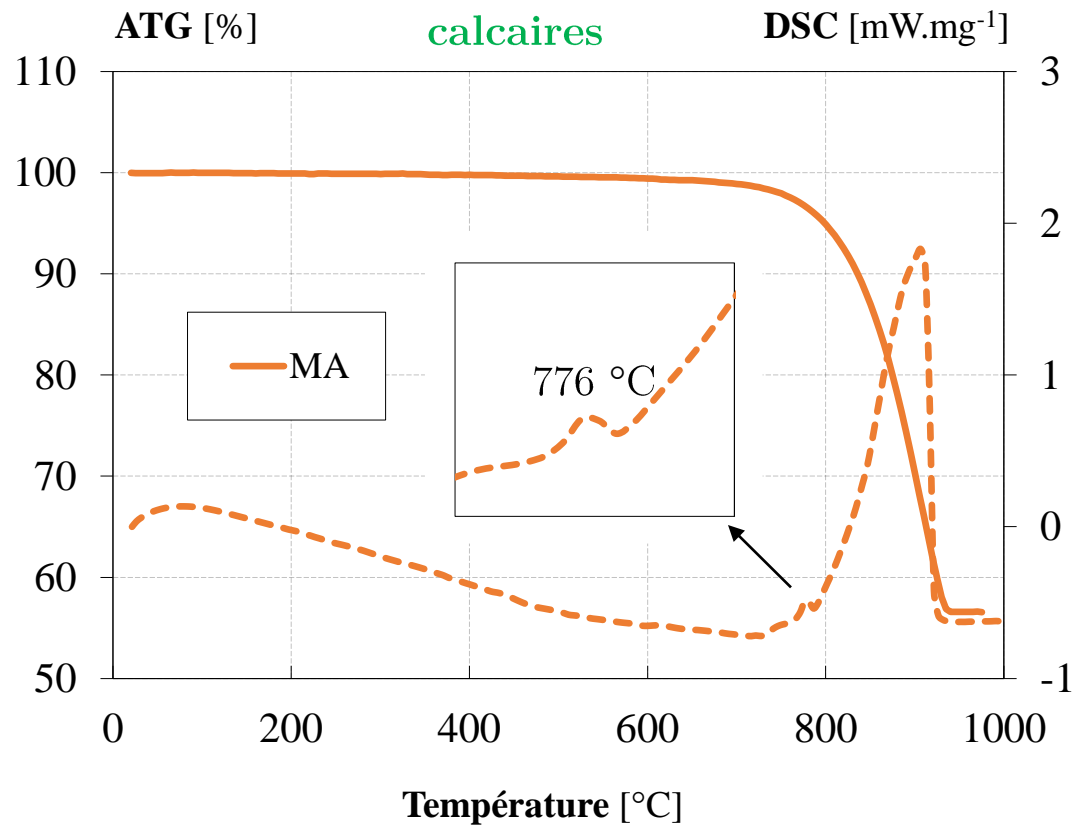
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

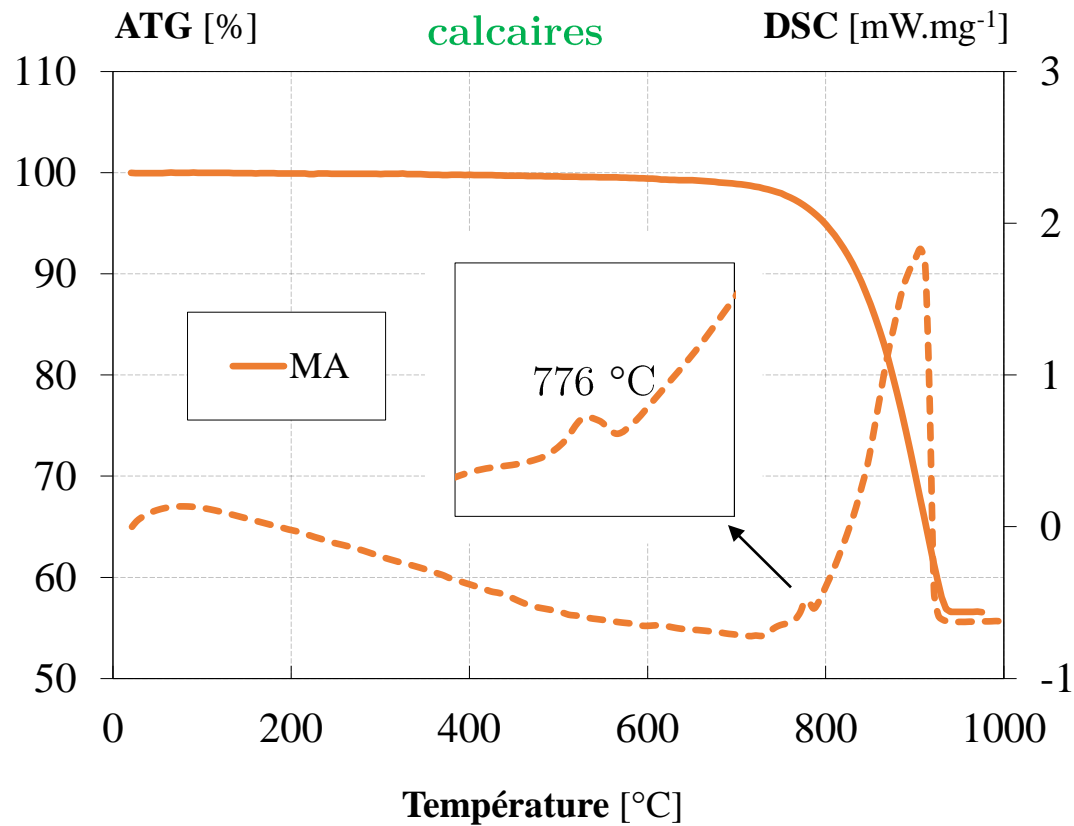
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

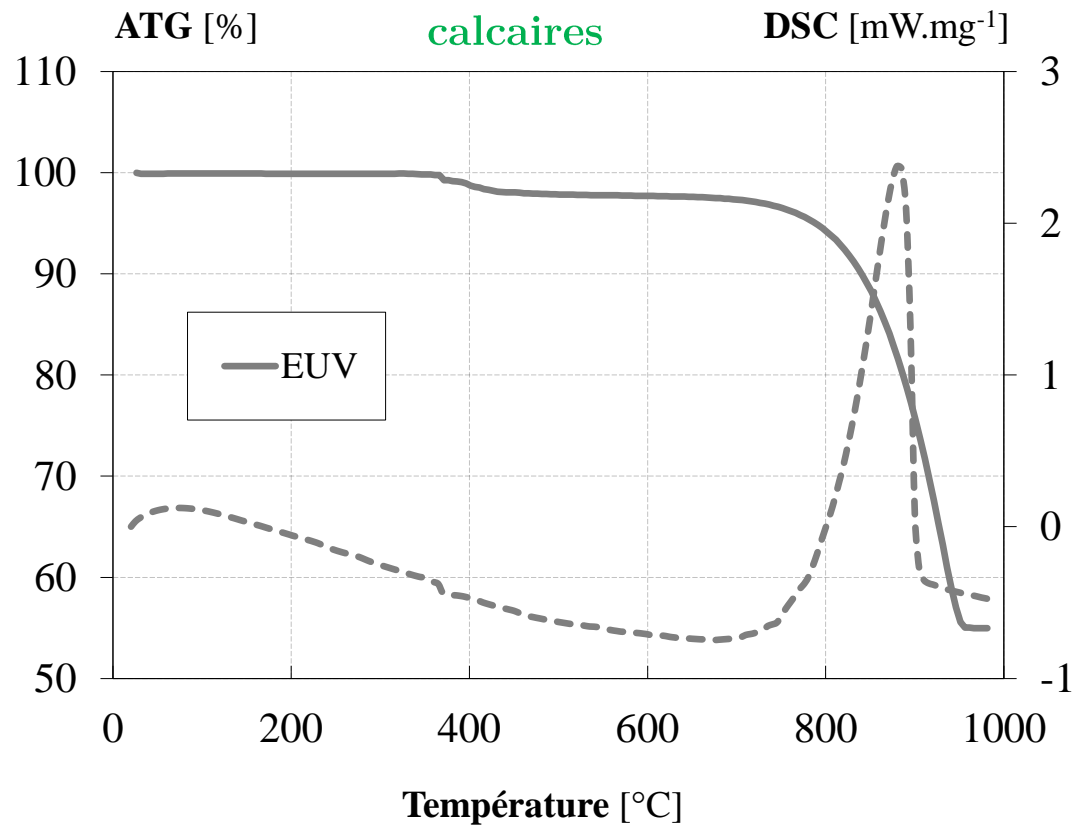
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

❑ Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

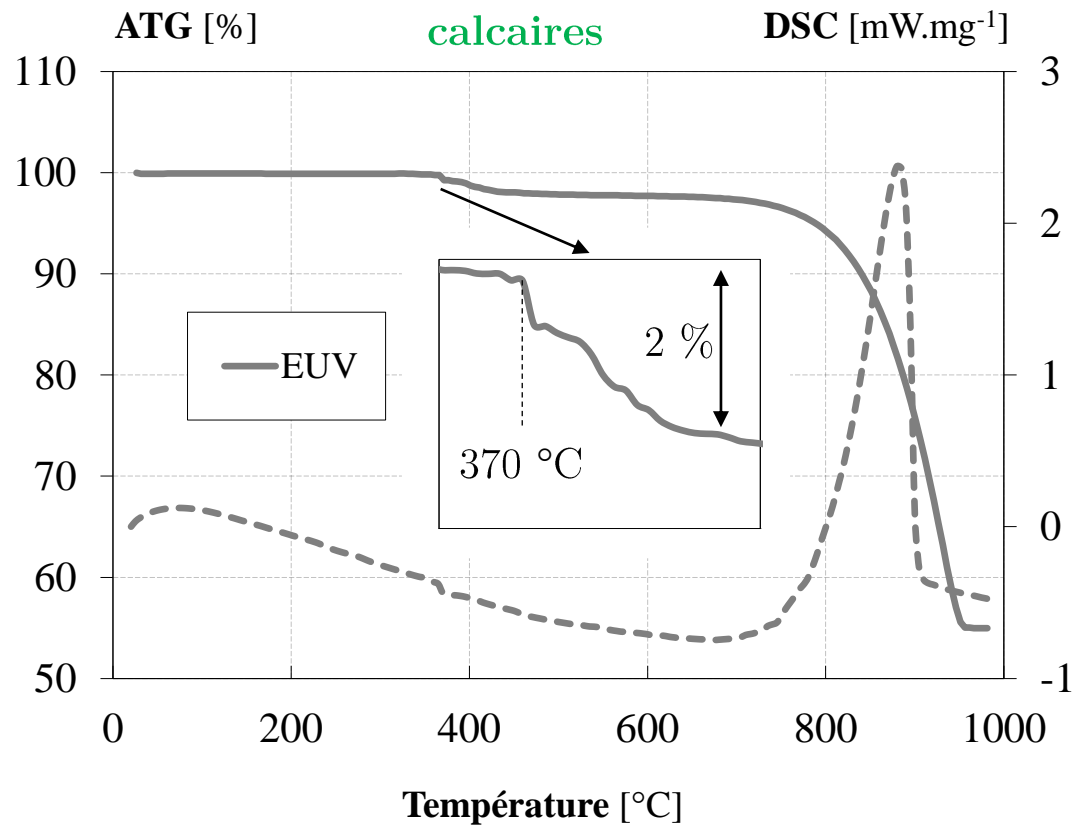
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Analyses ATG-DSC

Influence de la composition minéralogique :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décomposition de la **calcite** :



- Décomposition de la **dolomite** :



- Combustion de **matière organique**

Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



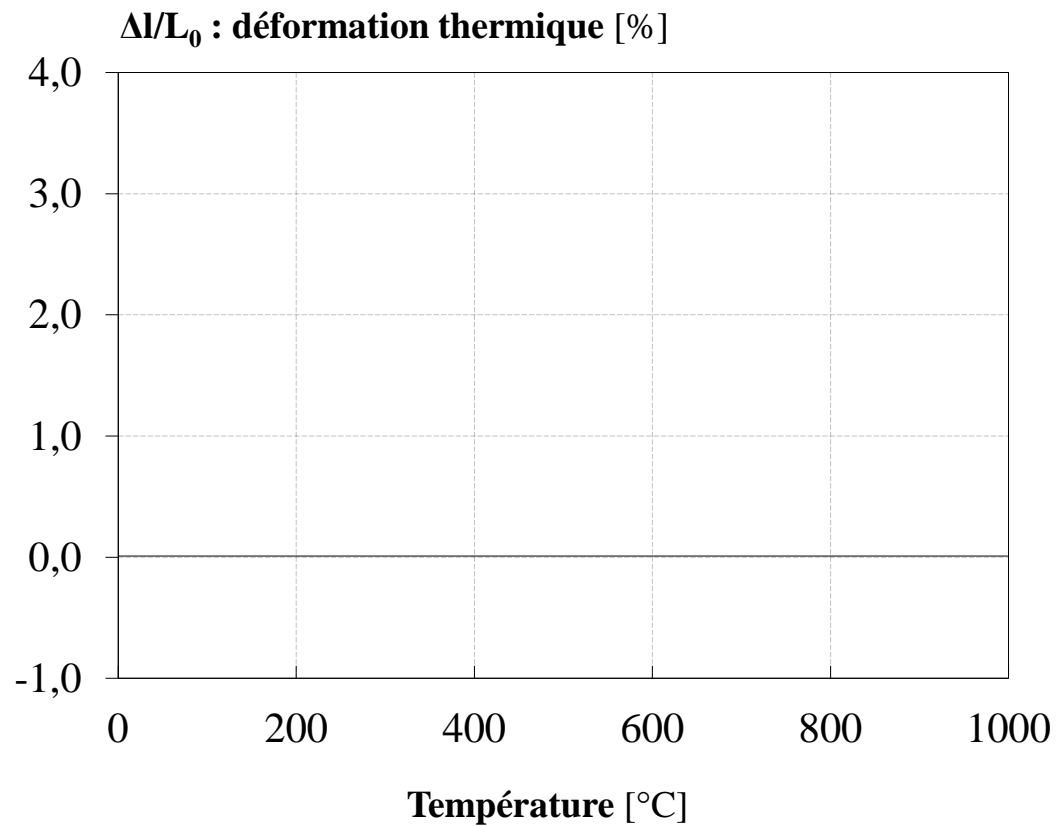
Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

Essais expérimentaux *à chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

 Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :

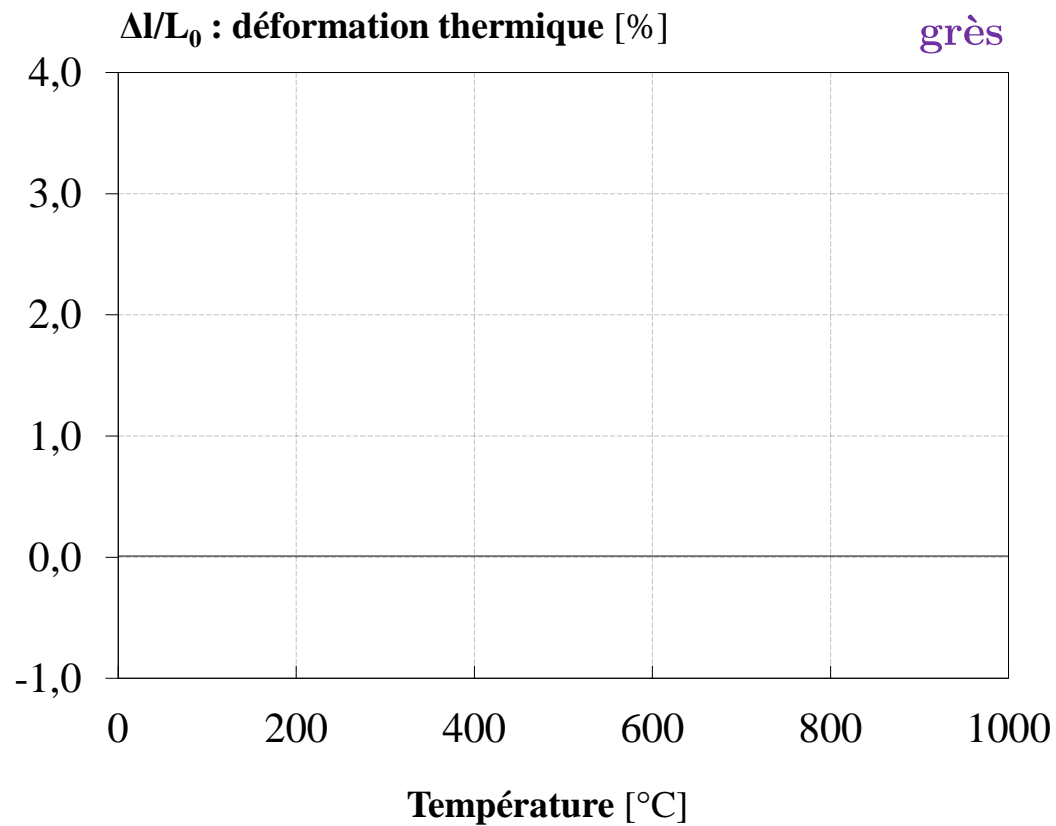


Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux *à chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

 Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

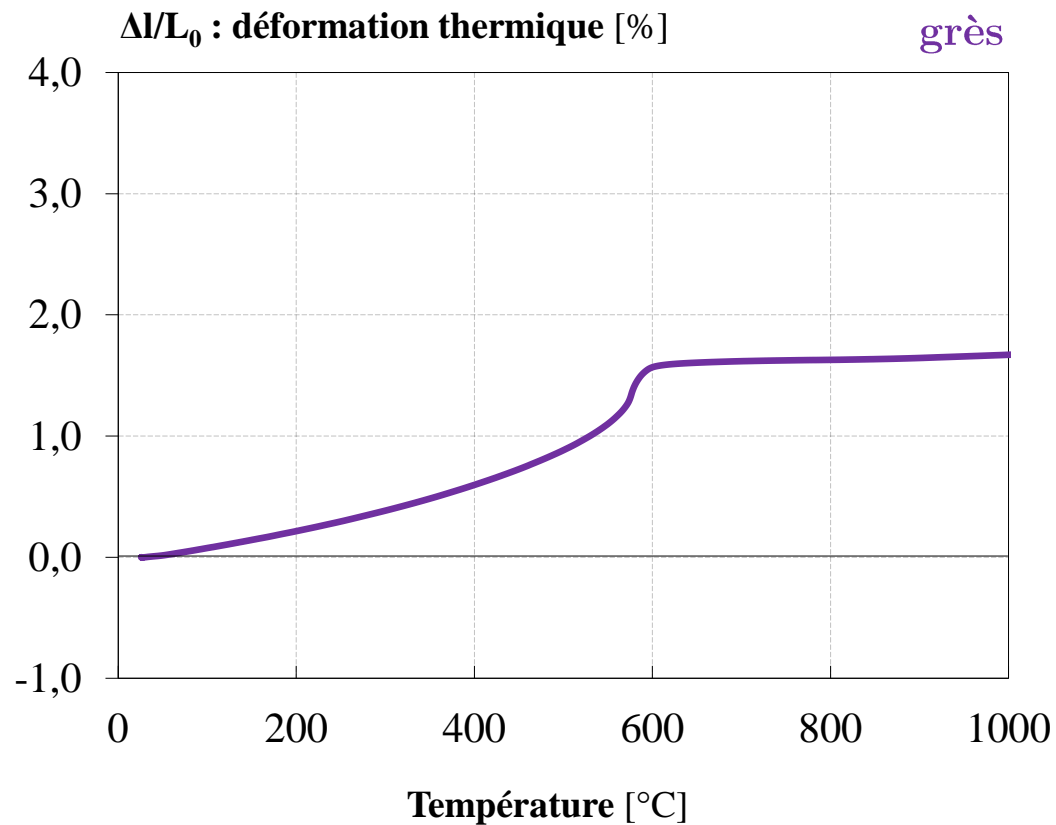
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du quartz :



- Décarbonatation de la calcite :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales \rightarrow incompatibilité de déformation

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

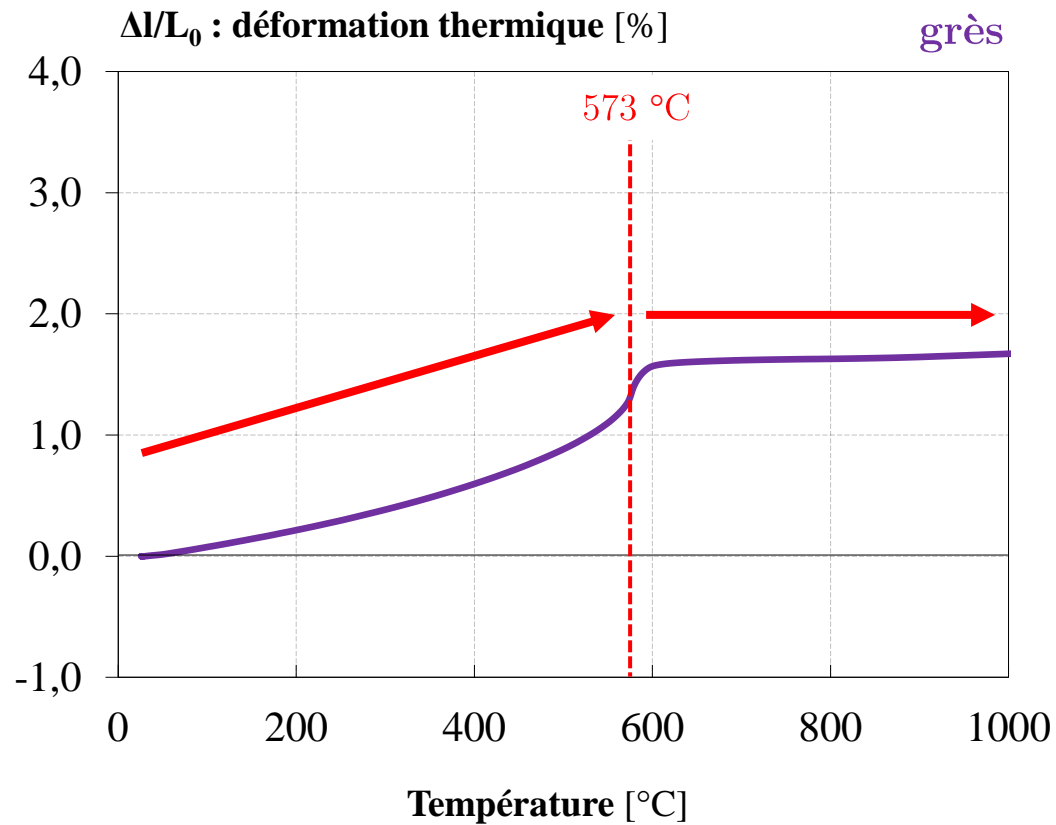
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales → incompatibilité de déformation



Comportement à haute température des pierres de construction 

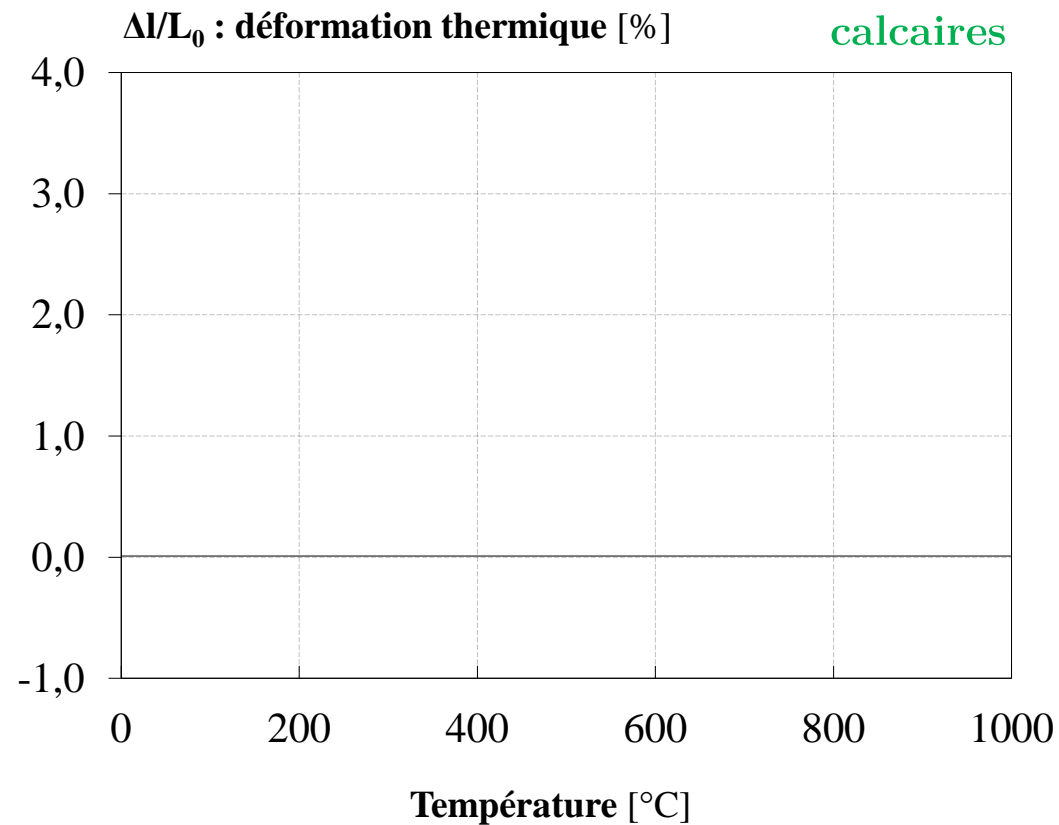
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales \rightarrow incompatibilité de déformation

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

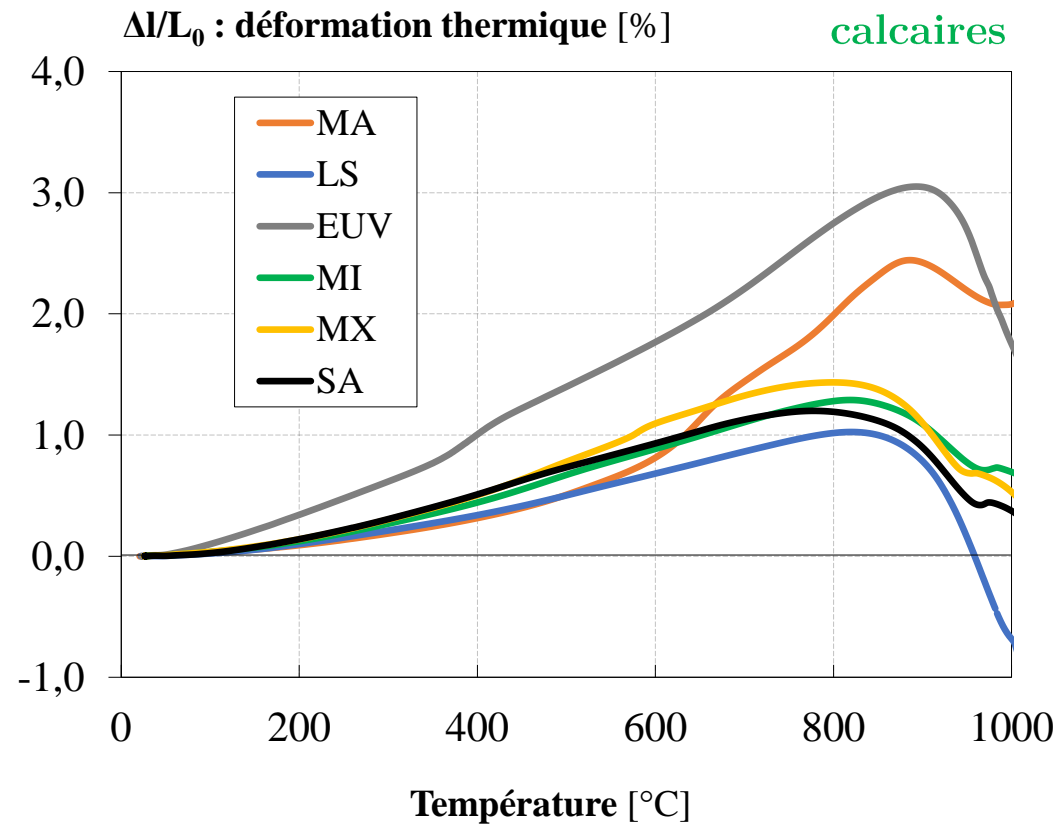
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du quartz :



- Décarbonatation de la calcite :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales \rightarrow incompatibilité de déformation



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

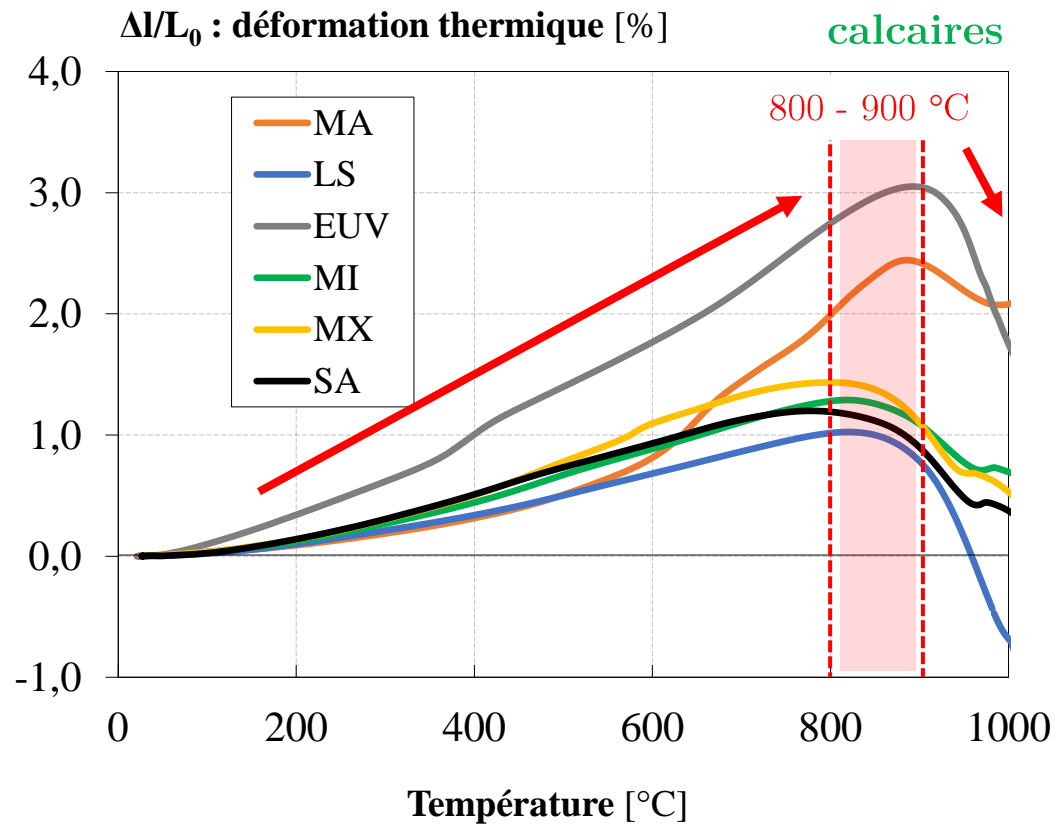
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales → incompatibilité de déformation



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

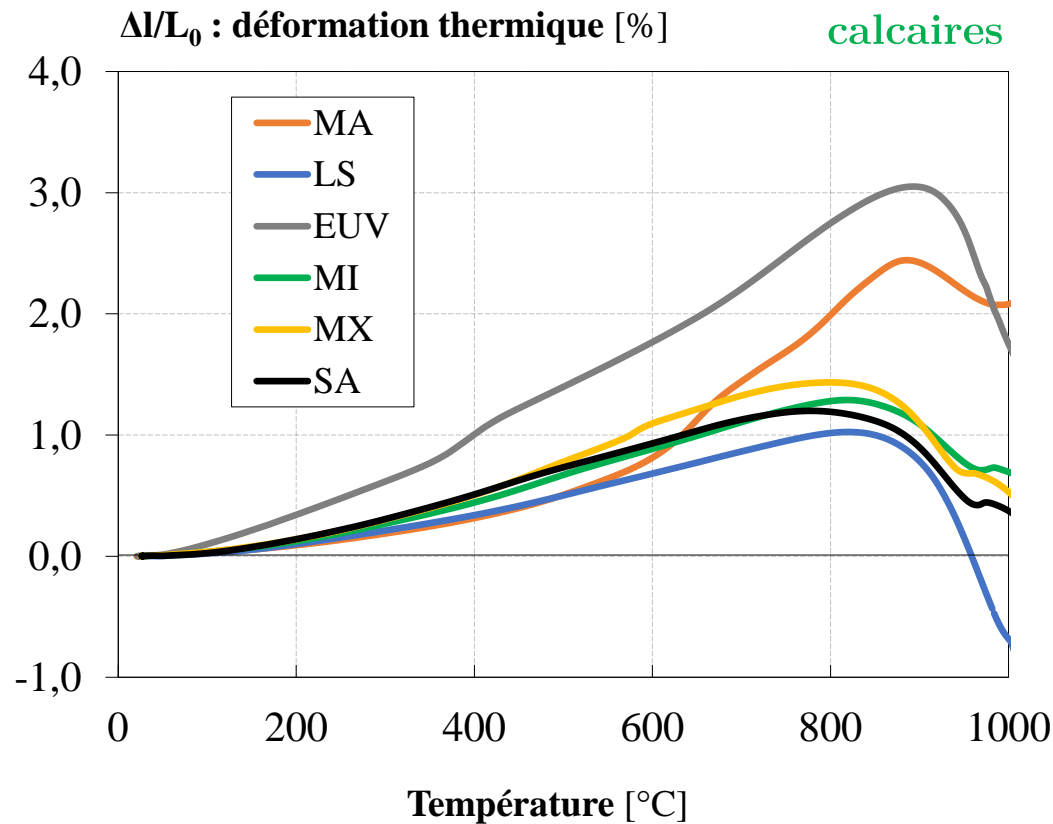
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales \rightarrow incompatibilité de déformation



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

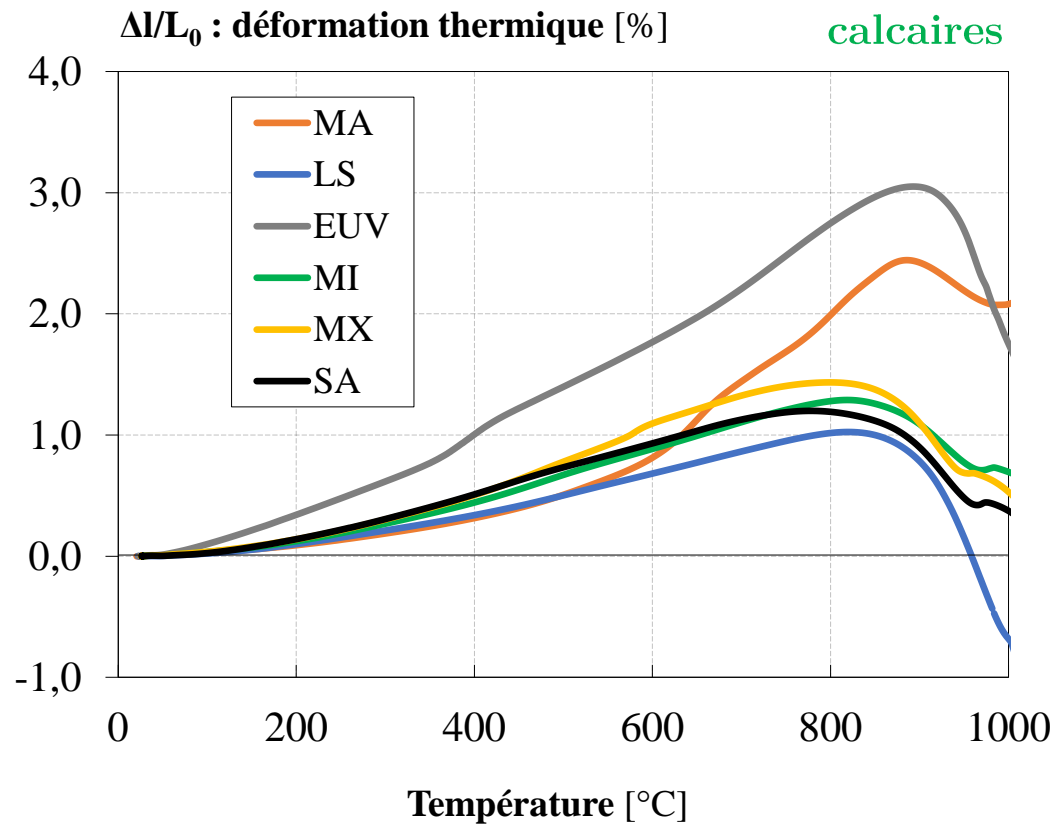
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales \rightarrow incompatibilité de déformation



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

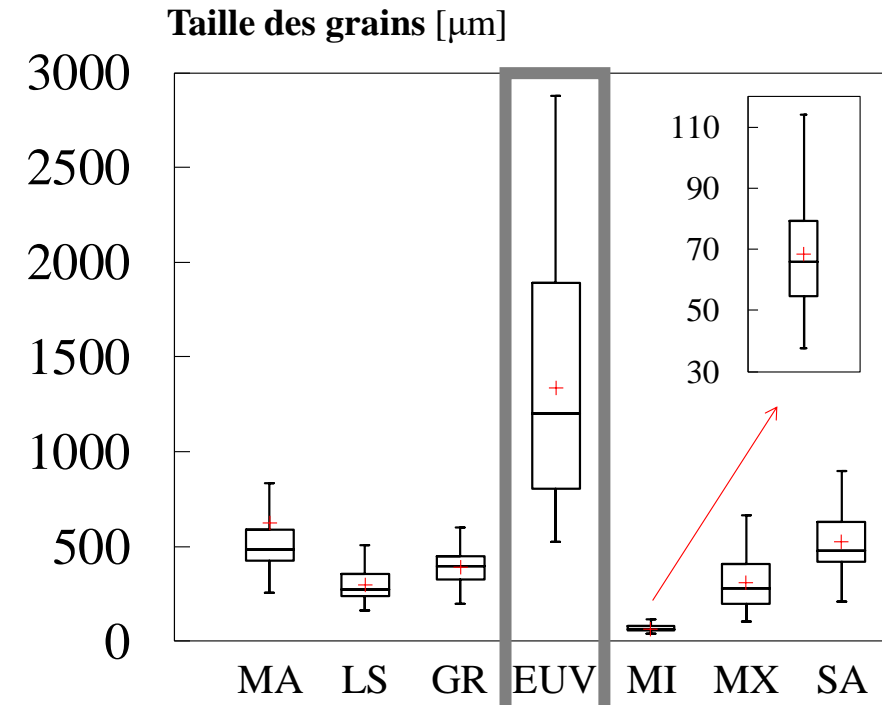
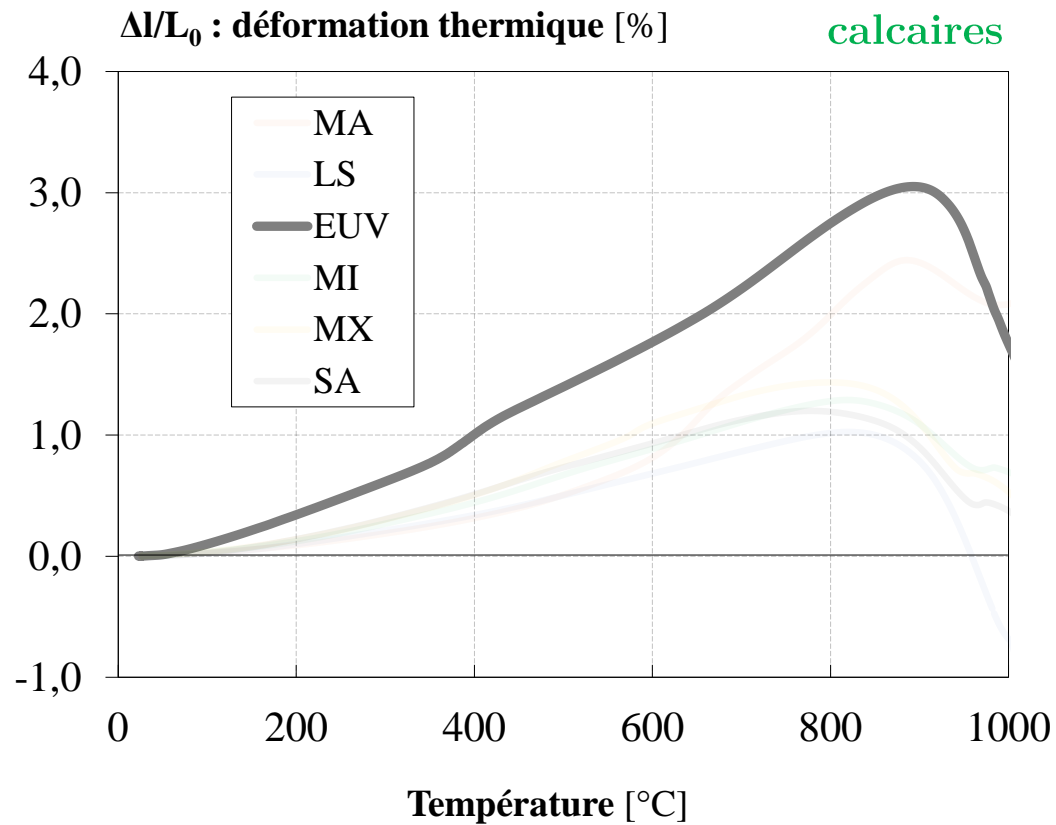
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

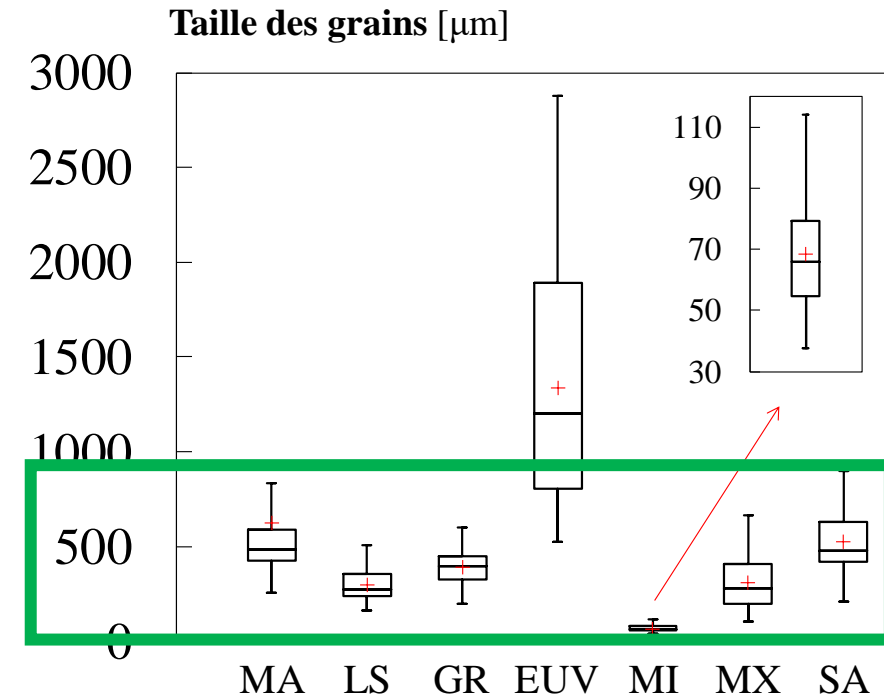
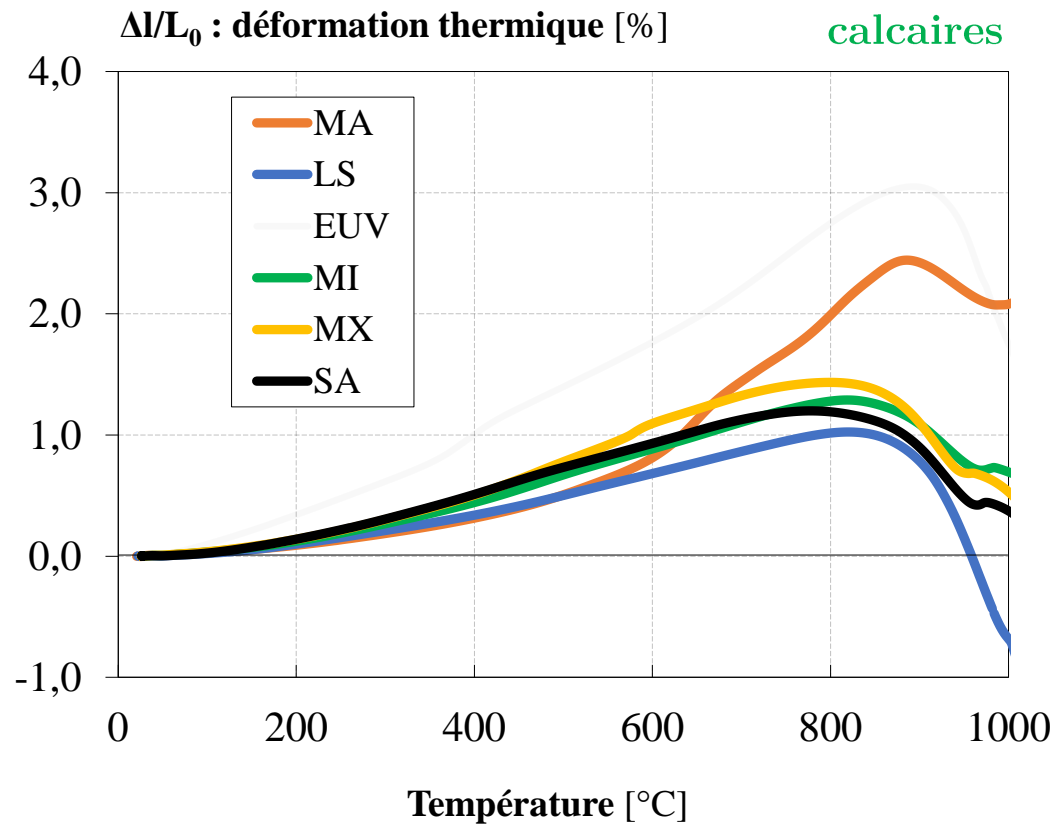
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

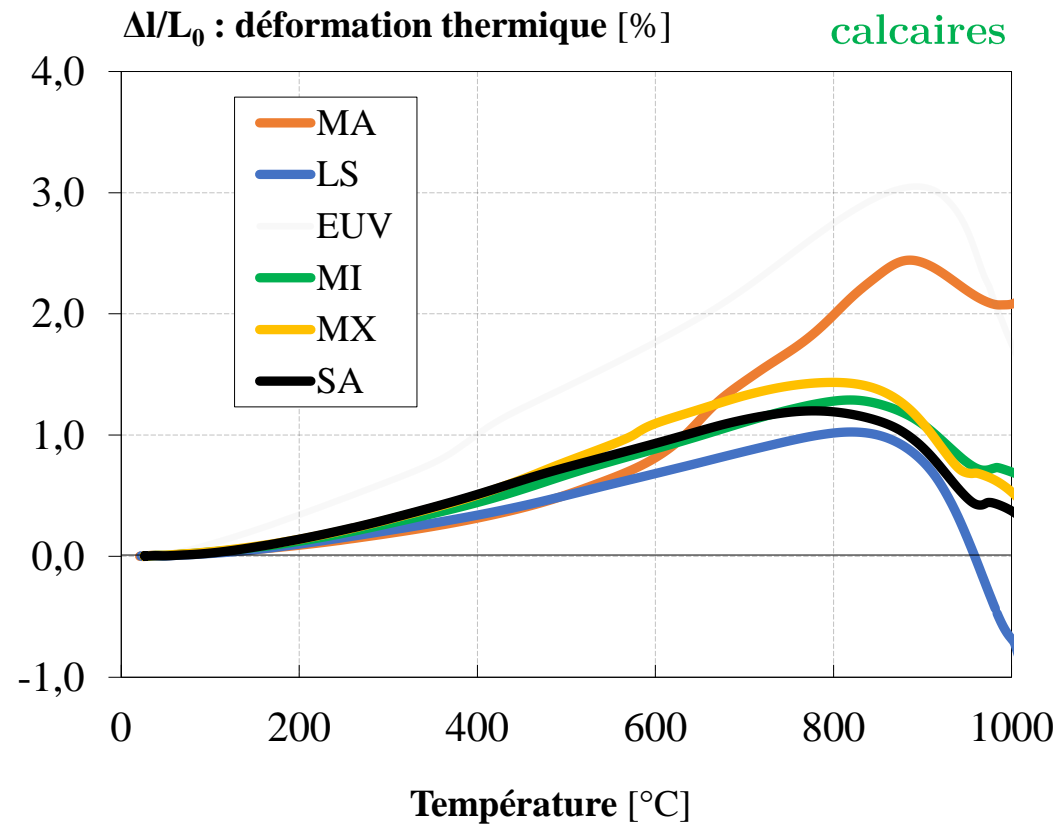
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales \rightarrow incompatibilité de déformation

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

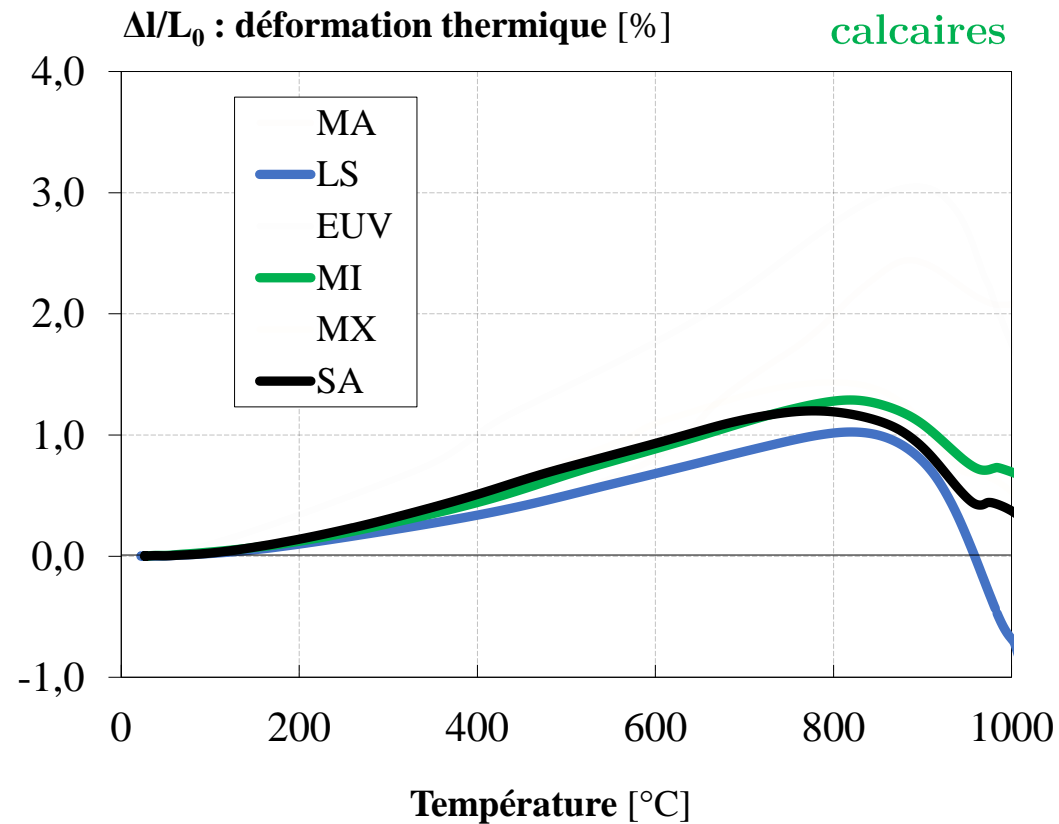
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales \rightarrow incompatibilité de déformation



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

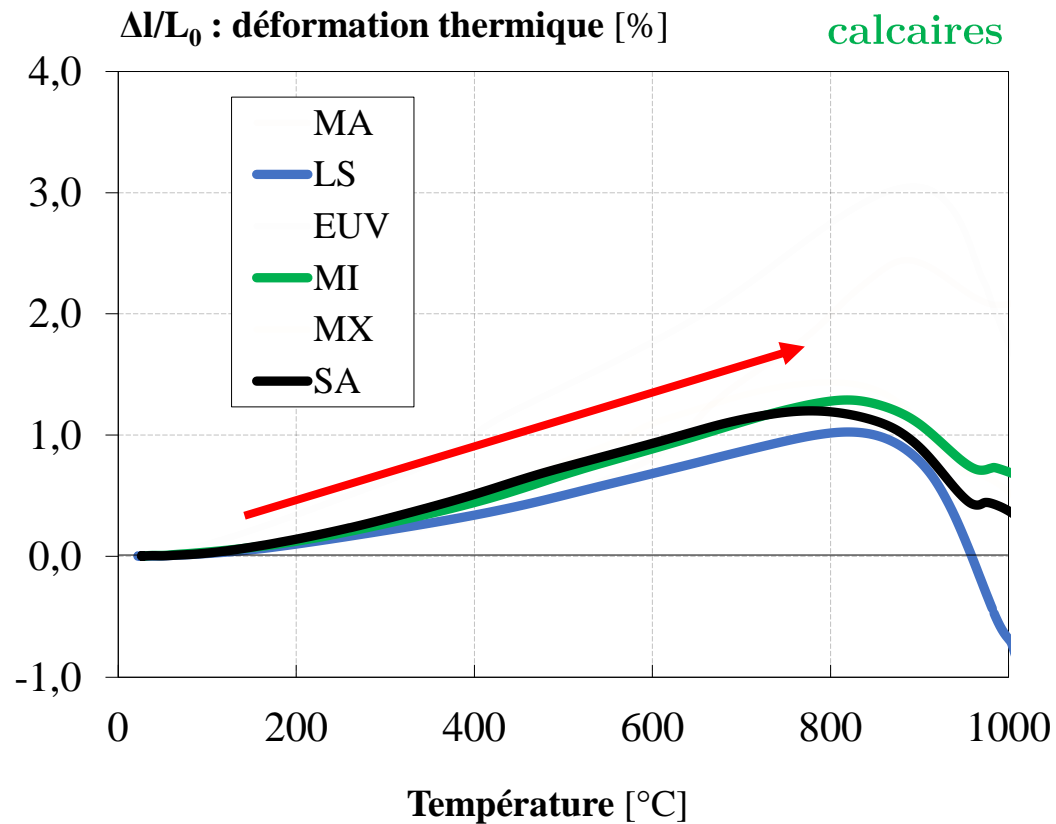
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales \rightarrow incompatibilité de déformation



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

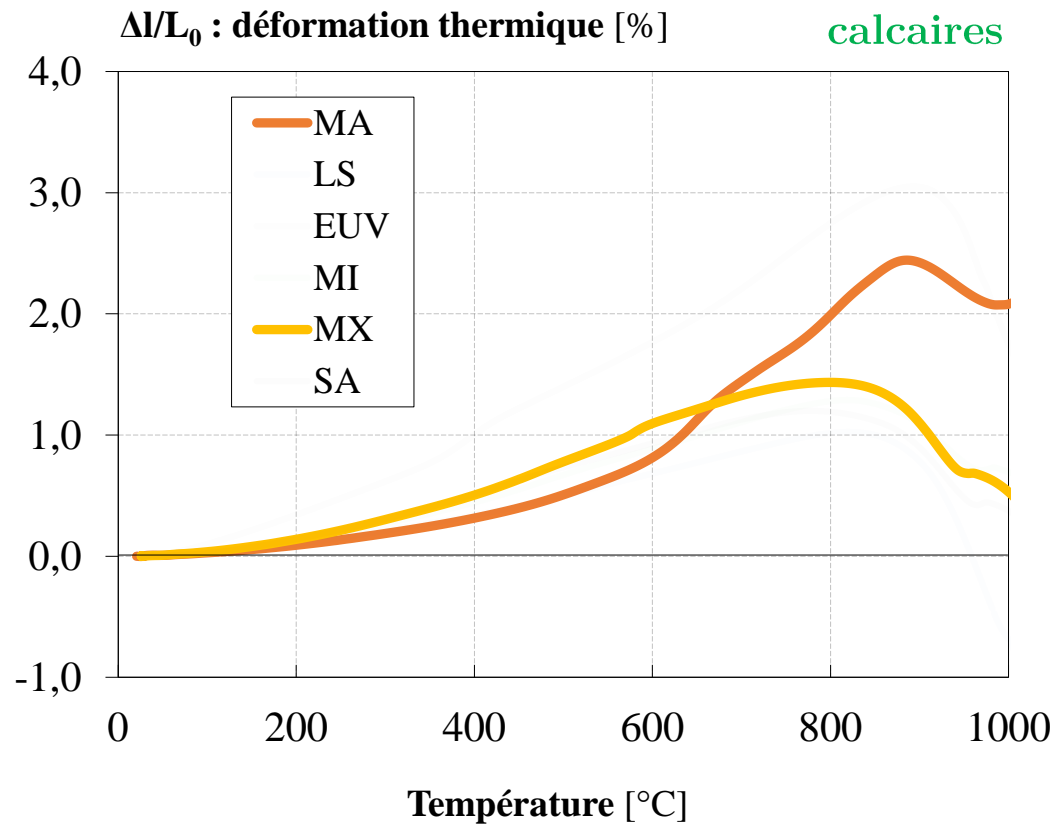
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales → incompatibilité de déformation



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

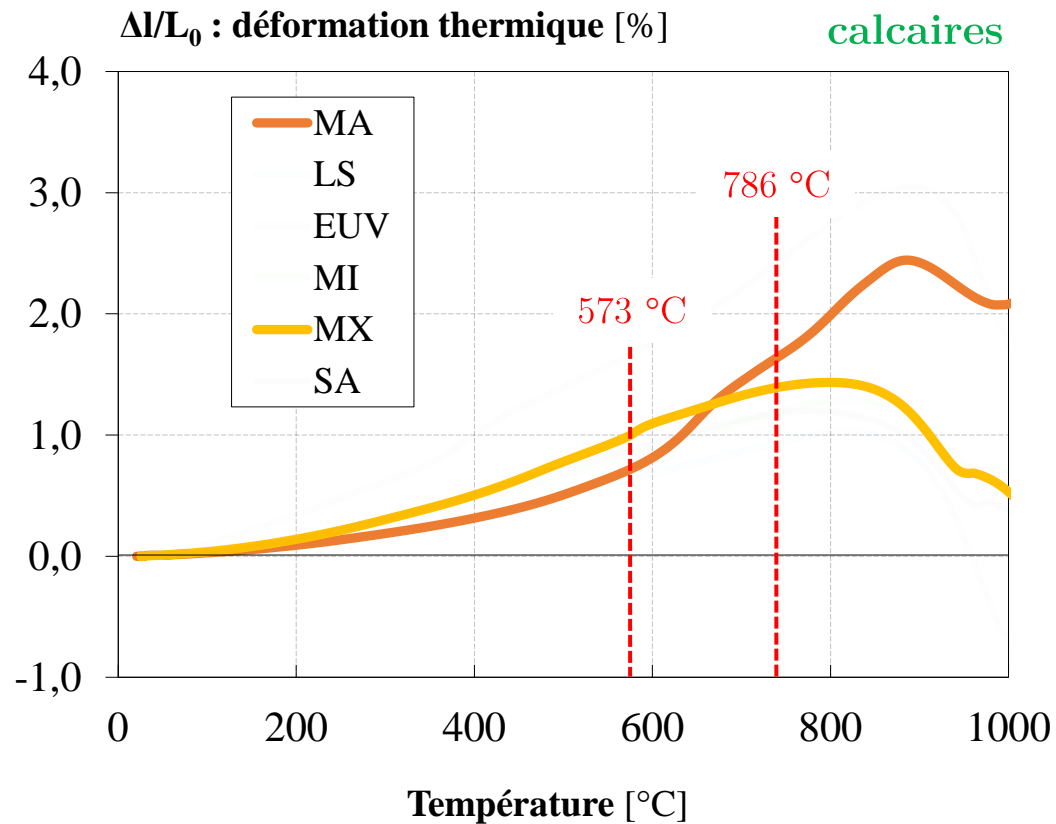
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Dilatométrie

Influence de la composition minéralogique, texture :



- Changement de phase du **quartz** :



- Décarbonatation de la **calcite** :



- Influence de la texture, taille des grains

- Influence de la nature minéralogique :

Mono - ou poly-minérales → incompatibilité de déformation

Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

~~Simulation numérique~~

Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

❑ Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

transformations
thermo-chimique

changement de couleur

T (°C)



ex : pierre calcaire MX

Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

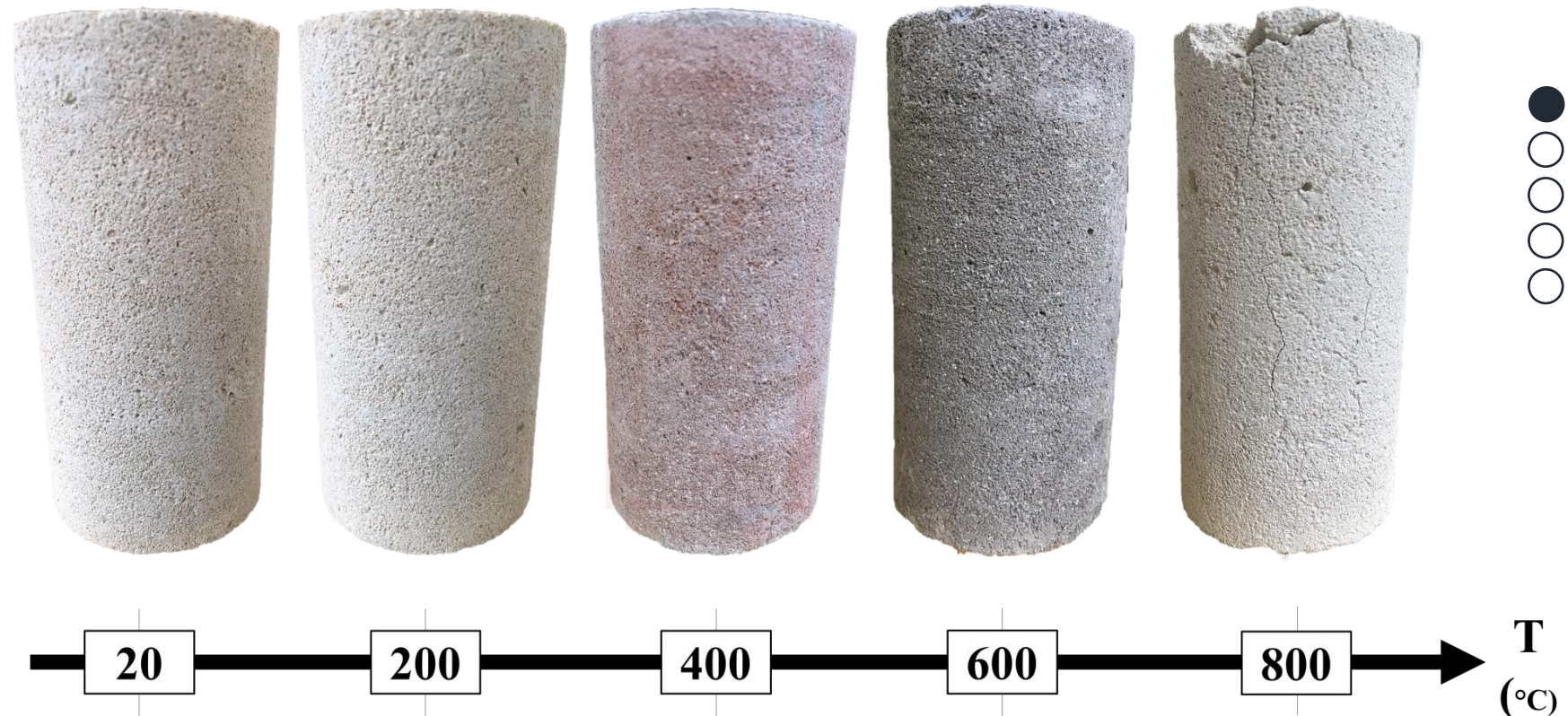
Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

transformations
thermo-chimique

changement de couleur

T (°C)



ex : pierre calcaire MX

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

❑ Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

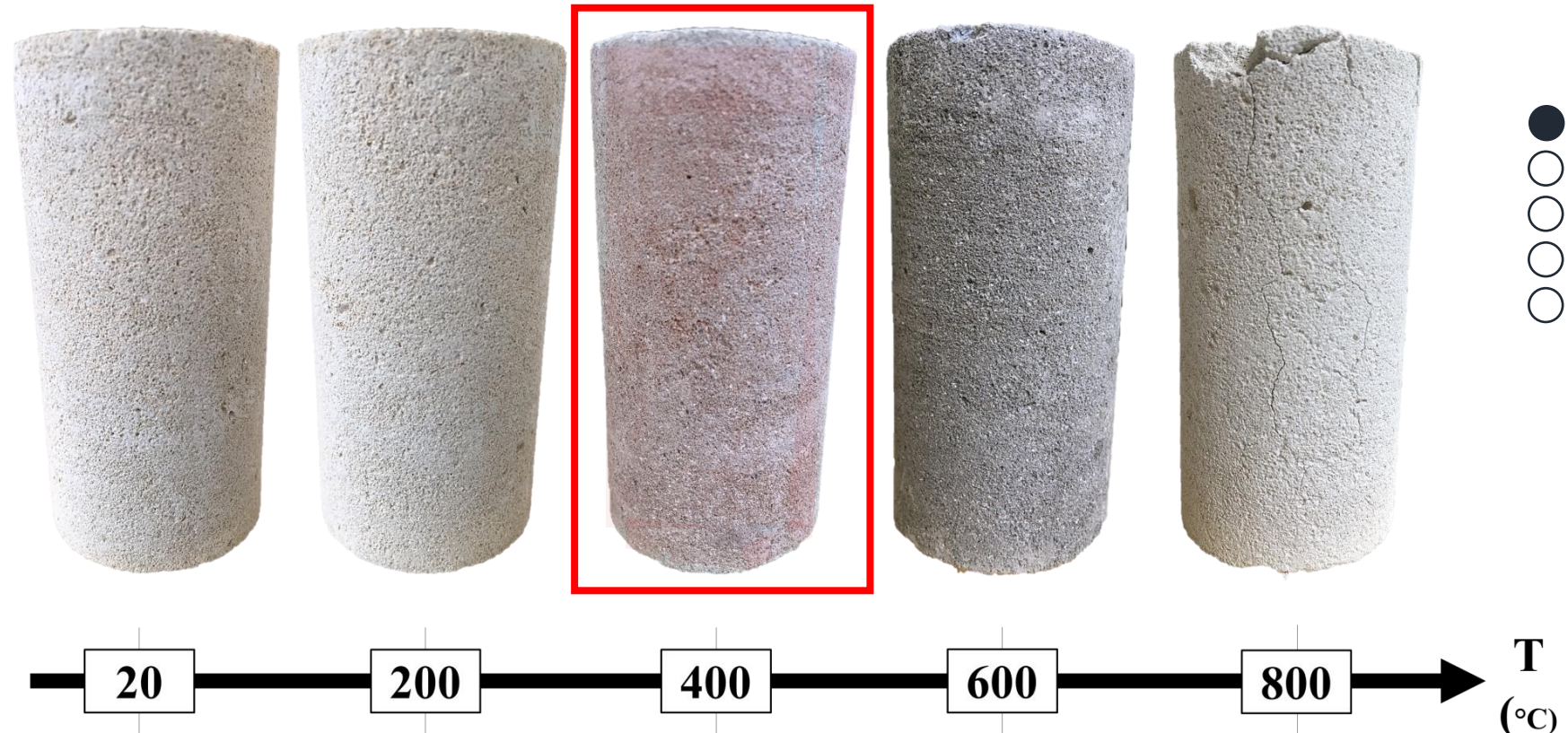
Couleur brune

(rubéfaction)

Déshydratation de la
goethite, pour former de
l'hématite :



(dès 250-300 °C)

*ex : pierre calcaire MX*

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

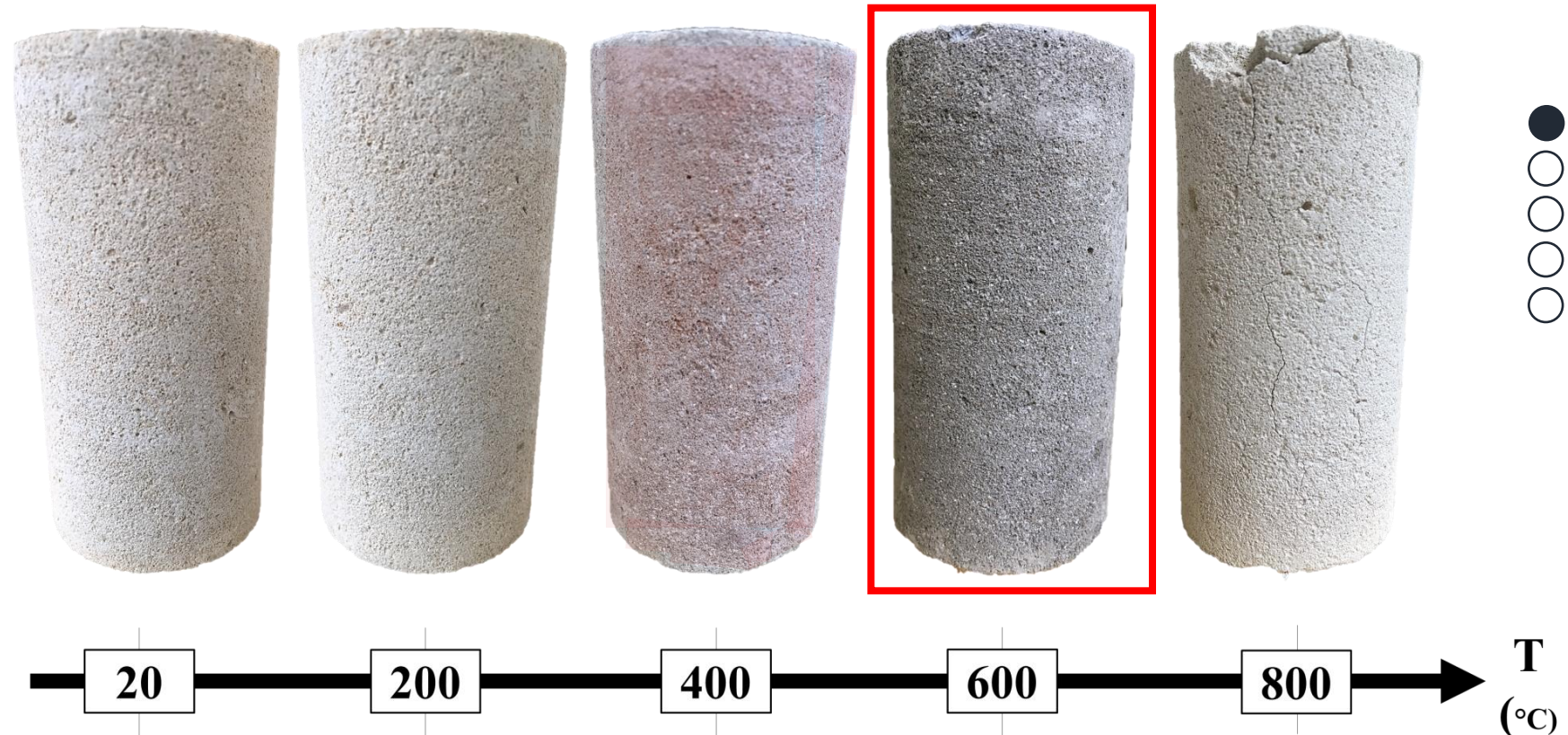
❑ Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

Couleur noireAssombrissement généralisé
couramment observé

[Ozguven & Ozcelik, 2014]

(600-700 °C)

*ex : pierre calcaire MX*

Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

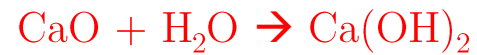
Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

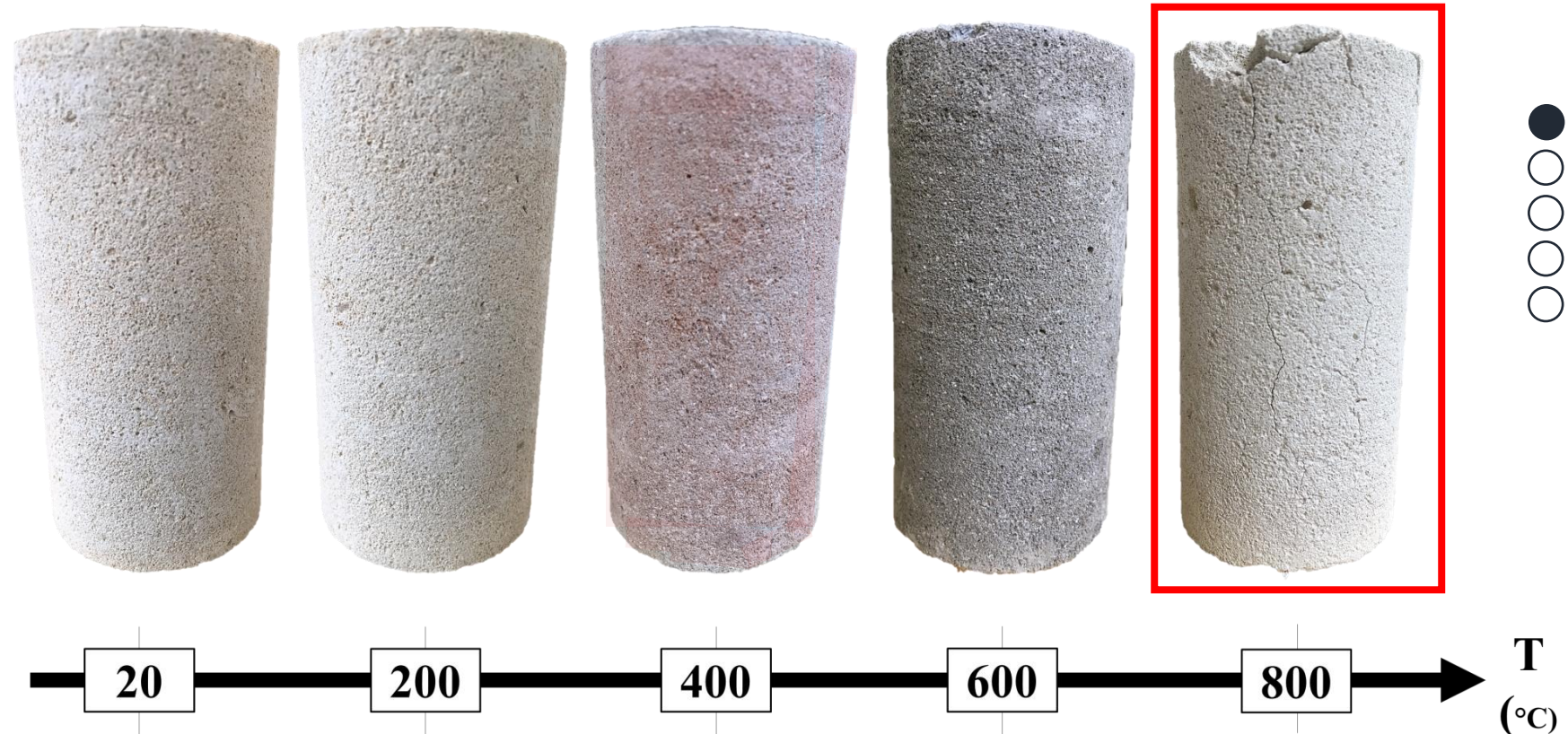
❑ Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

Couleur blanche

Réhydratation de la chaux
au contact de l'air, pour
former de la portlandite :

(dès 700-750 °C)

ex : pierre calcaire MX

Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

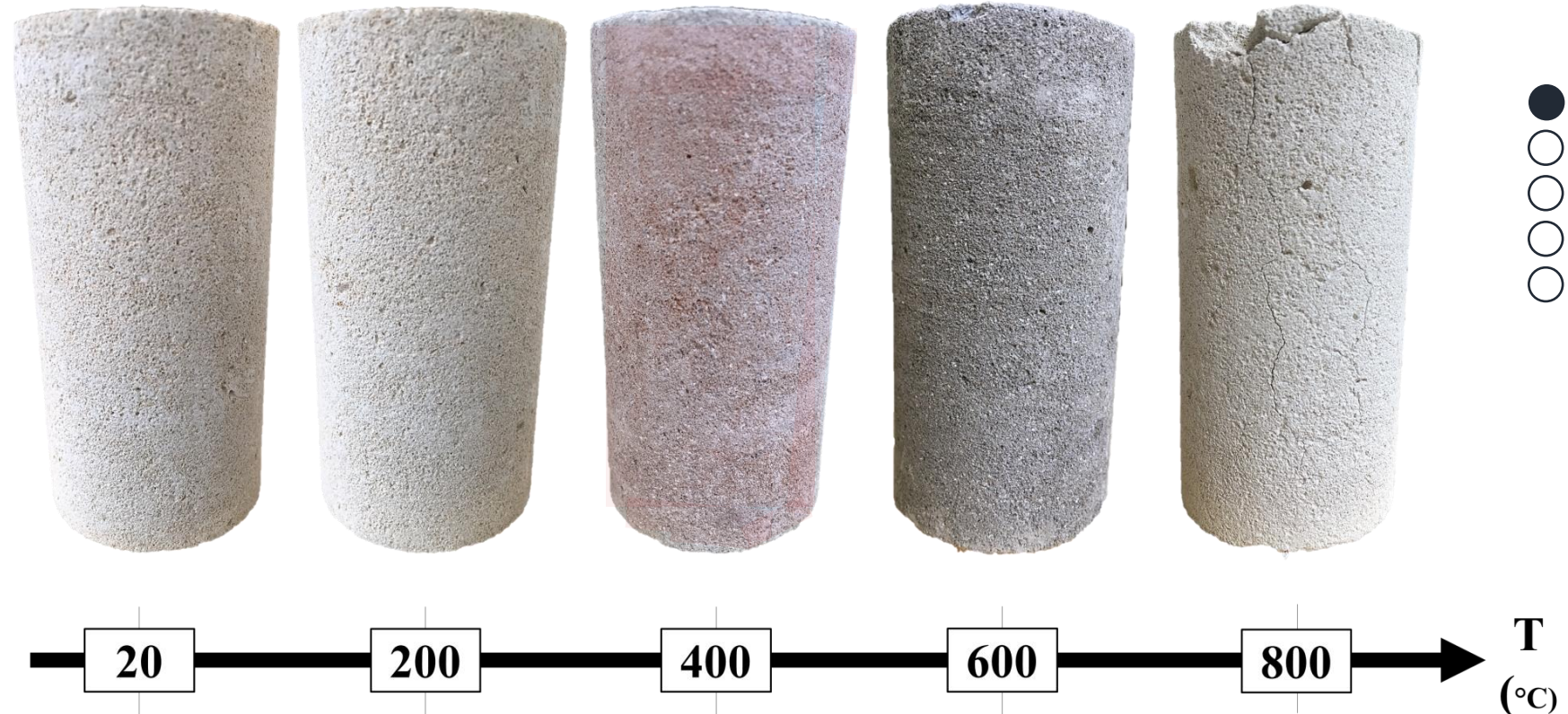
 Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :



Colorimètre :
appareil de mesure

ex : pierre calcaire MX



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

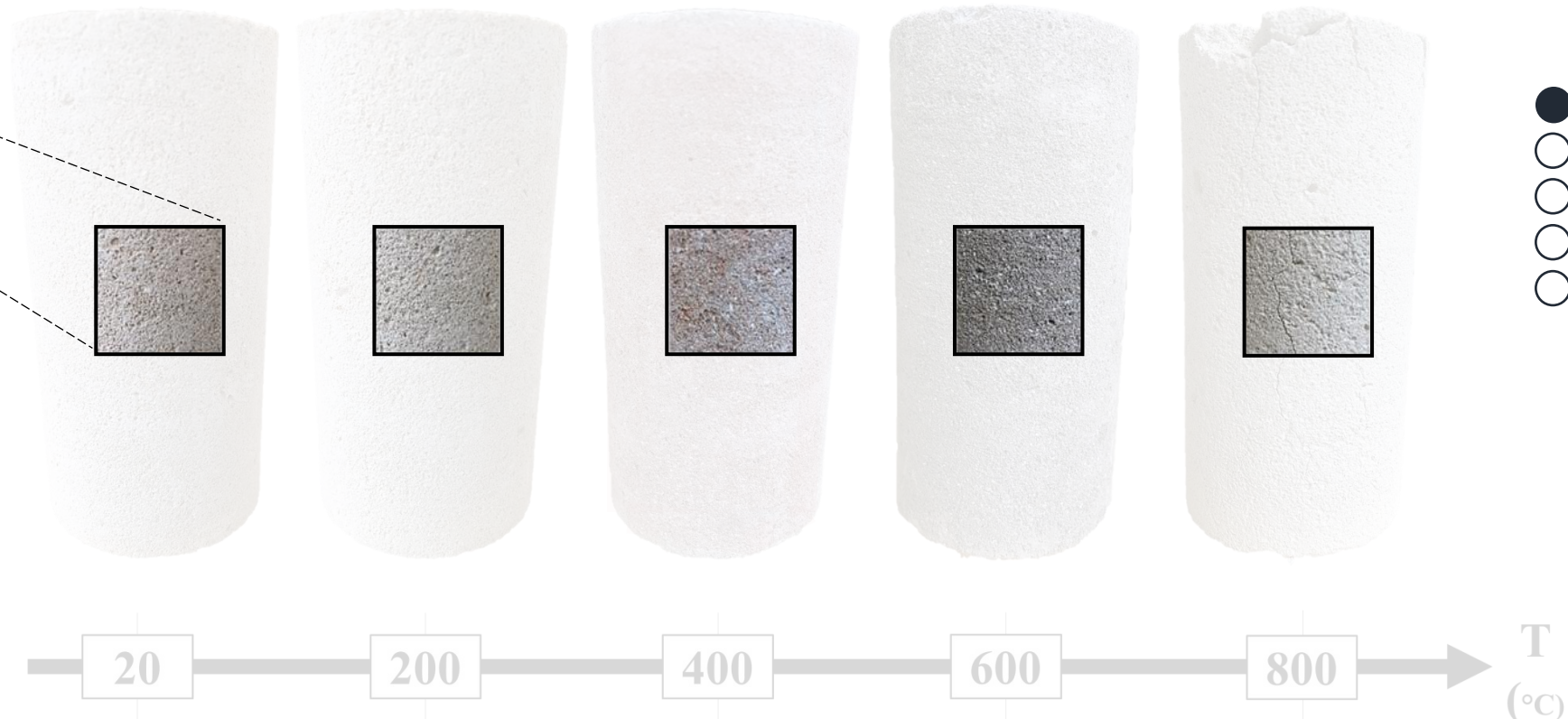
 Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :



Colorimètre :
appareil de mesure

ex : pierre calcaire MX



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

□ Colorimétrie

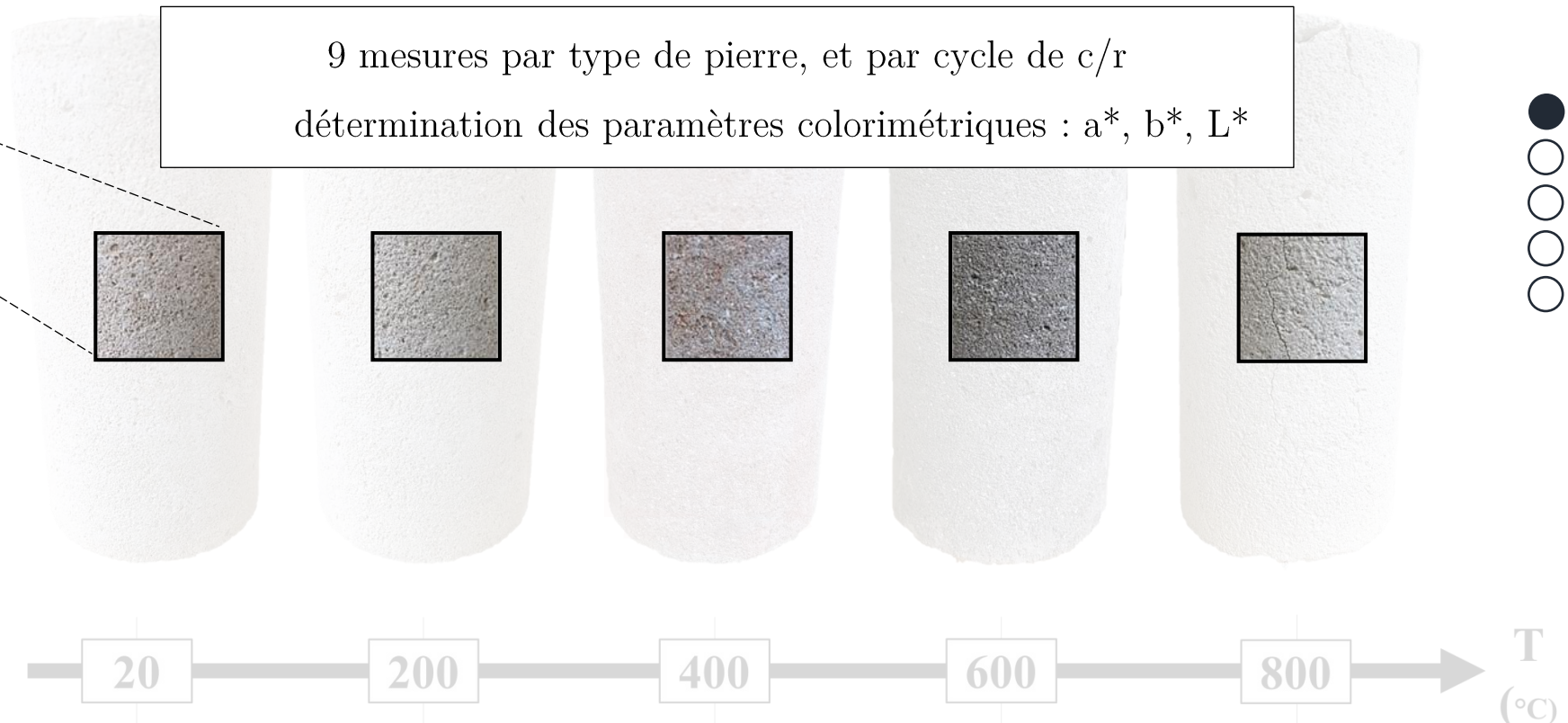
Influence de la composition minéralogique :

9 mesures par type de pierre, et par cycle de c/r
détermination des paramètres colorimétriques : a^* , b^* , L^*



Colorimètre :
appareil de mesure

ex : pierre calcaire MX



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

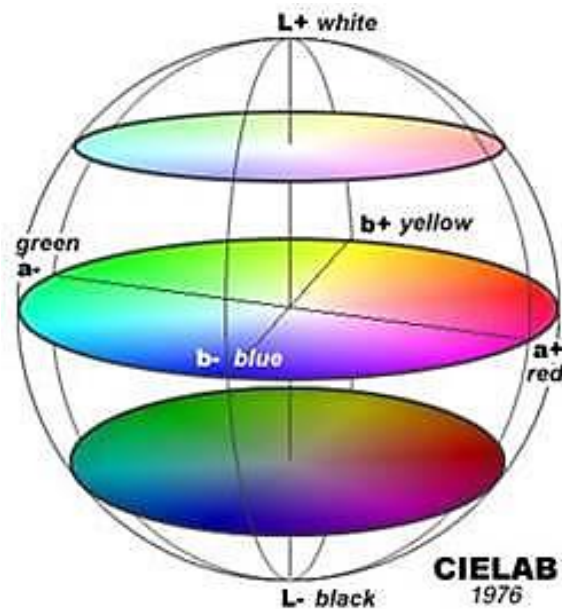
Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

Observations communes à l'ensemble des calcaires



Représentation 3D de la couleur

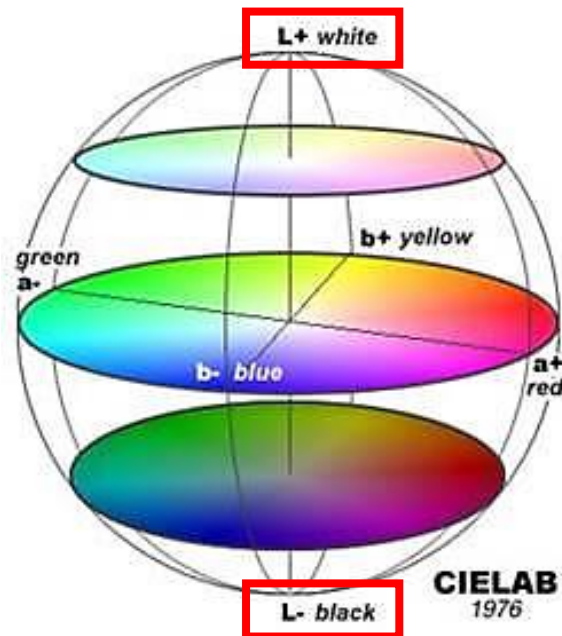


Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

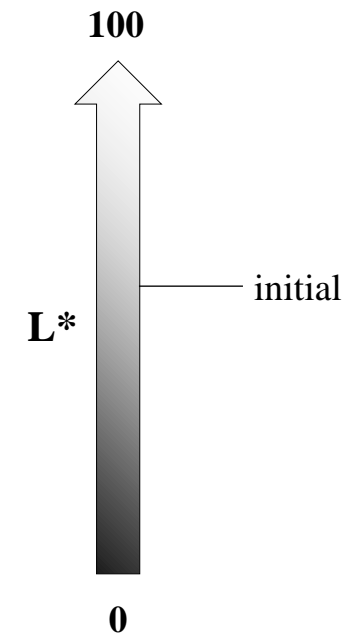
Simulation numérique

 Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :



Représentation 3D de la couleur

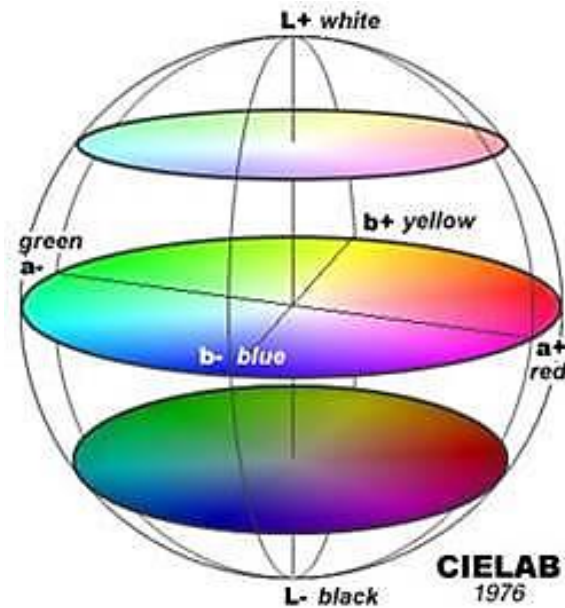
Observations communes à l'ensemble des calcaires **L***

Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

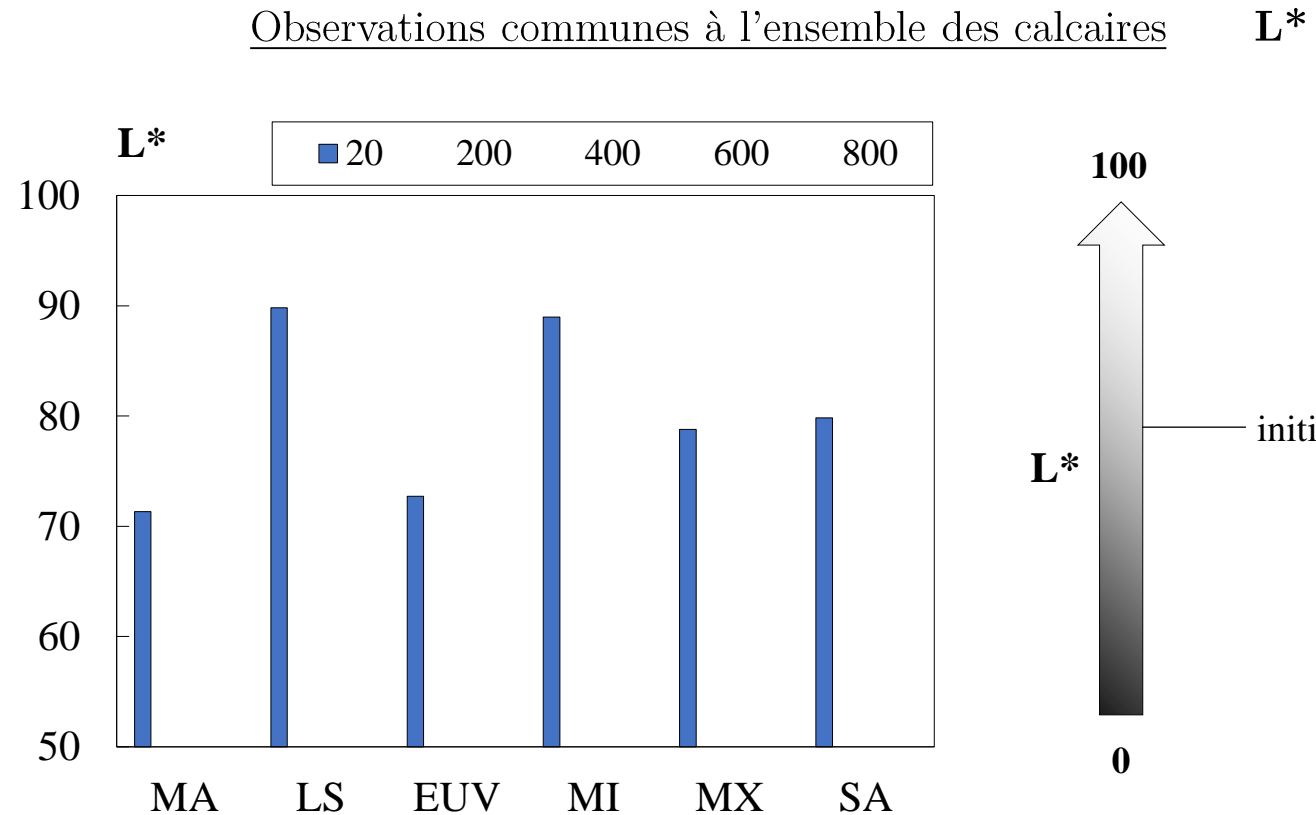
Simulation numérique

 Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :



Représentation 3D de la couleur



Comportement à haute température des pierres de construction 

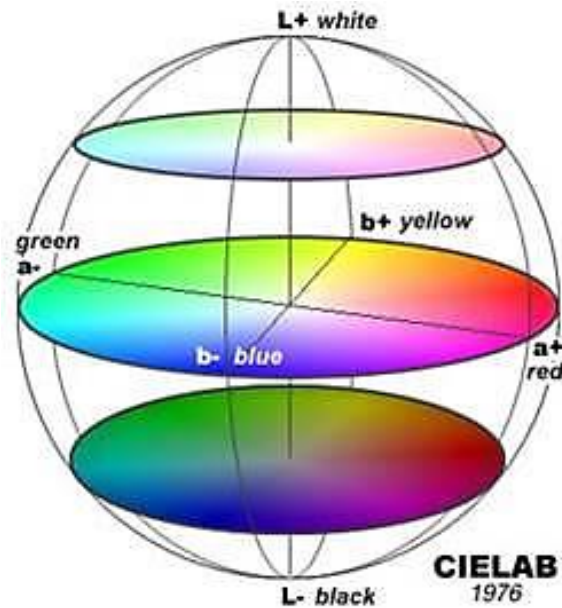
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

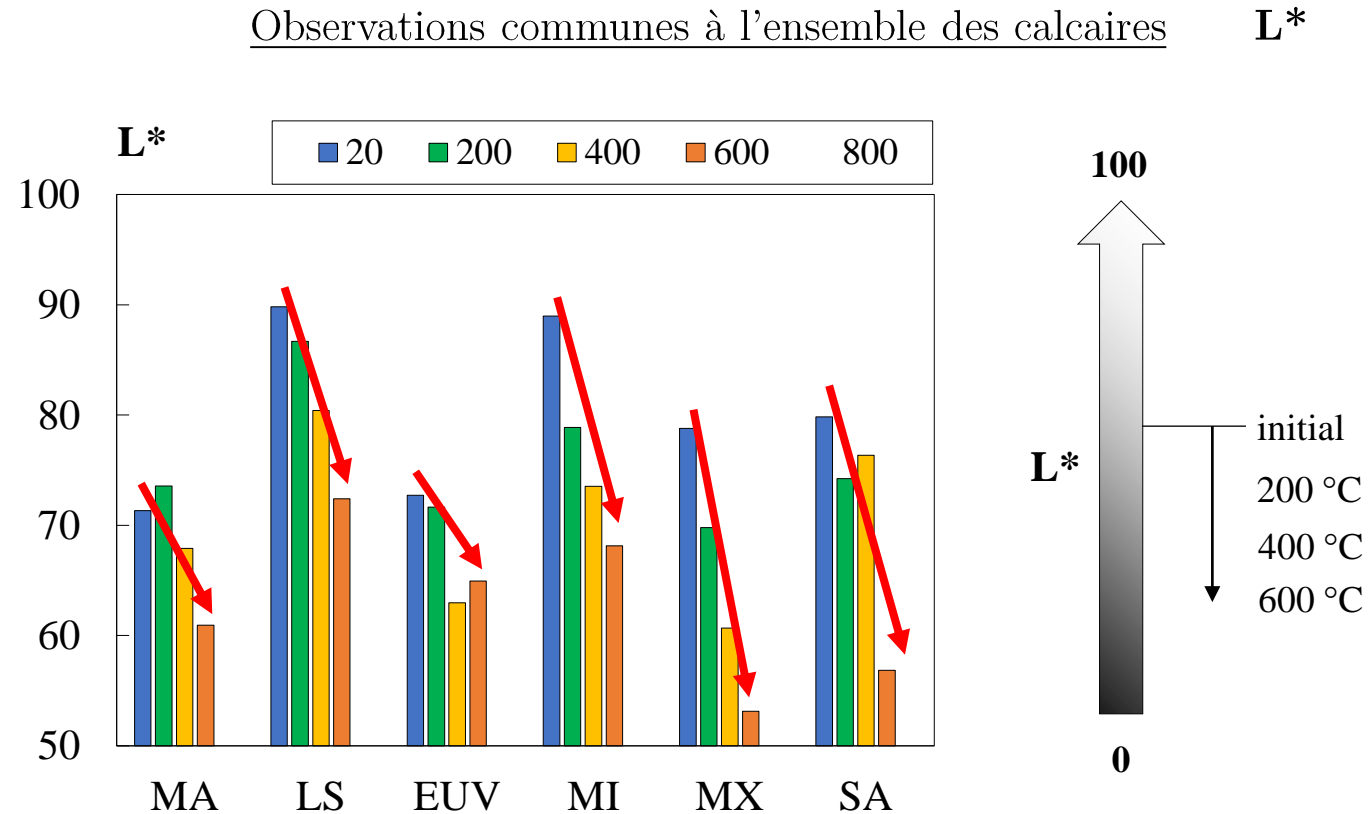
Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :



Représentation 3D de la couleur



Comportement à haute température des pierres de construction 

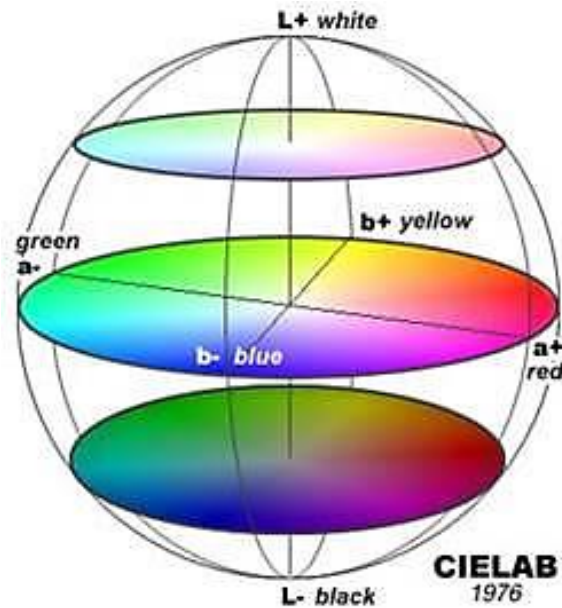
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

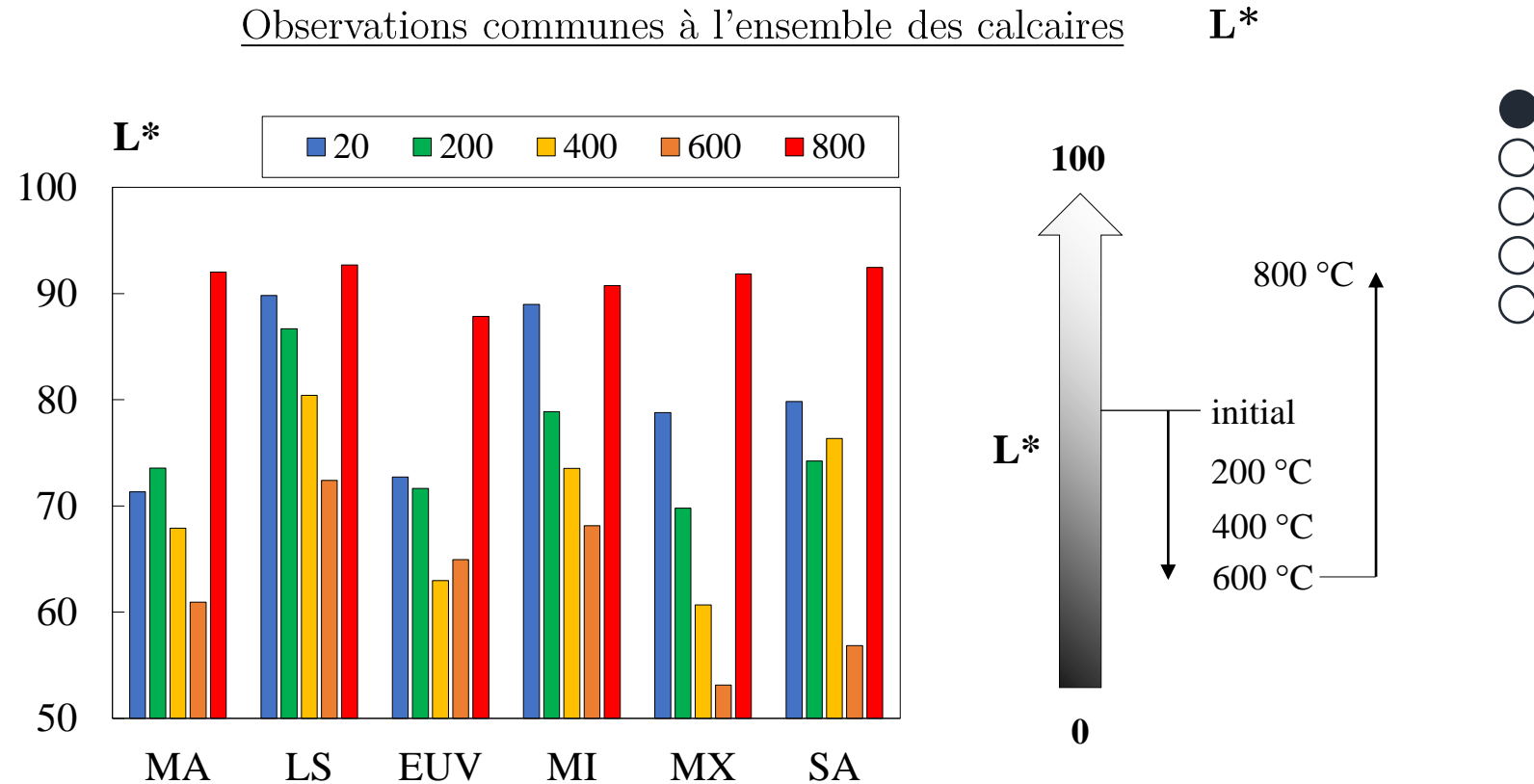
Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :



Représentation 3D de la couleur



Comportement à haute température des pierres de construction 

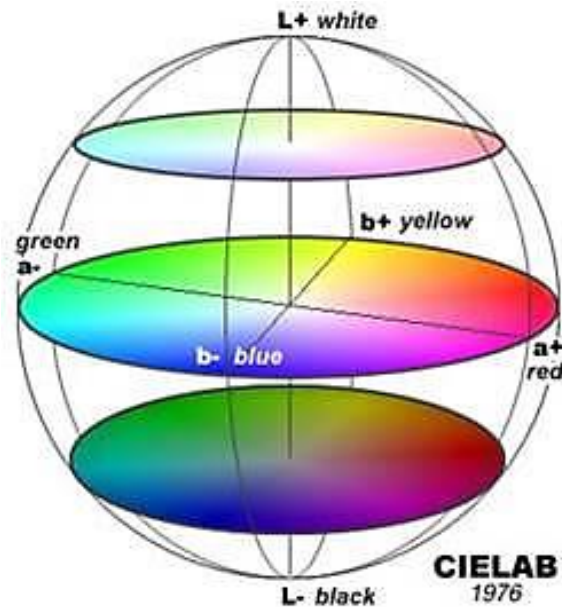
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

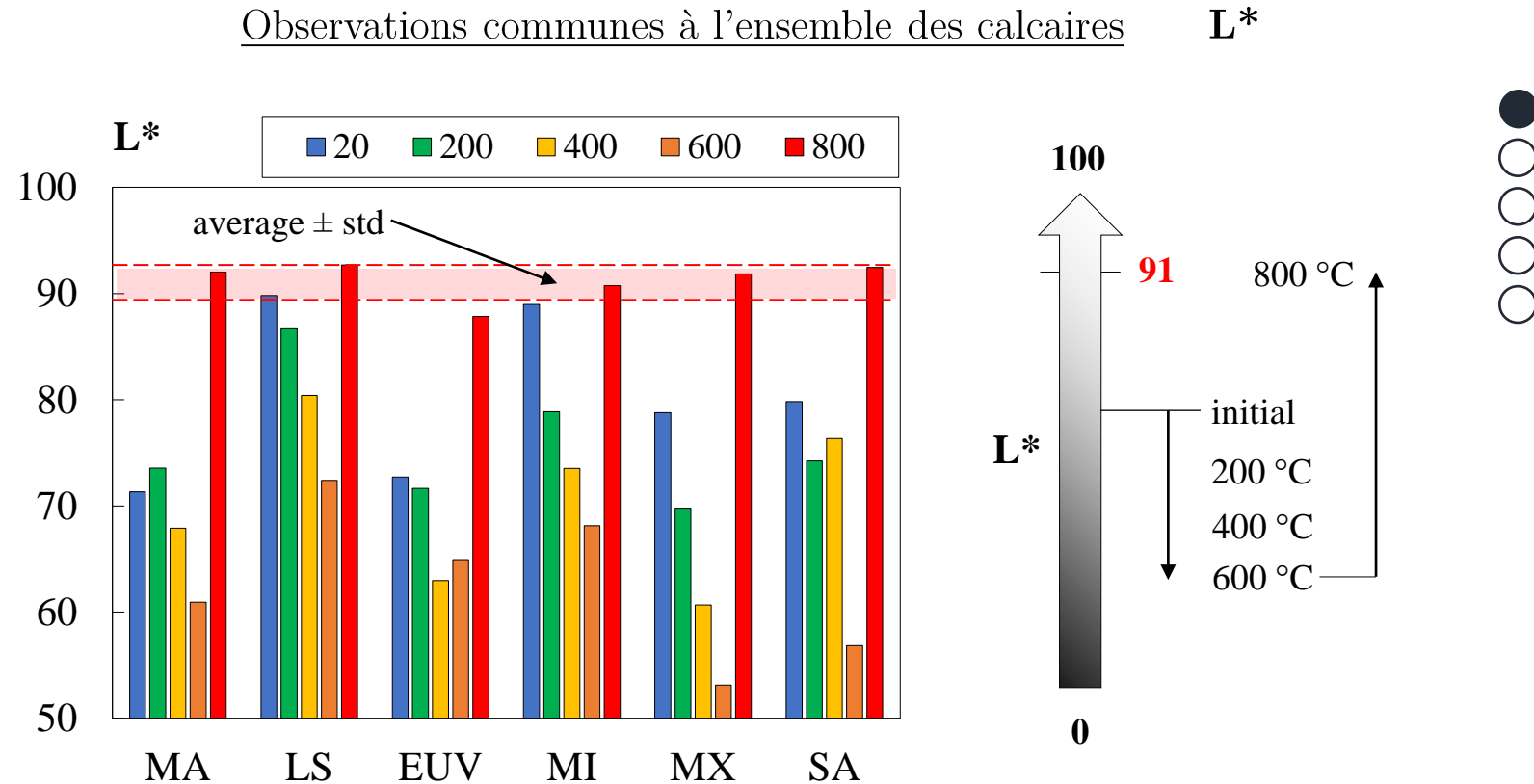
Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :



Représentation 3D de la couleur



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux à *chaud*

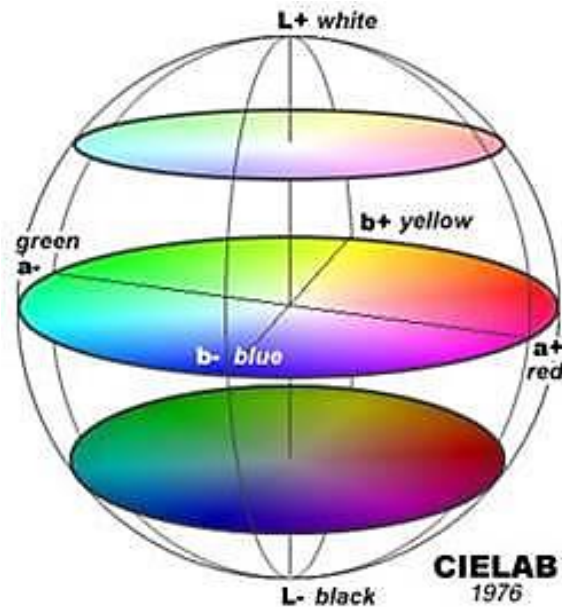
Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

Observations communes à l'ensemble des calcaires



Représentation 3D de la couleur



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

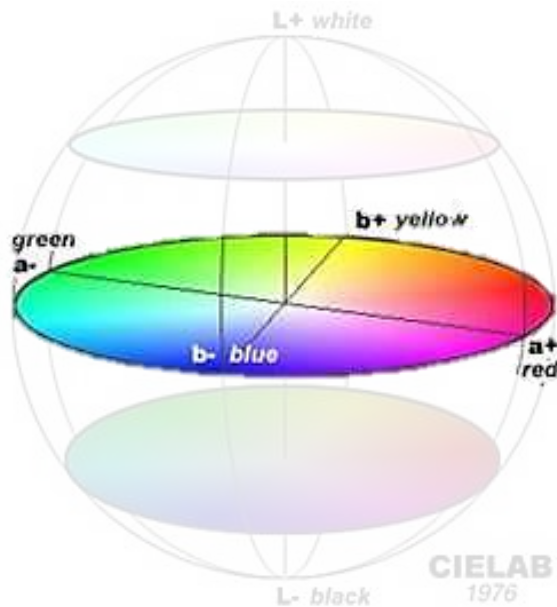
Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

Observations communes à l'ensemble des calcaires

a^* b^*



Représentation 3D de la couleur



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

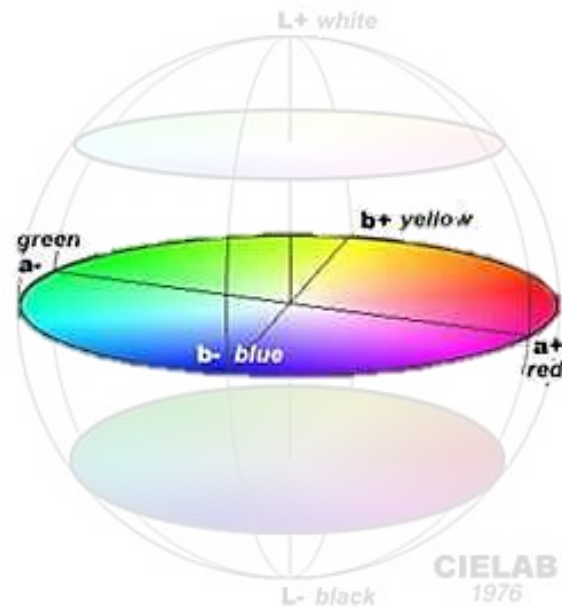
Simulation numérique

□ Colorimétrie

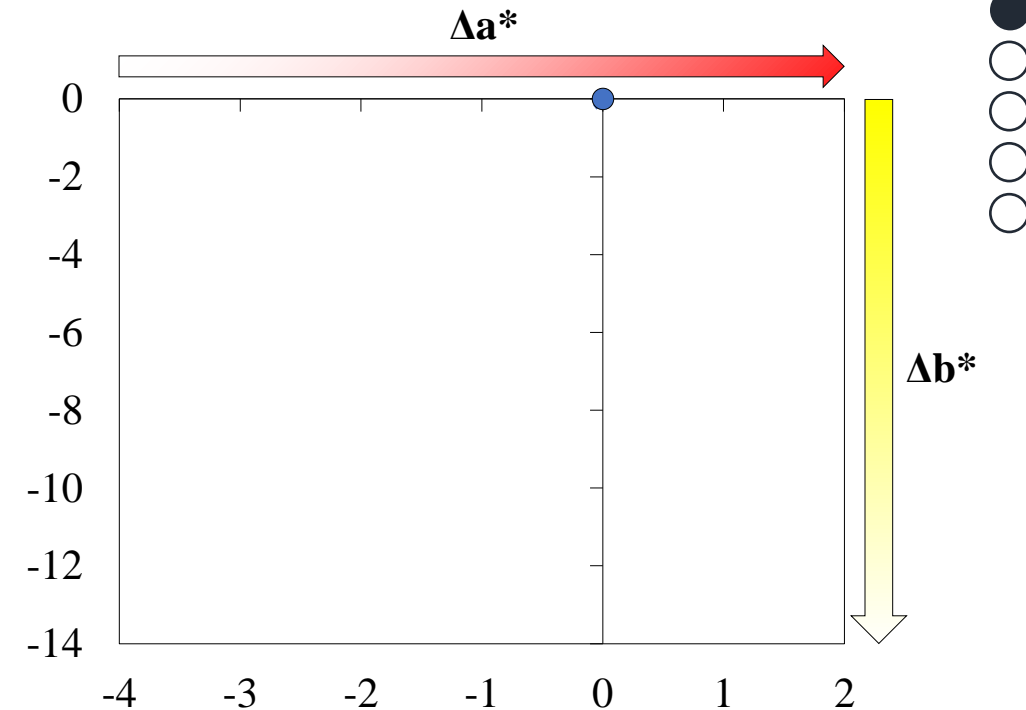
Influence de la composition minéralogique :

Observations communes à l'ensemble des calcaires a^* b^*

Δa^* et Δb^* :
différence avec la valeur
initiale à 20 °C



Représentation 3D de la couleur



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

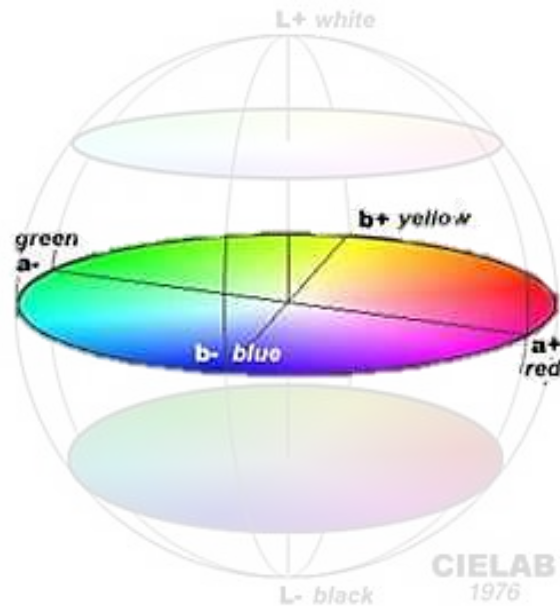
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Colorimétrie




Influence de la composition minéralogique :

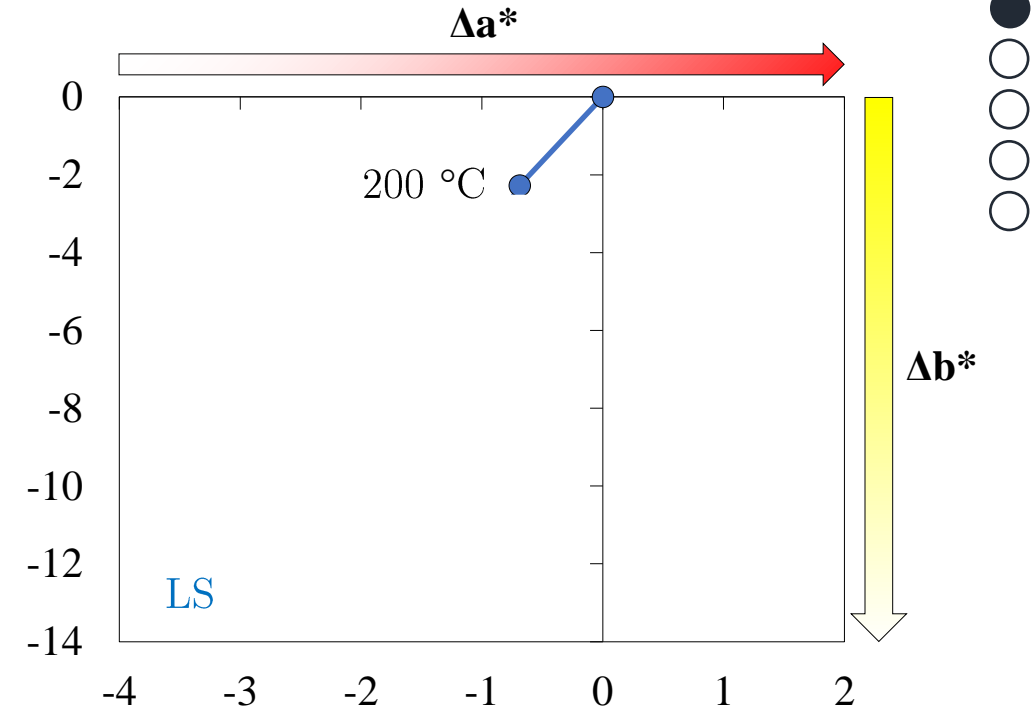
Observations communes à l'ensemble des calcaires

 a^* b^* 

Représentation 3D de la couleur

Δa^* et Δb^* :
différence avec la valeur
initiale à 20 °C

-  Δa^* et Δb^*
-  Δa^* à 400 °C
-  rubéfaction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

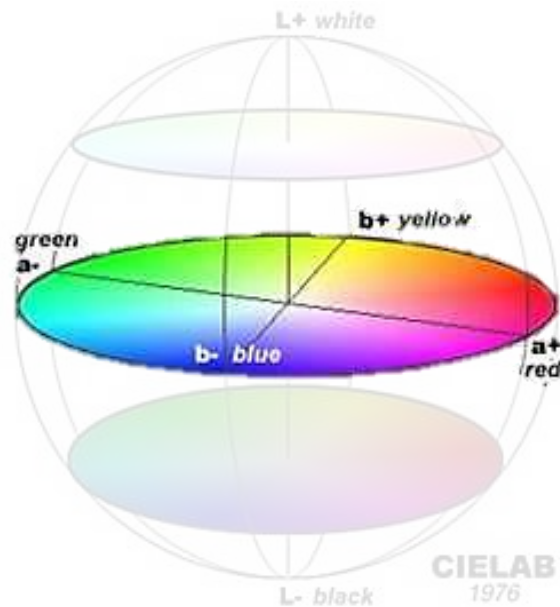
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Colorimétrie




Influence de la composition minéralogique :

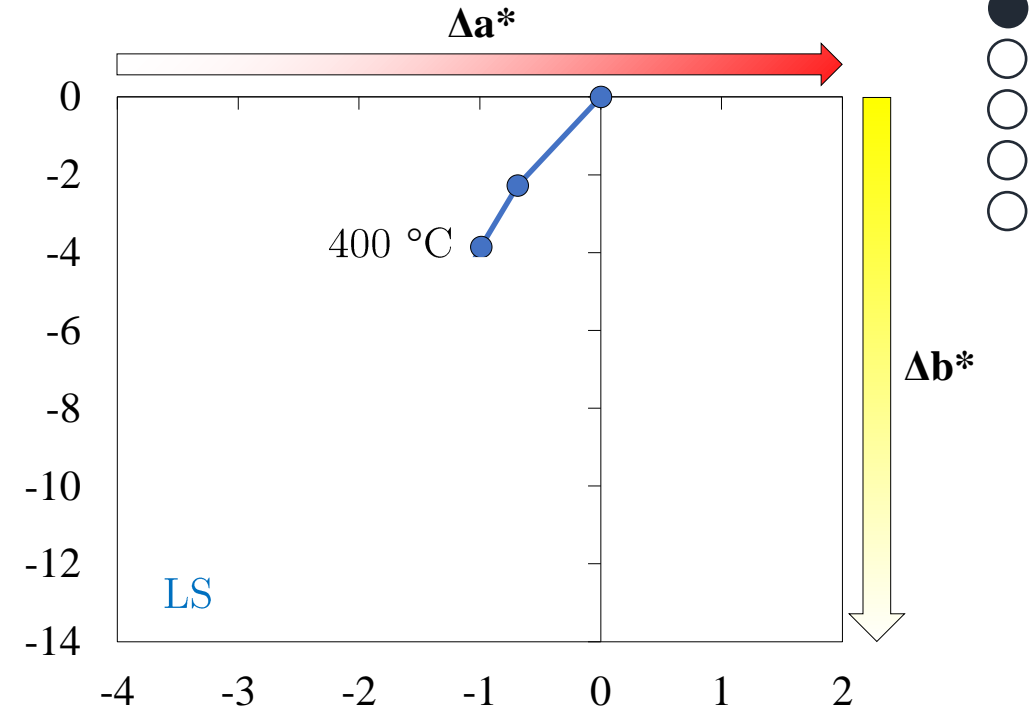
Observations communes à l'ensemble des calcaires

 a^* b^* 

Représentation 3D de la couleur

Δa^* et Δb^* :
différence avec la valeur
initiale à 20 °C

-  Δa^* et Δb^*
-  Δa^* à 400 °C
-  rubéfaction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

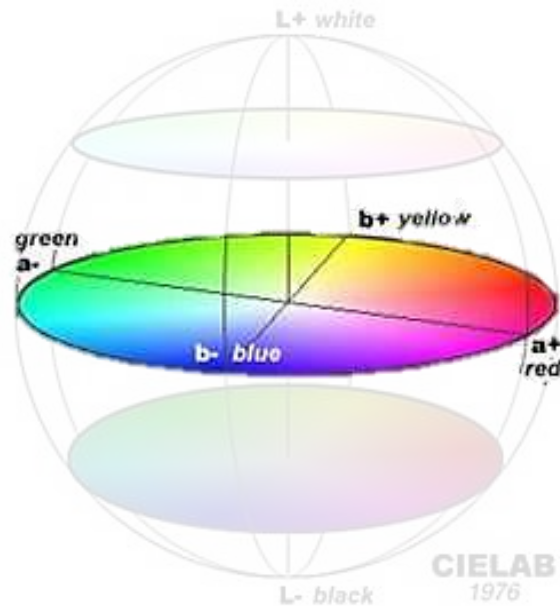
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

Observations communes à l'ensemble des calcaires

 a^* b^* 

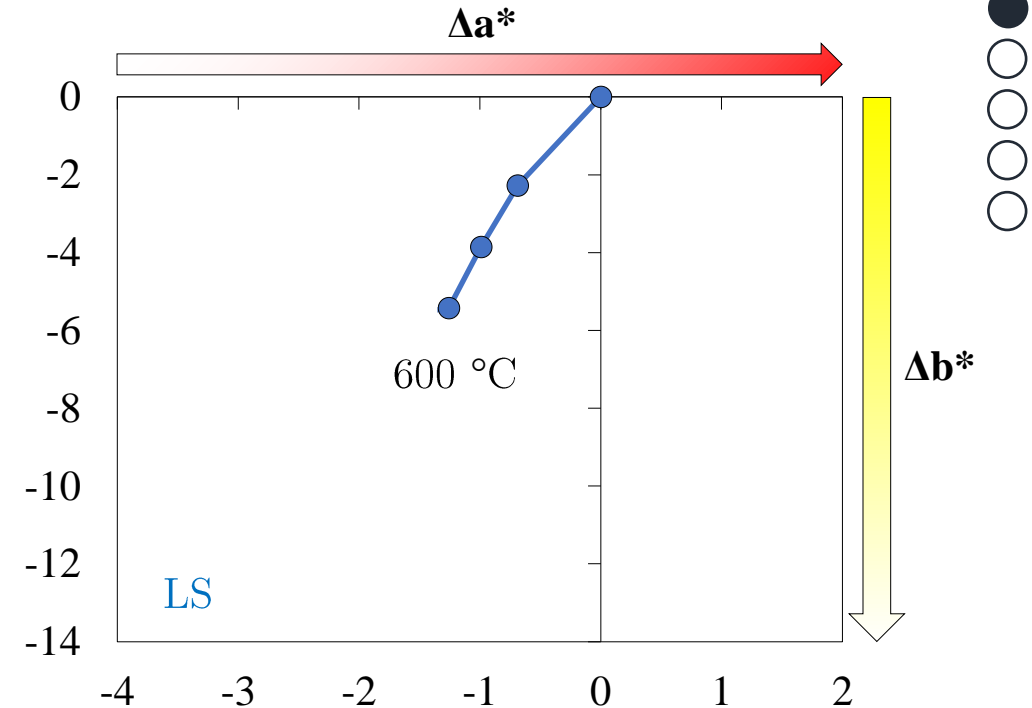
Représentation 3D de la couleur

Δa^* et Δb^* :
différence avec la valeur
initiale à 20 °C

■ Δa^* et Δb^*

■ Δa^* à 400 °C

→ rubéfaction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

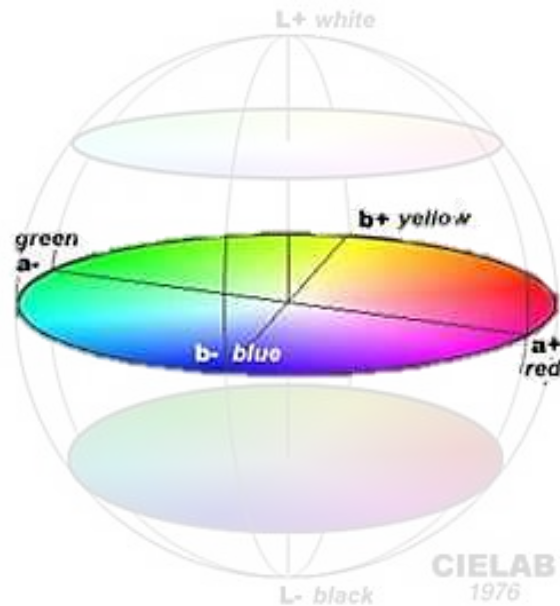
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

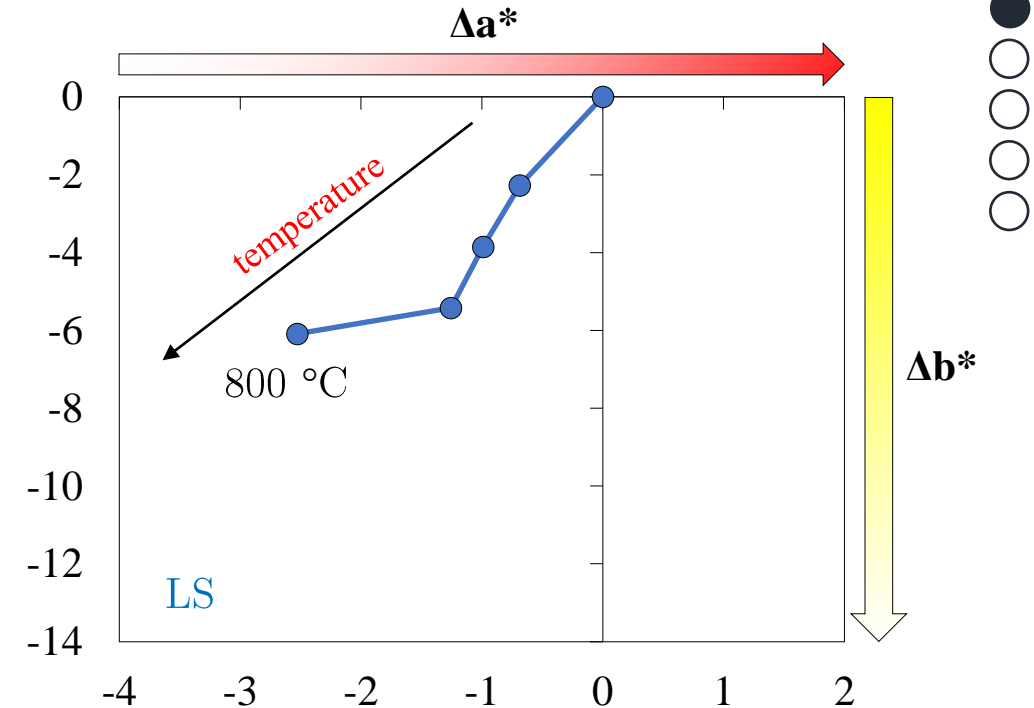
Observations communes à l'ensemble des calcaires

 a^* b^* 

Représentation 3D de la couleur

Δa^* et Δb^* :
différence avec la valeur
initiale à 20 °C

- Δa^* et Δb^*
- Δa^* à 400 °C
- rubéfaction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

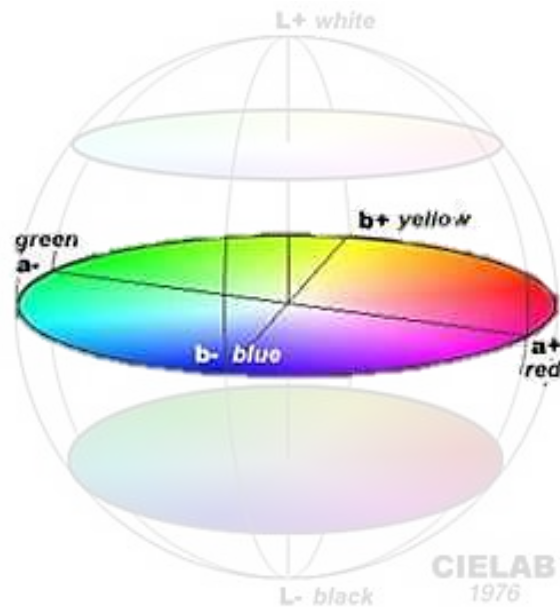
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

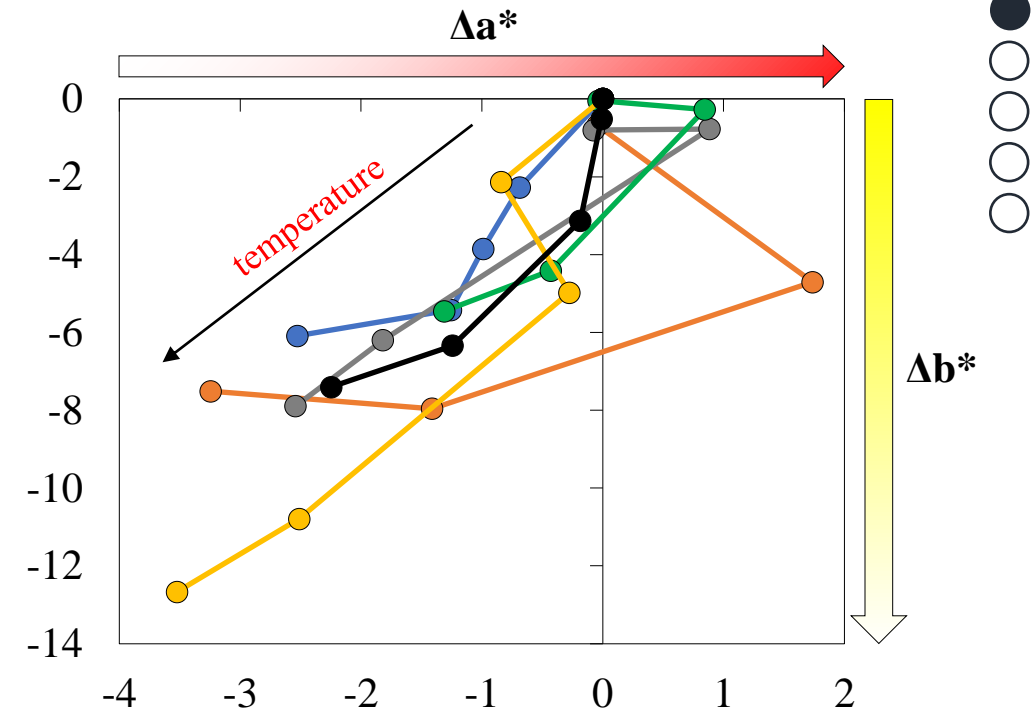
Observations communes à l'ensemble des calcaires

 a^* b^* 

Représentation 3D de la couleur

Δa^* et Δb^* :
différence avec la valeur
initiale à 20 °C

- Δa^* et Δb^*
- Δa^* à 400 °C
- rubéfaction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

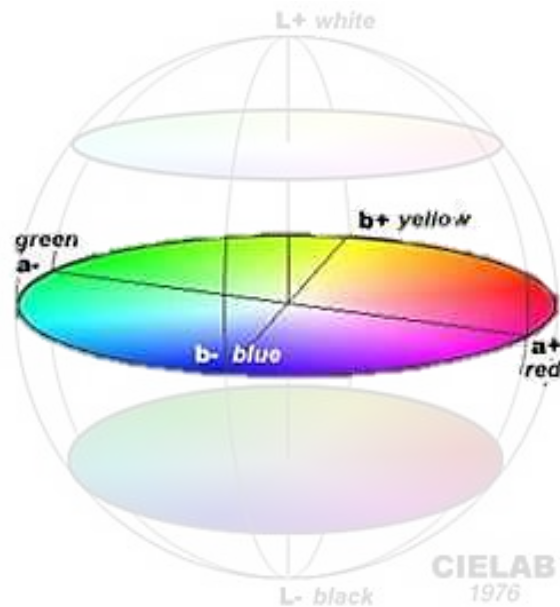
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Colorimétrie

Influence de la composition minéralogique :

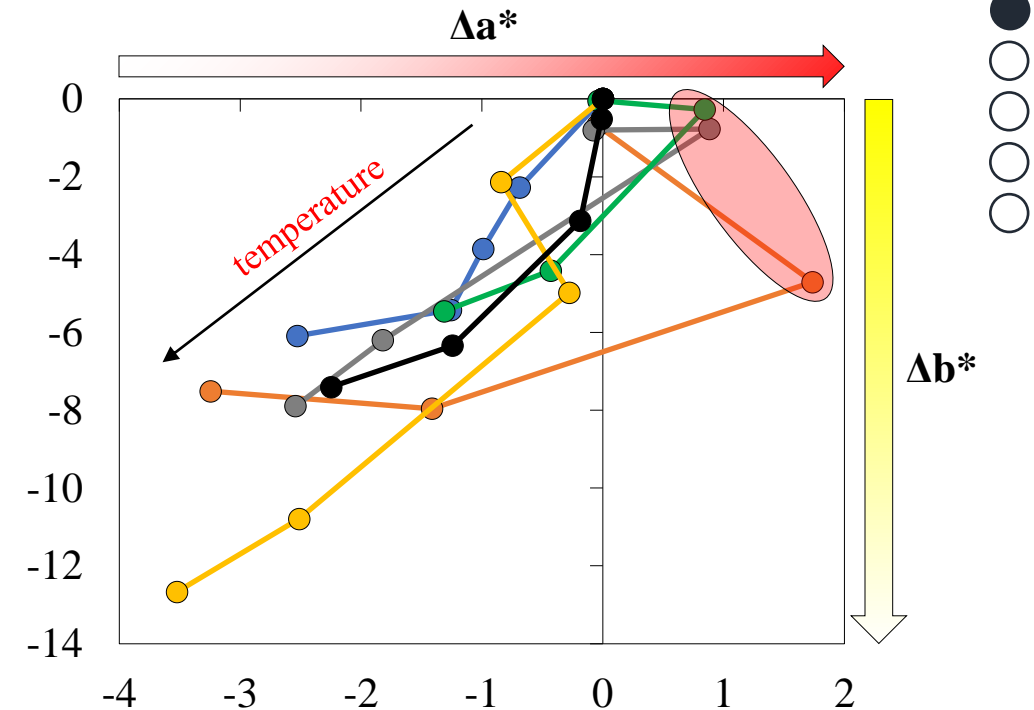
Observations communes à l'ensemble des calcaires

 a^* b^* 

Représentation 3D de la couleur

Δa^* et Δb^* :
différence avec la valeur
initiale à 20 °C

- Δa^* et Δb^*
- Δa^* à 400 °C
- rubéfaction



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

Performances mécaniques

Résistance en compression

Résistance en traction



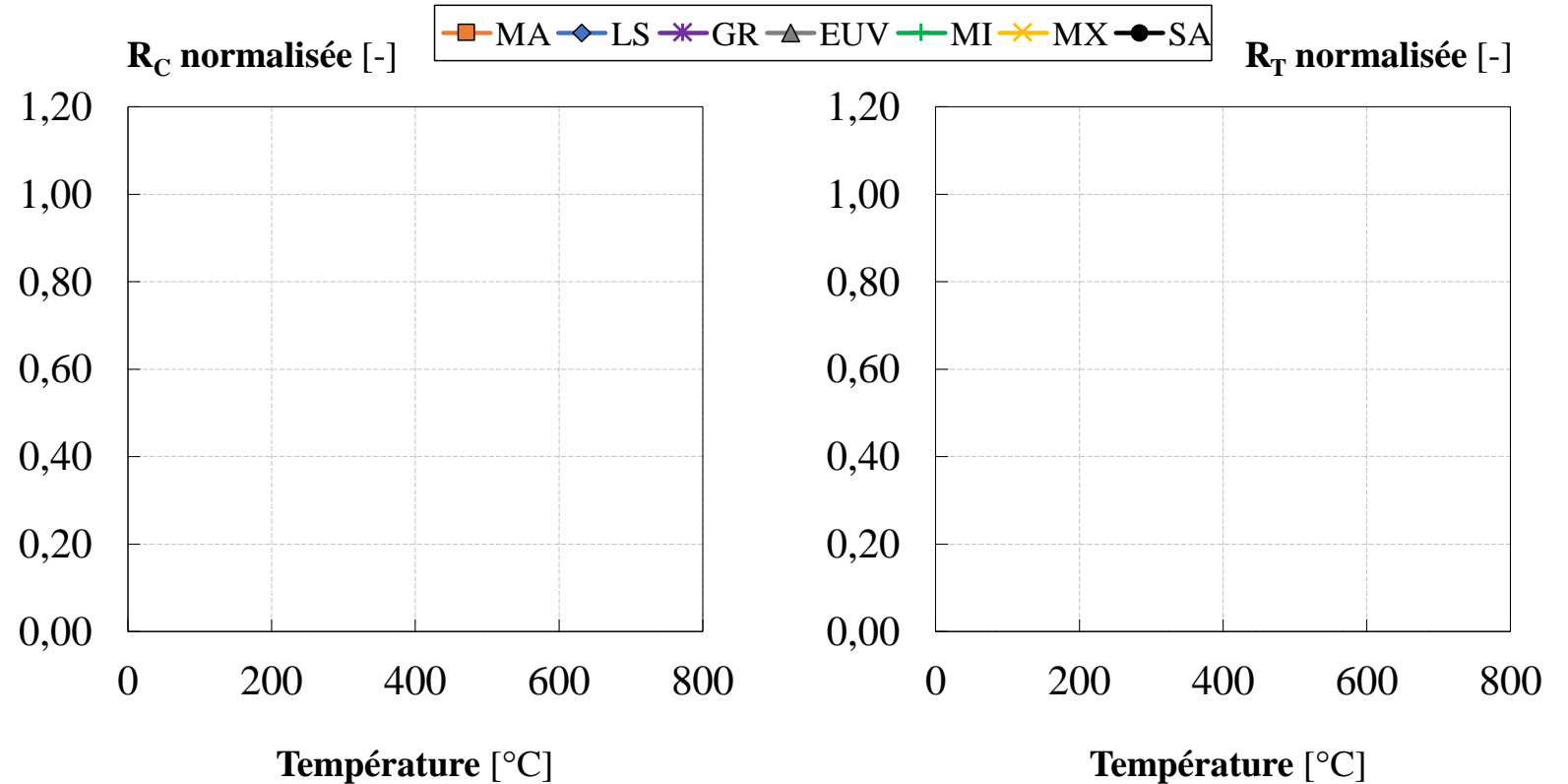
Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

 Performances mécaniques

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

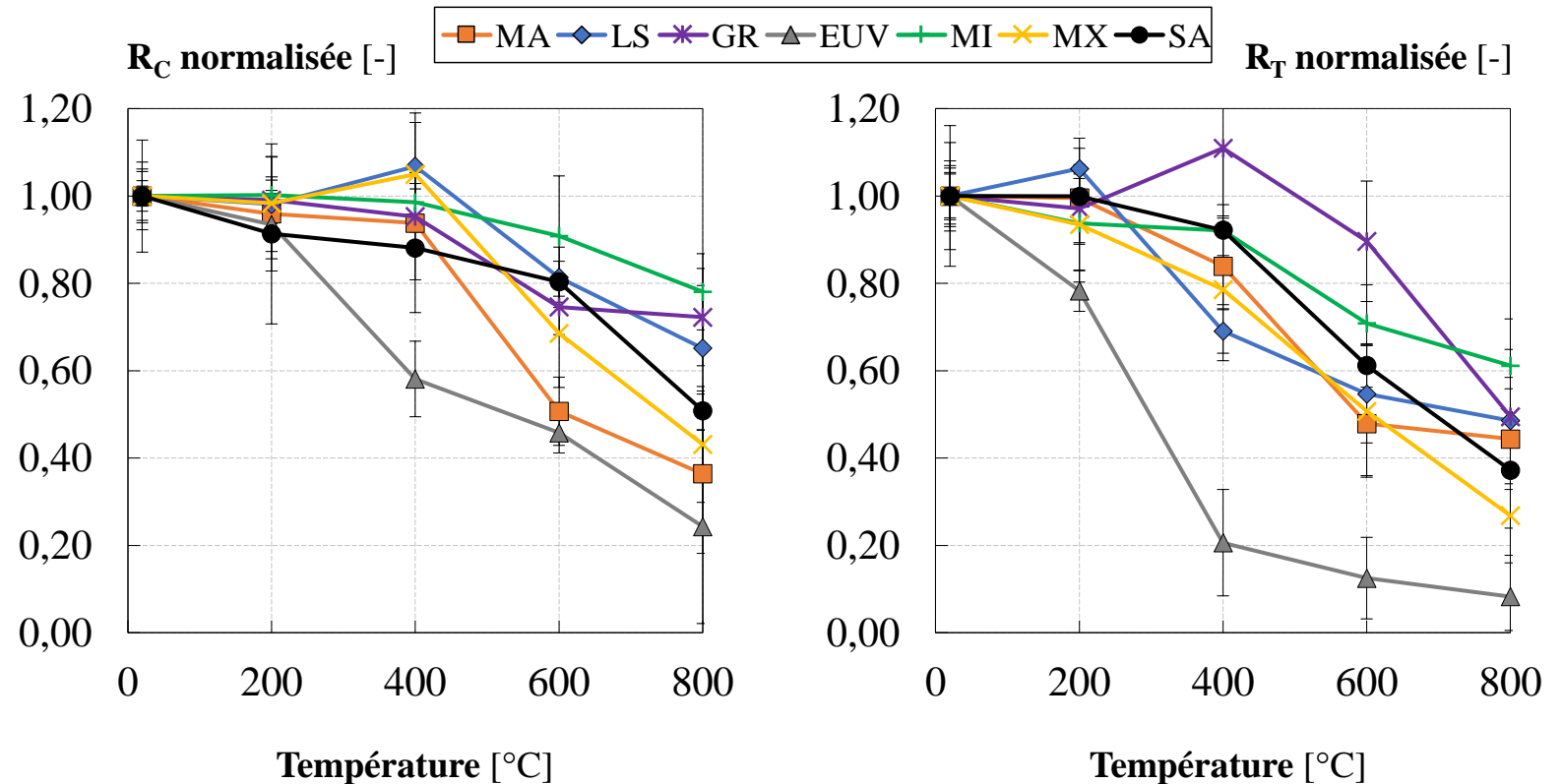
- $< 400\text{ °C}$: pertes modérées
- $> 400\text{ °C}$: pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

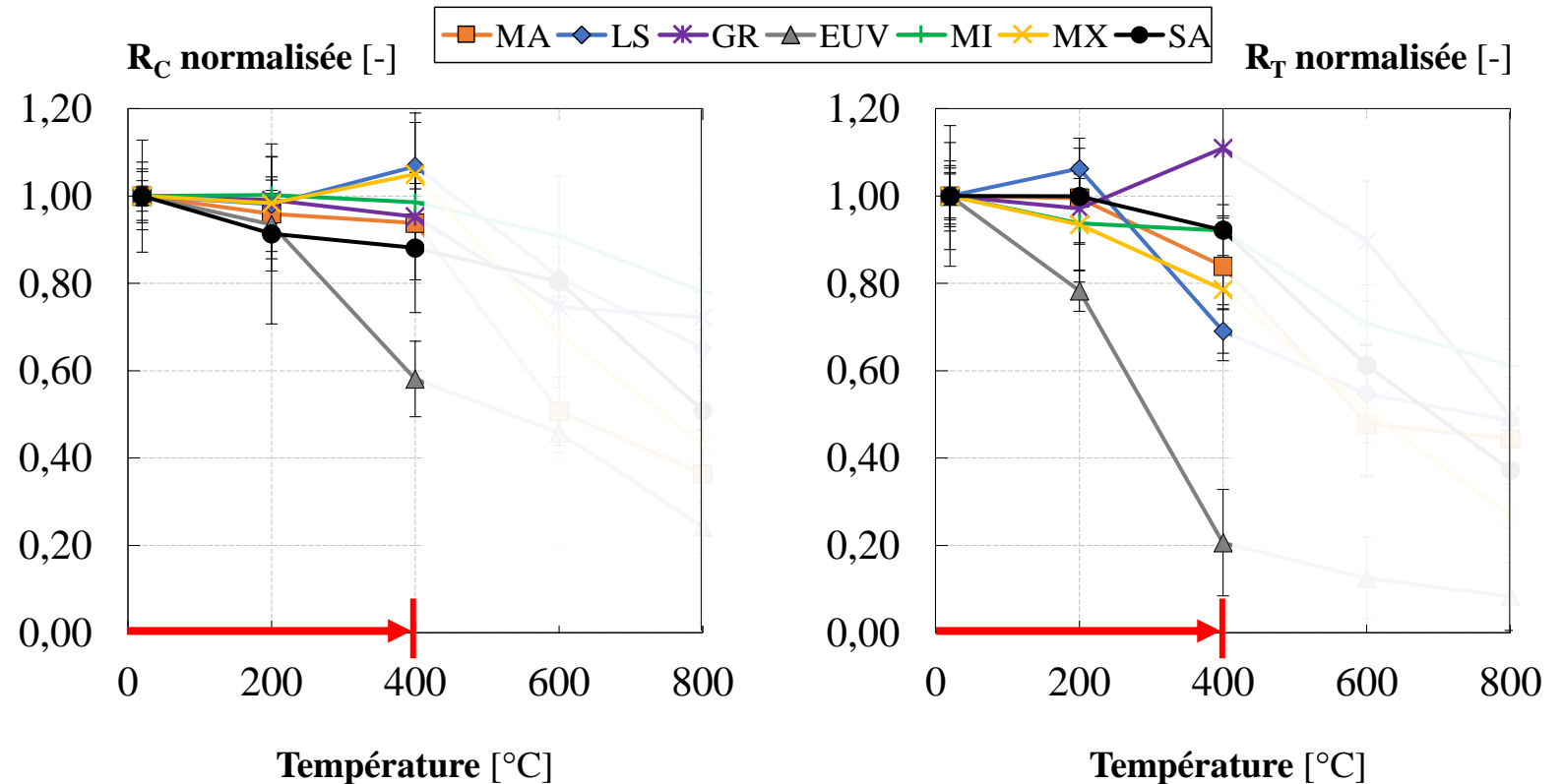
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

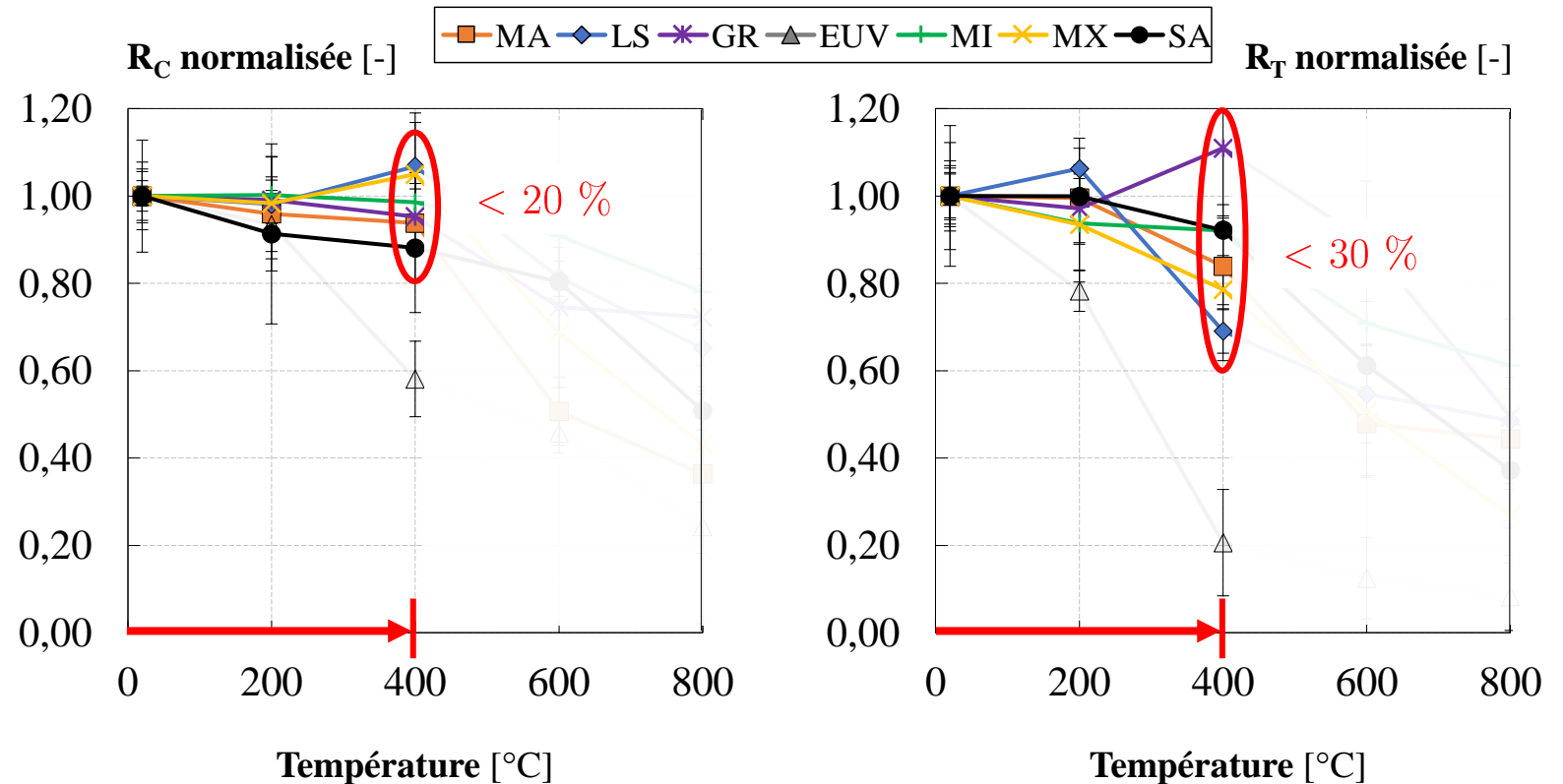
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

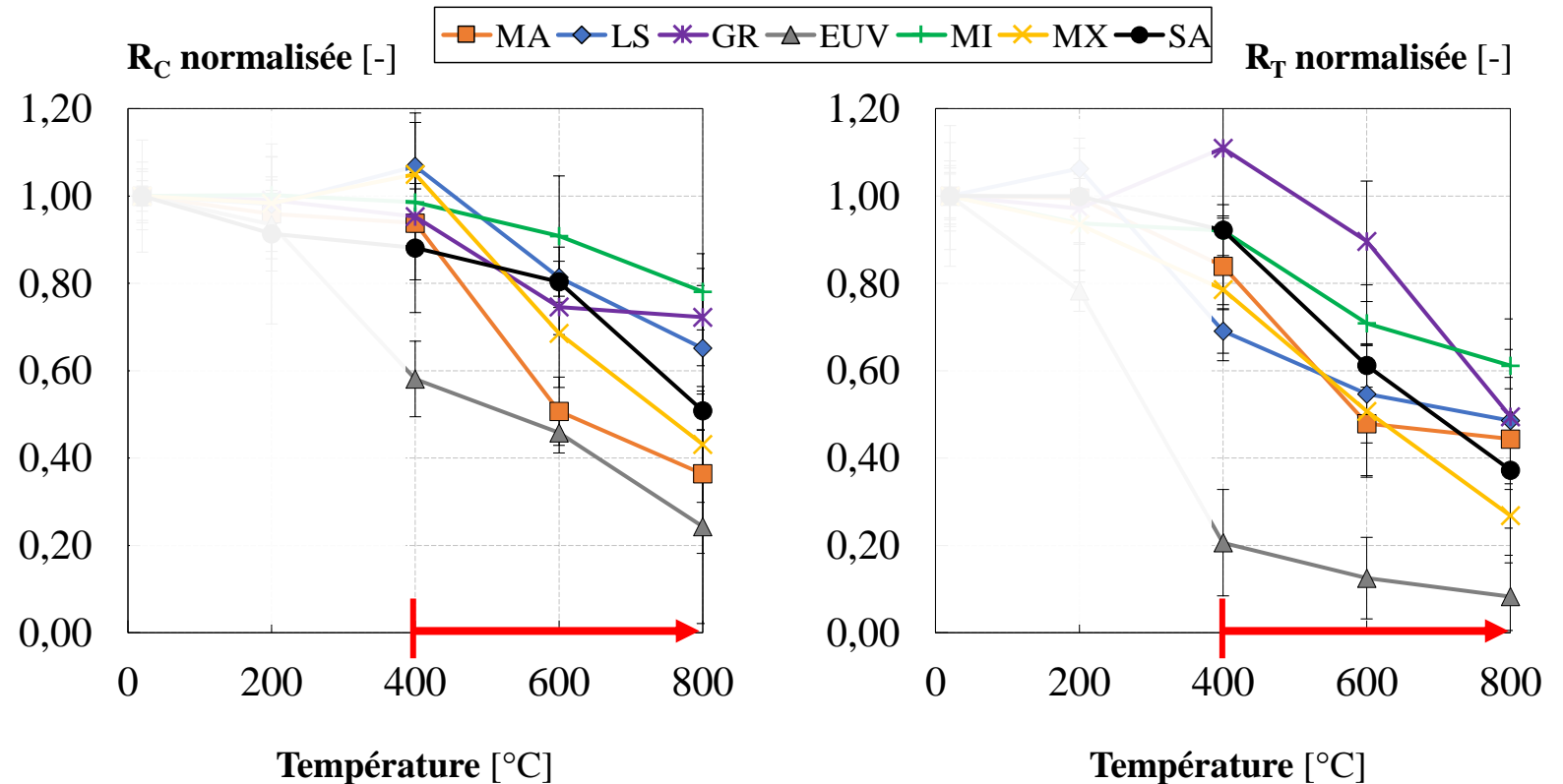
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

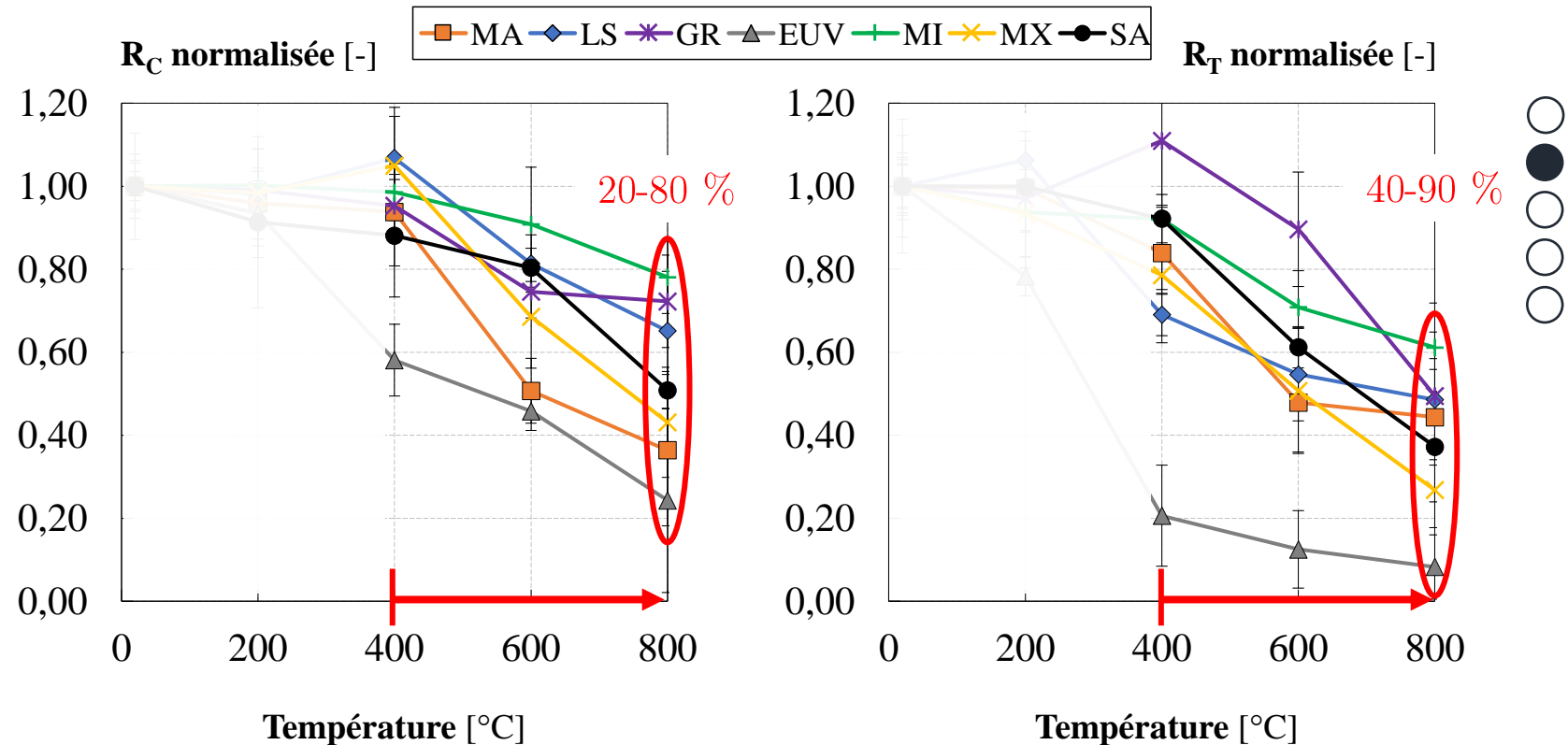
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

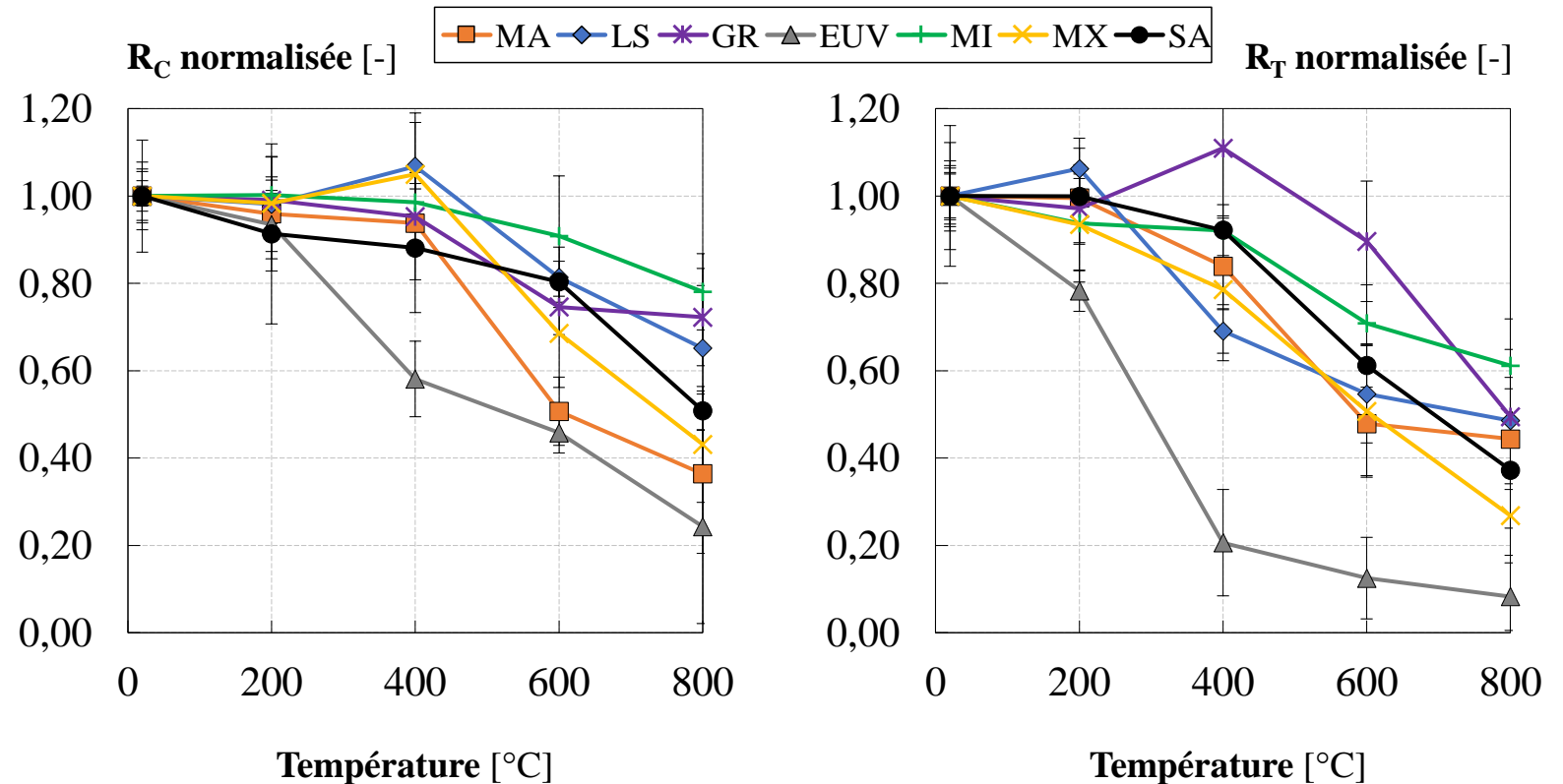
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Performances mécaniques

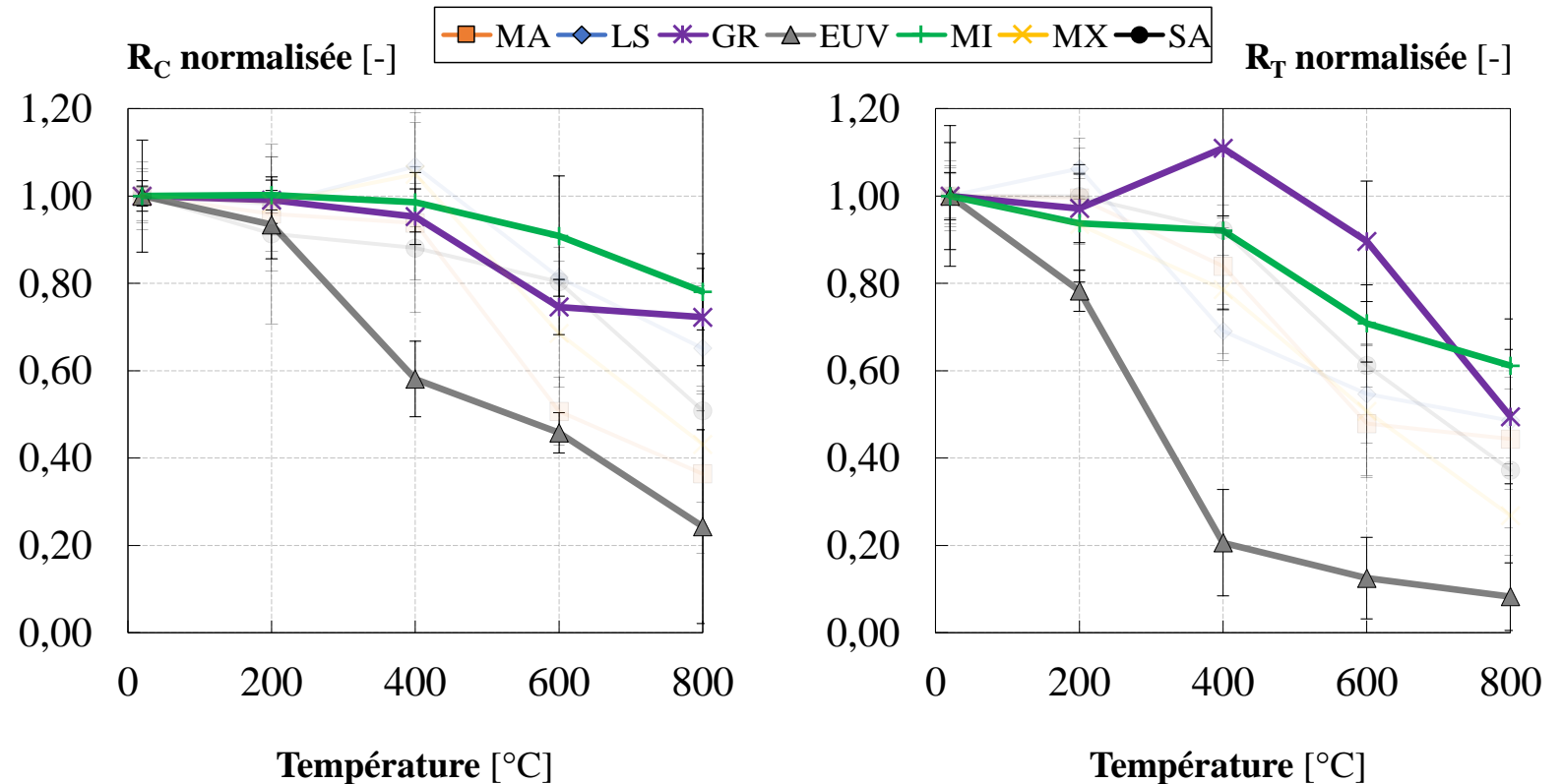
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

→ taille des grains 

→ matrice peu liante

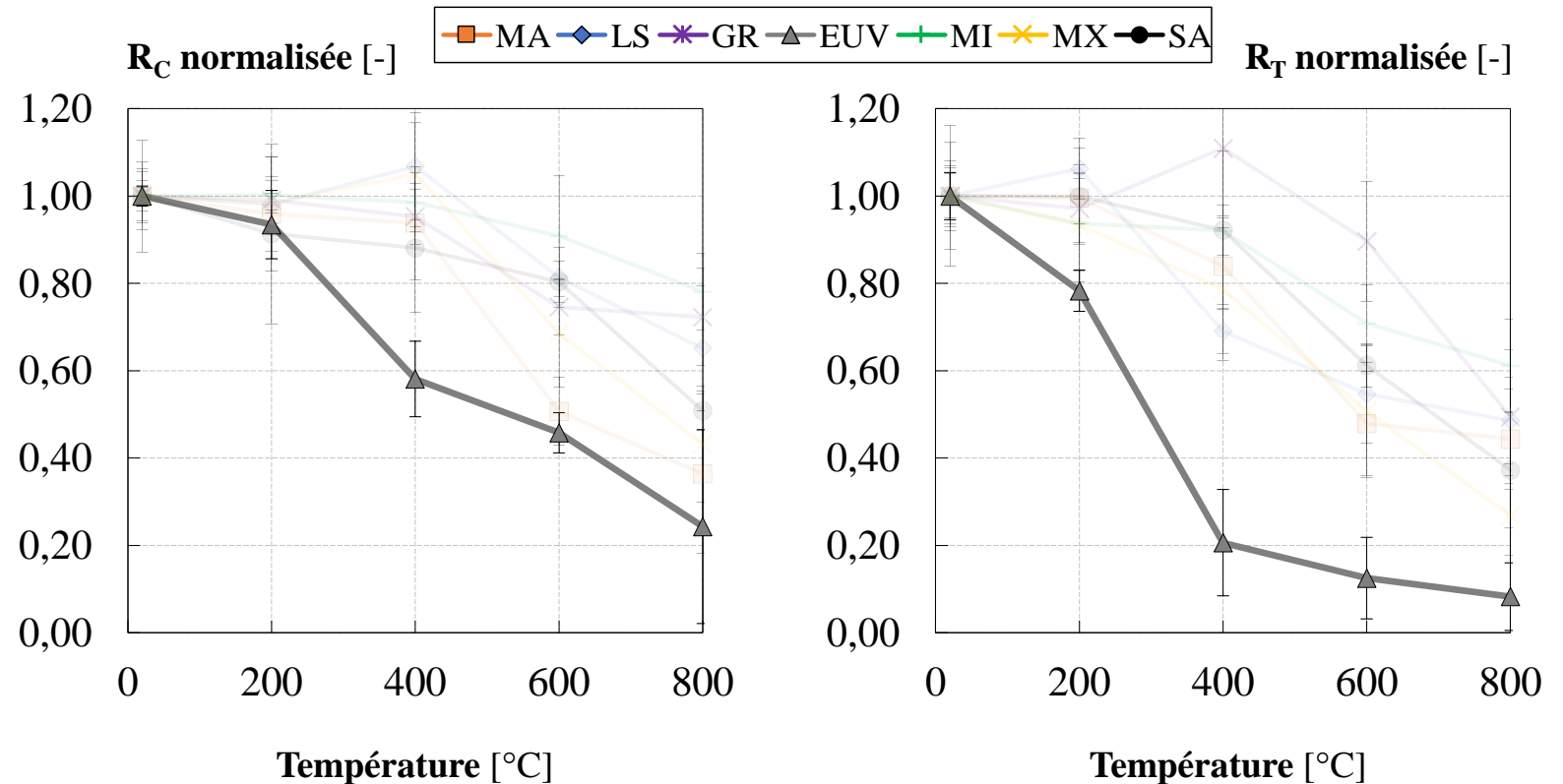
→ perte de masse précoce

→ composition polyphasique

calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

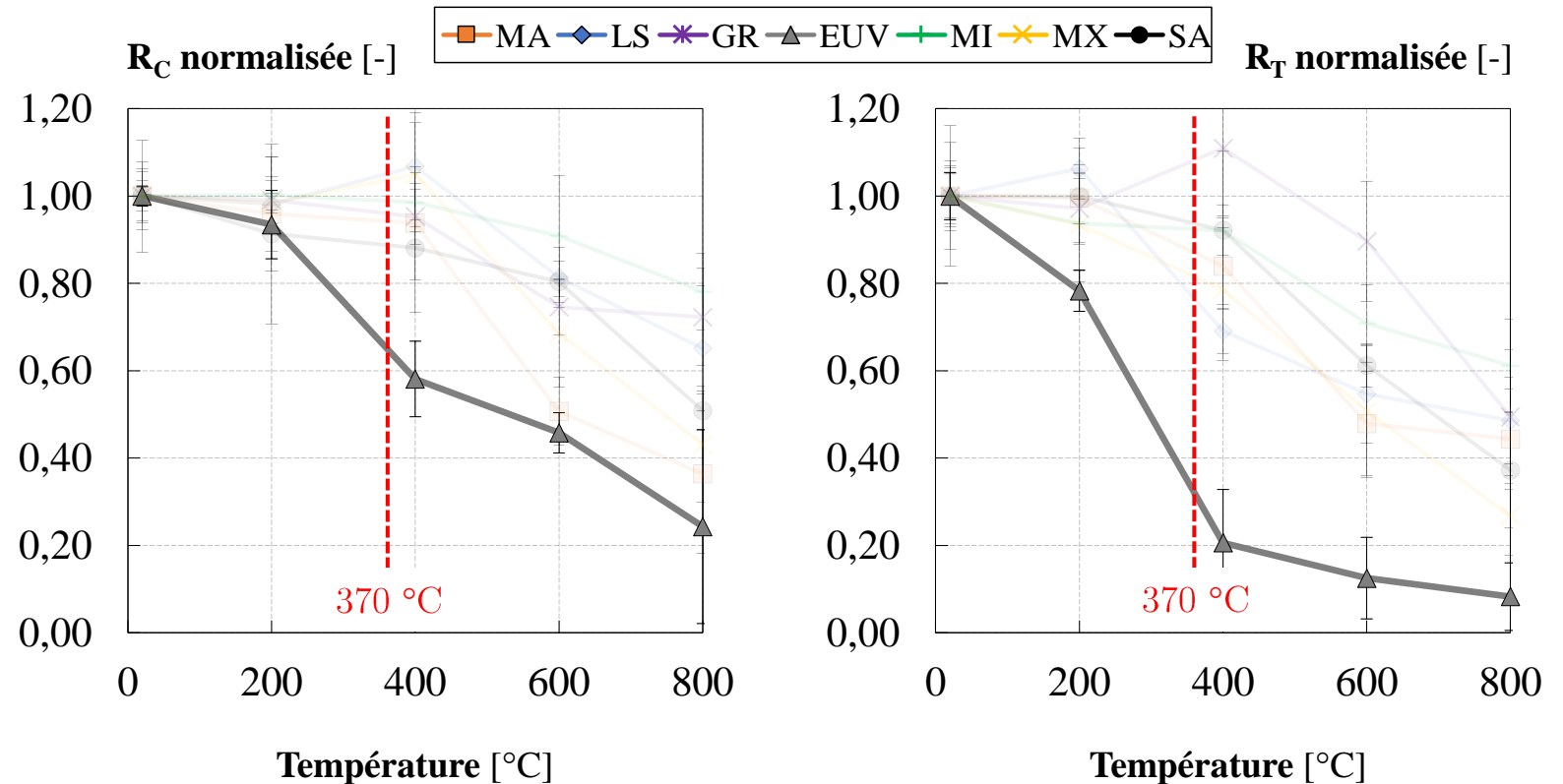
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

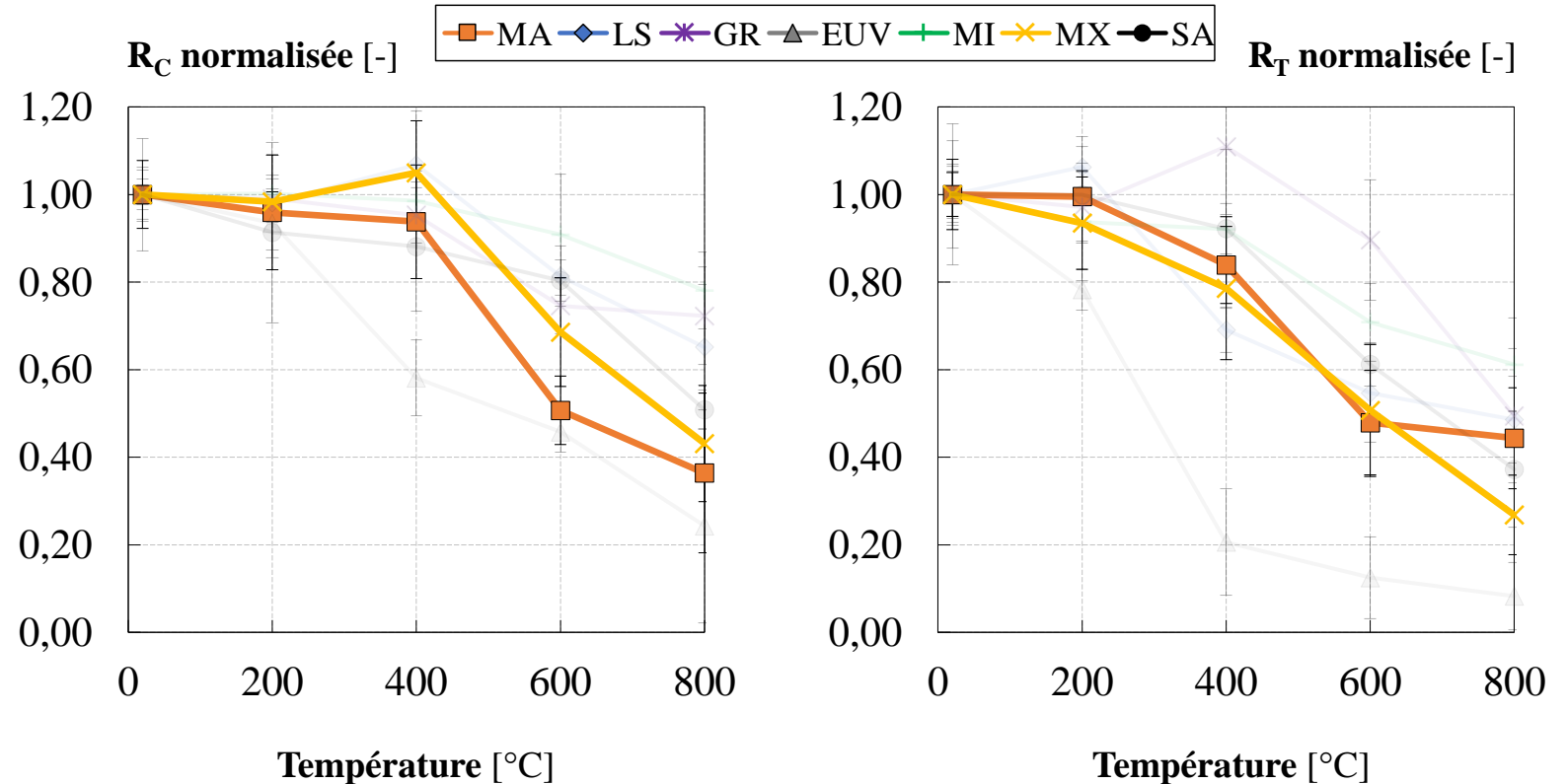
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud


Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

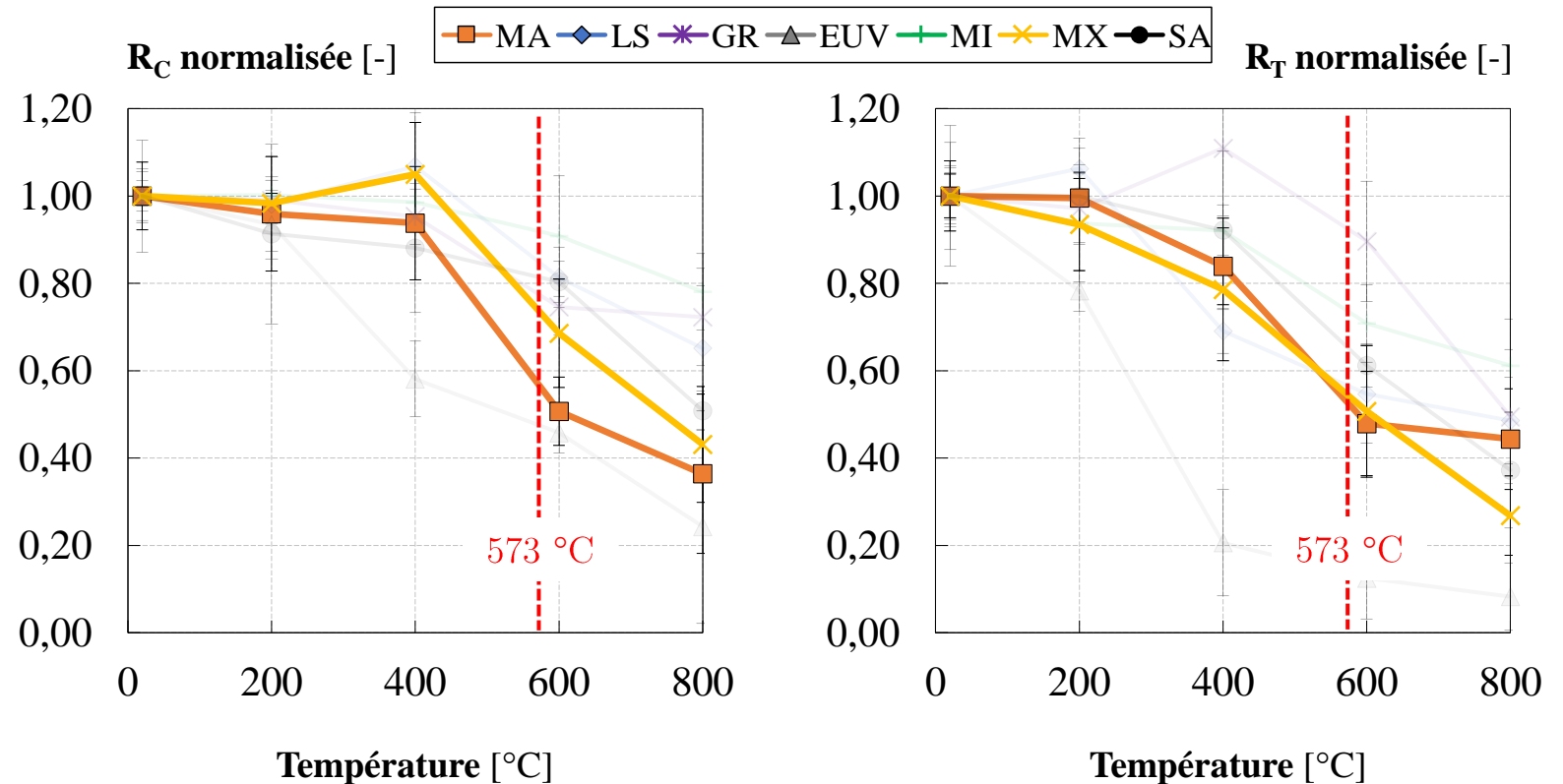
- < 400 °C : pertes modérées
- > 400 °C : pertes prononcées

Paramètres  sensibilité HT :

- taille des grains 
- matrice peu liante
- perte de masse précoce
- composition polyphasique
calcite + quartz

Résistance en compression

Résistance en traction



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

Performances mécaniques

Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

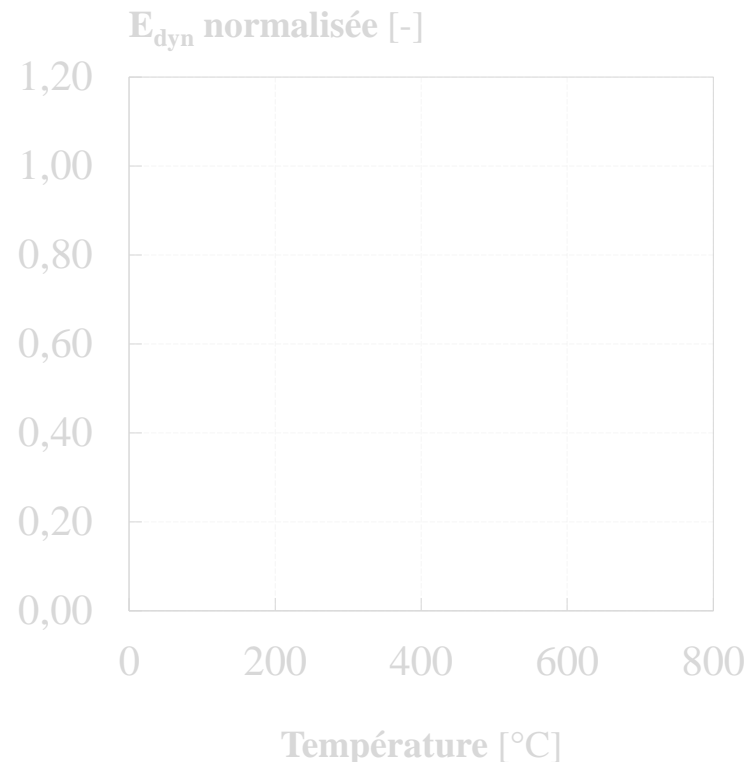
Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P

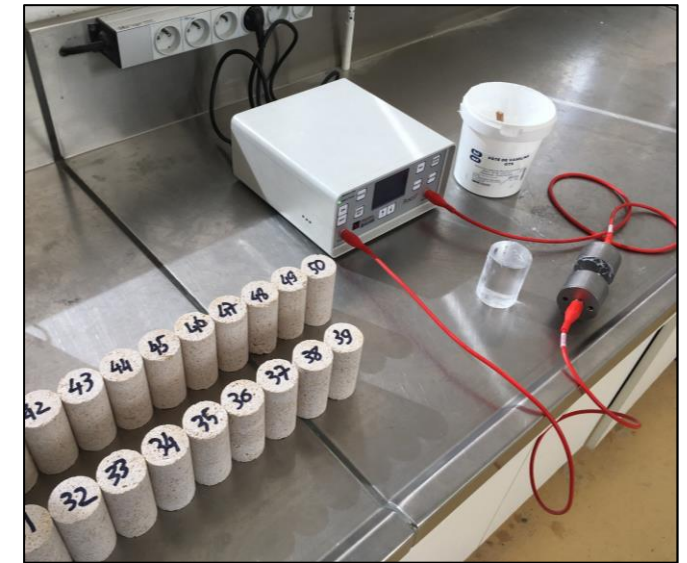
- Méthode non-destructive, réalisable sur terrain :

détection de l'initiation et du
 → développement de l'
endommagement

- Tendances de sensibilité HT similaires à celles affichées par R_C et R_T
- Estimation de pertes mécaniques par méthode non-destructive



$$E_{dyn} = \frac{V_P^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$



NF EN 14579 : Appareil de mesure - Pundit

Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

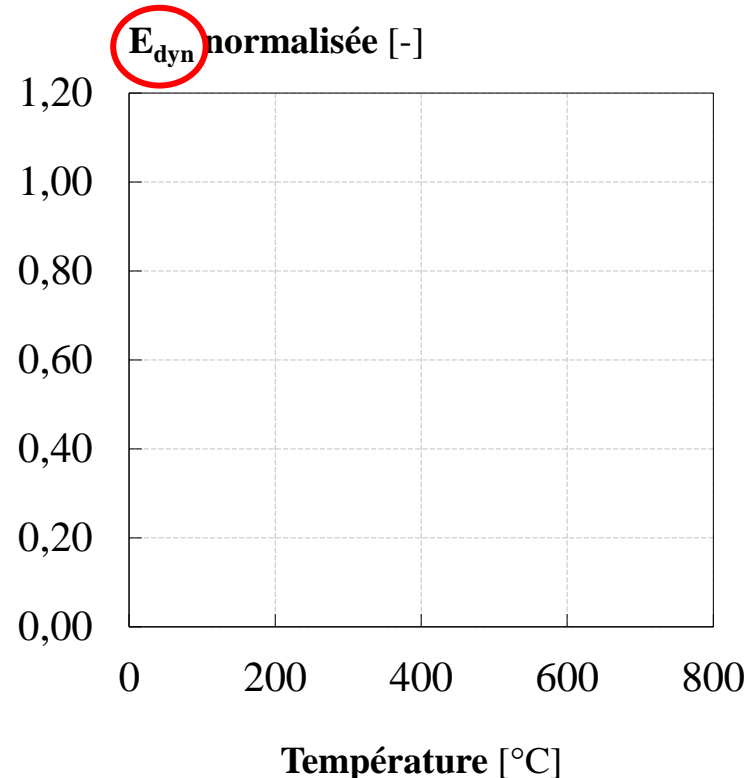
Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P

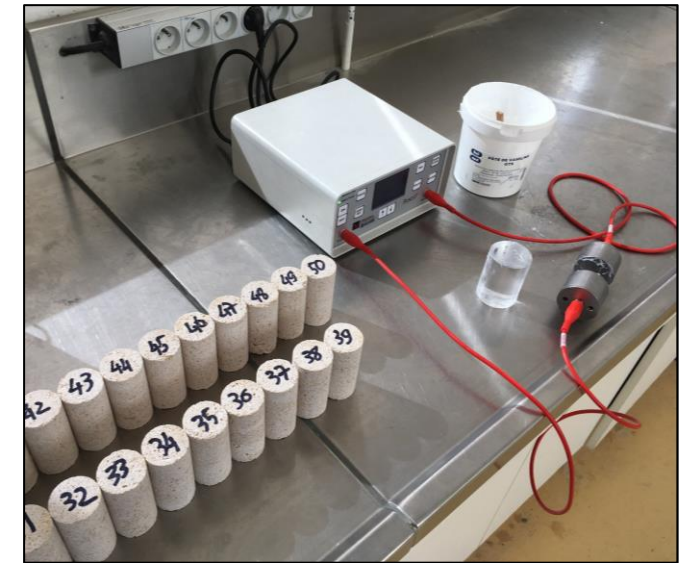
- Méthode non-destructive, réalisable sur terrain :

détection de l'initiation et du
→ développement de l'
endommagement

- Tendances de sensibilité HT similaires à celles affichées par R_C et R_T
- Estimation de pertes mécaniques par méthode non-destructive



$$\mathbf{E}_{dyn} = \frac{V_P^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$



NF EN 14579 : Appareil de mesure - Pundit

Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

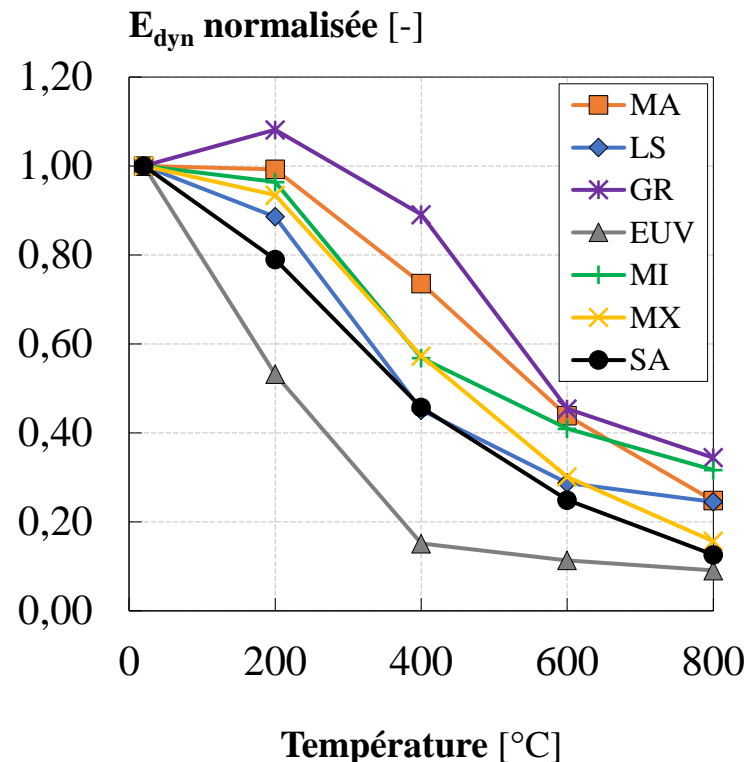
Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P

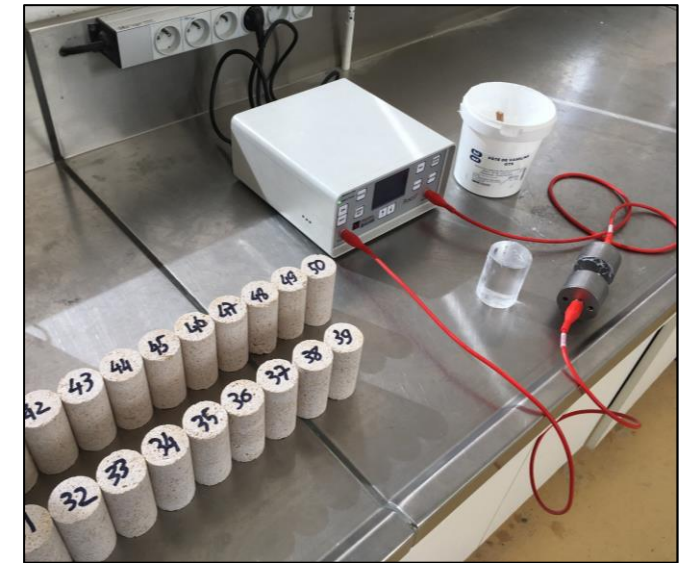
- Méthode non-destructive, réalisable sur terrain :

détection de l'initiation et du
→ développement de l'
endommagement

- Tendances de sensibilité HT similaires à celles affichées par R_C et R_T
- Estimation de pertes mécaniques par méthode non-destructive



$$E_{dyn} = \frac{V_P^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$



NF EN 14579 : Appareil de mesure - Pundit

Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

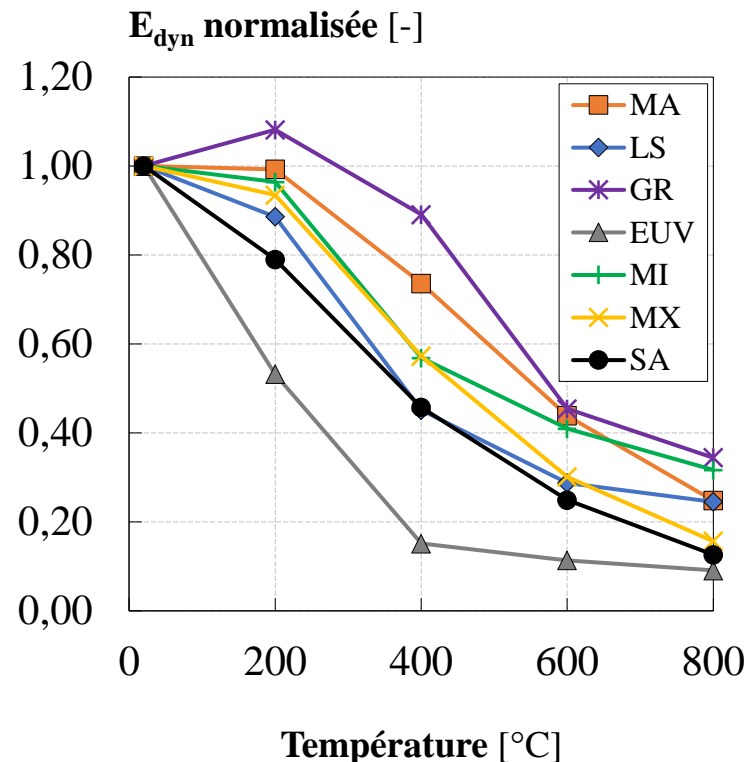
Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P

- Méthode non-destructive, réalisable sur terrain :

détection de l'initiation et du
→ développement de l'
endommagement

- Tendances de sensibilité HT similaires à celles affichées par R_C et R_T
- Estimation de pertes mécaniques par méthode non-destructive



$$E_{dyn} = \frac{V_P^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$



NF EN 14579 : Appareil de mesure - Pundit

Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

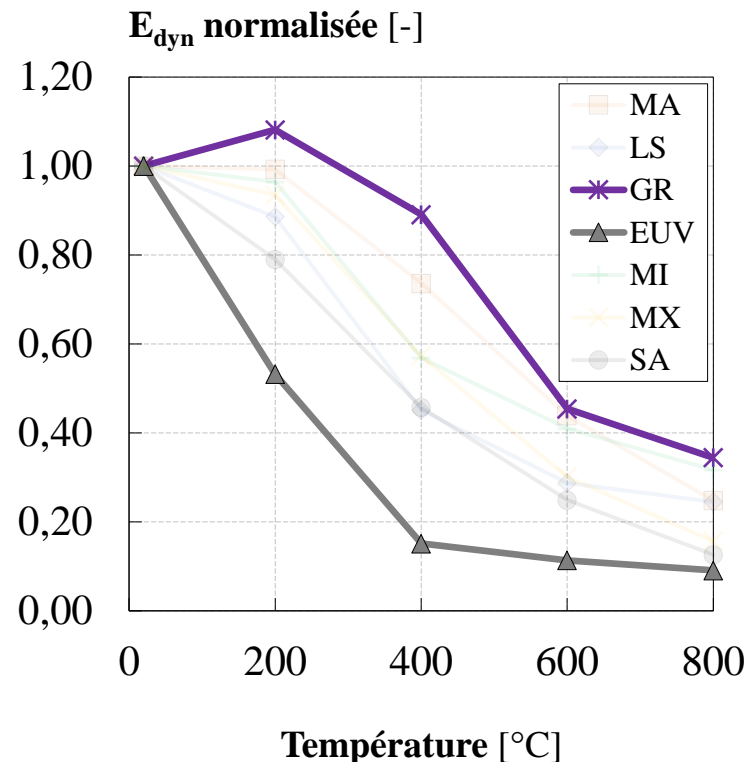
Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P

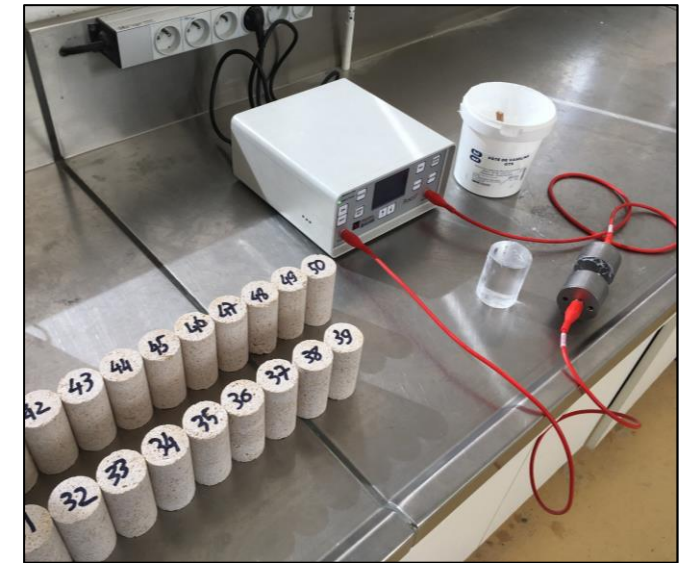
- Méthode non-destructive, réalisable sur terrain :

détection de l'initiation et du
→ développement de l'
endommagement

- Tendances de sensibilité HT similaires à celles affichées par R_C et R_T
- Estimation de pertes mécaniques par méthode non-destructive



$$E_{dyn} = \frac{V_P^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$



NF EN 14579 : Appareil de mesure - Pundit

Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

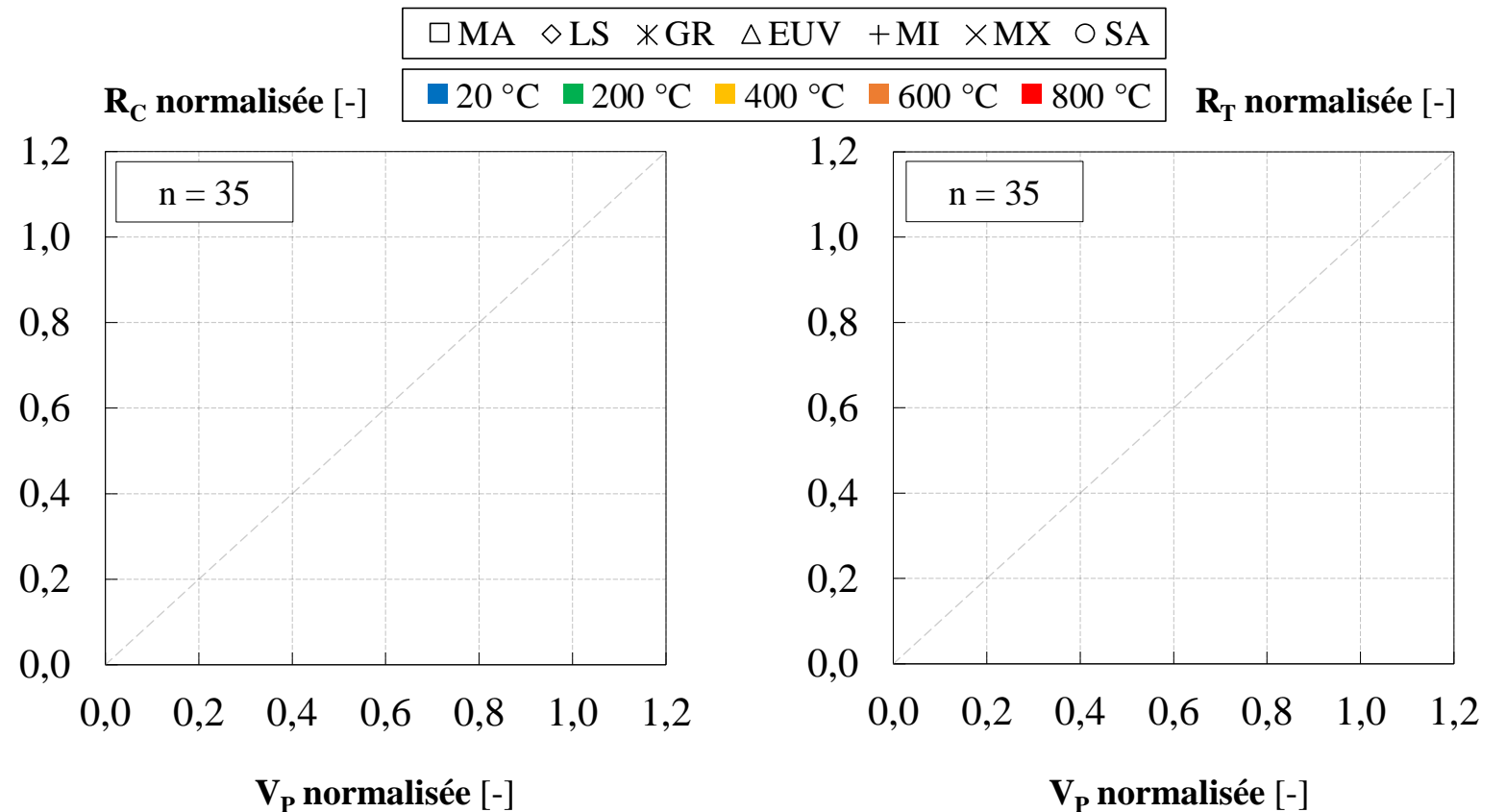
Simulation numérique

□ Performances mécaniques

- Méthode non-destructive, réalisable sur terrain :
détECTION de l'initiation et du développement de l'**endommagement**
- Tendances de sensibilité HT similaires à celles affichées par R_C et R_T
- Estimation de pertes mécaniques par méthode non-destructive

Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

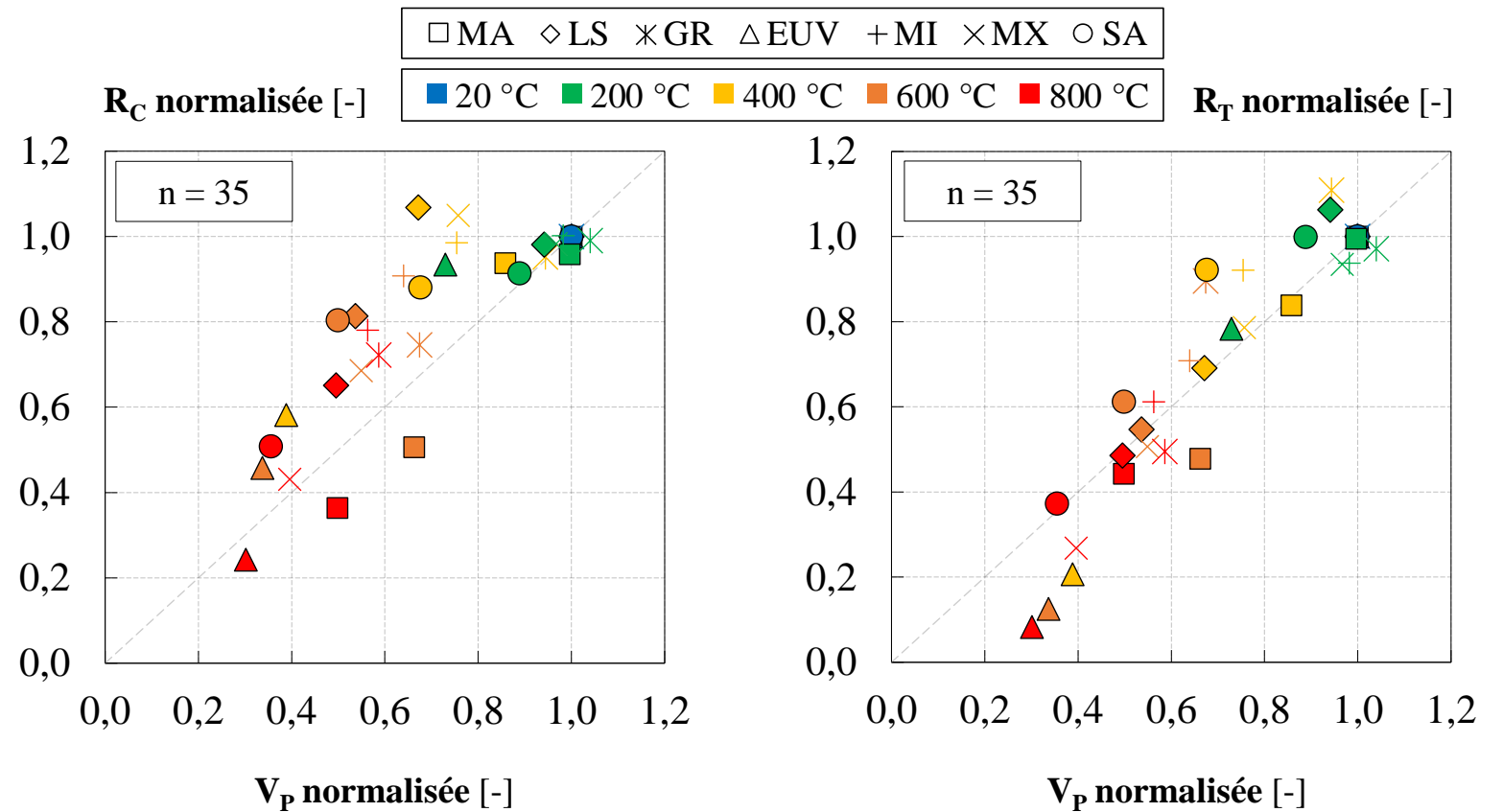
Simulation numérique

Performances mécaniques

- Méthode non-destructive, réalisable sur terrain :
détECTION de l'initiation et du développement de l'**endommagement**
- Tendances de sensibilité HT similaires à celles affichées par R_C et R_T
- Estimation de pertes mécaniques par méthode non-destructive

Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

□ Performances mécaniques

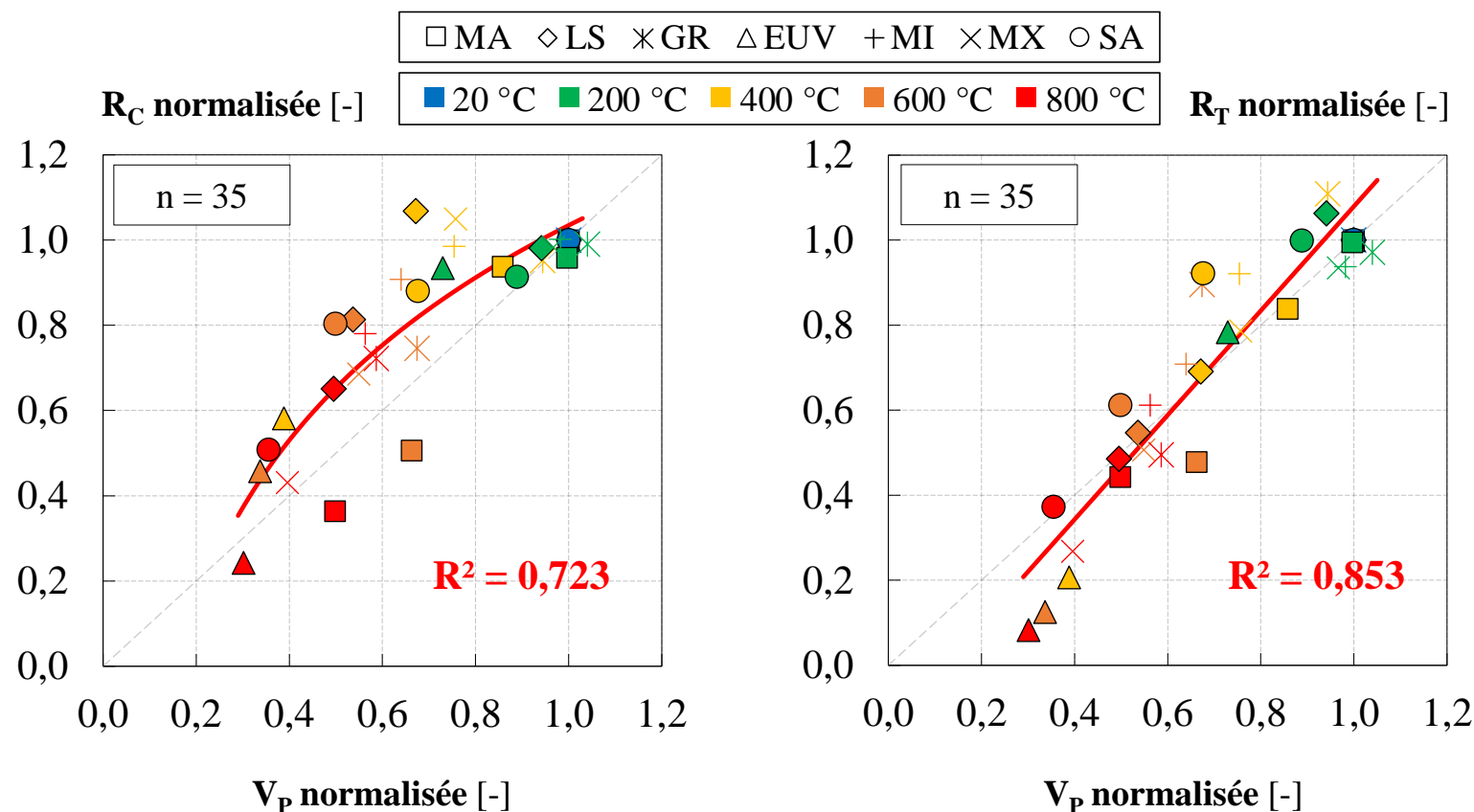
- Méthode non-destructive, réalisable sur terrain :

détection de l'initiation et du
→ développement de l'
endommagement

- Tendances de sensibilité HT similaires à celles affichées par R_C et R_T
- Estimation de pertes mécaniques par méthode non-destructive

Module d'élasticité dynamique

Vitesse des ondes P



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

 Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



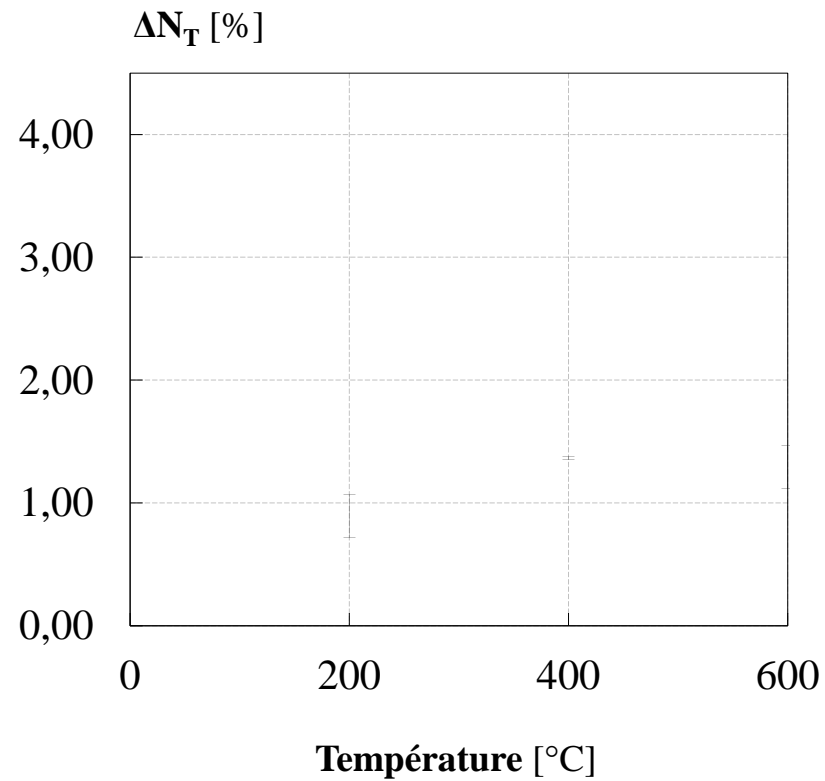
Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

 Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

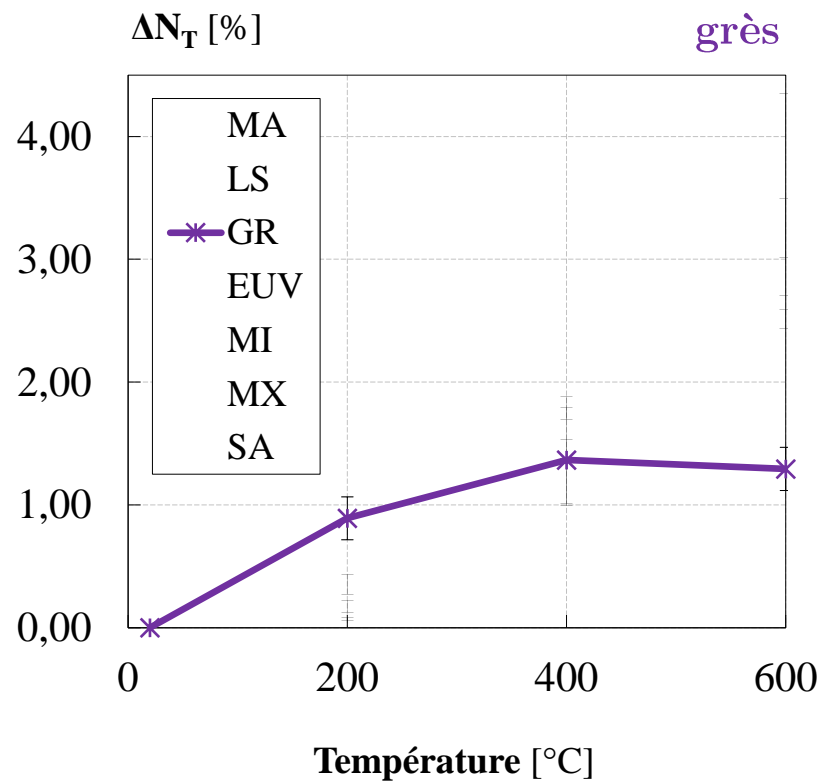
Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

❑ Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

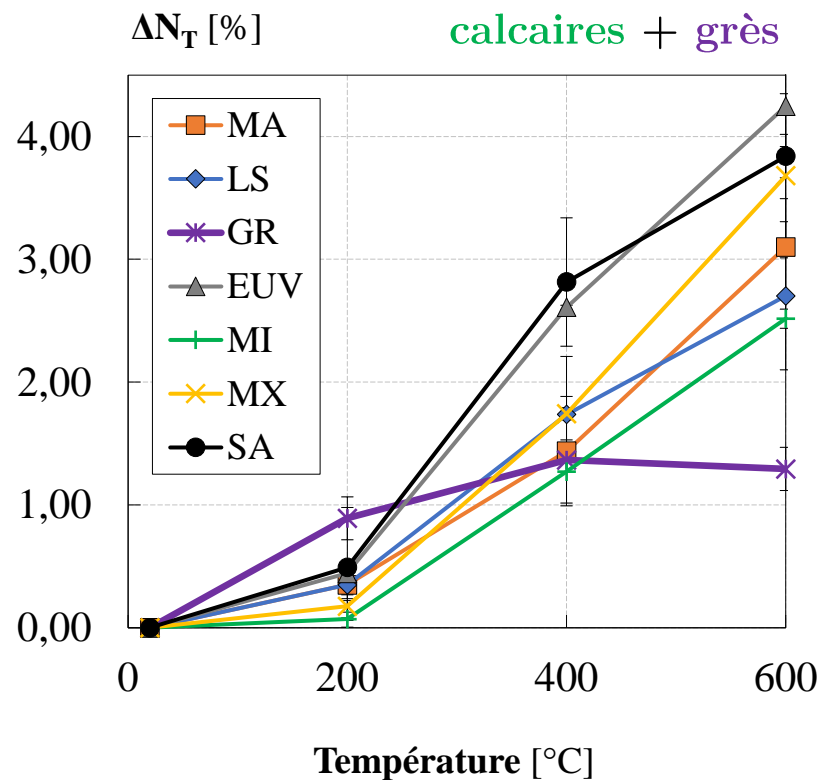
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

Essais expérimentaux à chaud

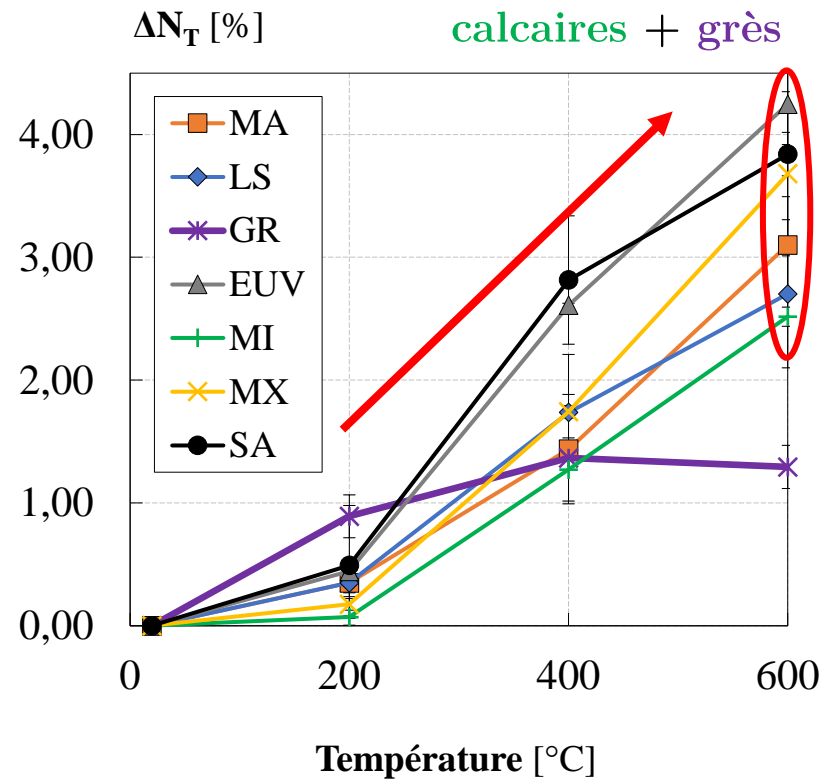
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

Essais expérimentaux à chaud

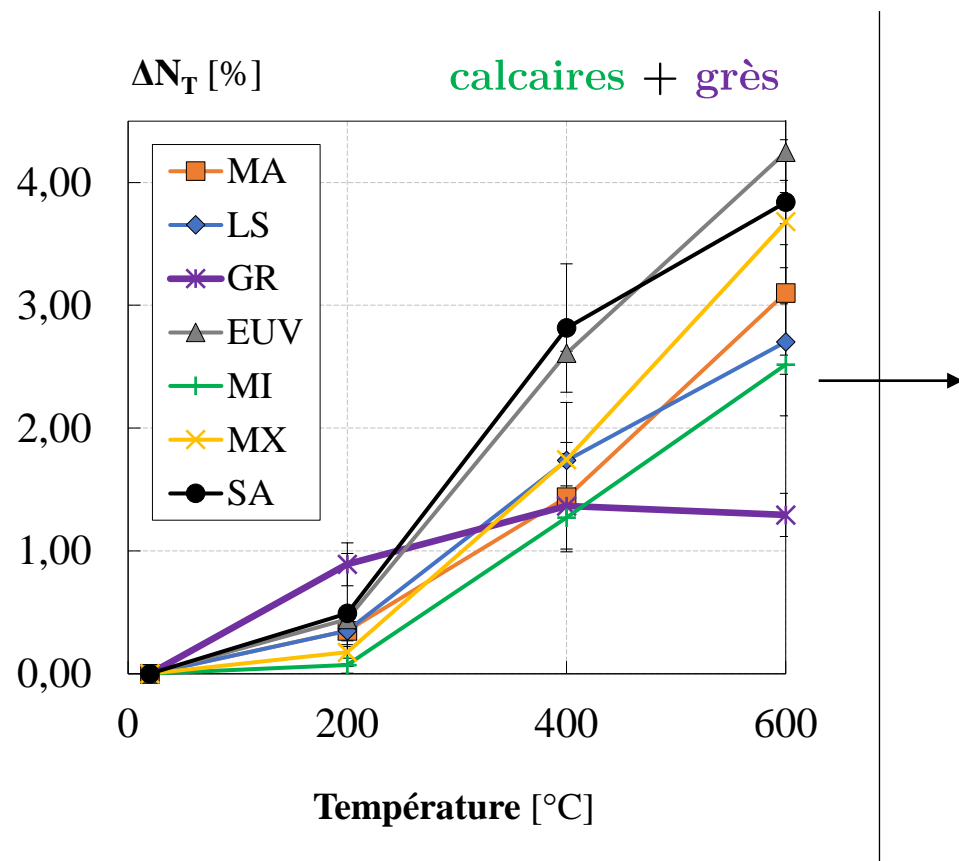
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

❑ Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

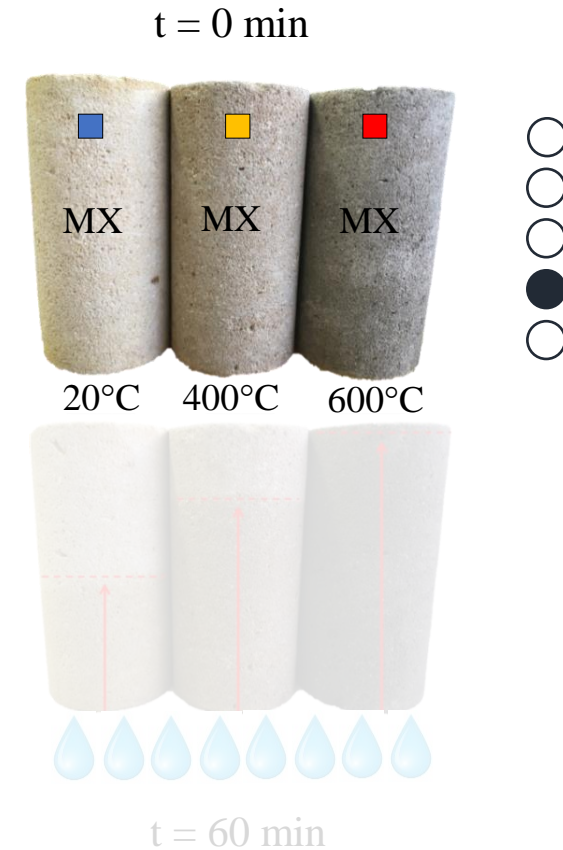
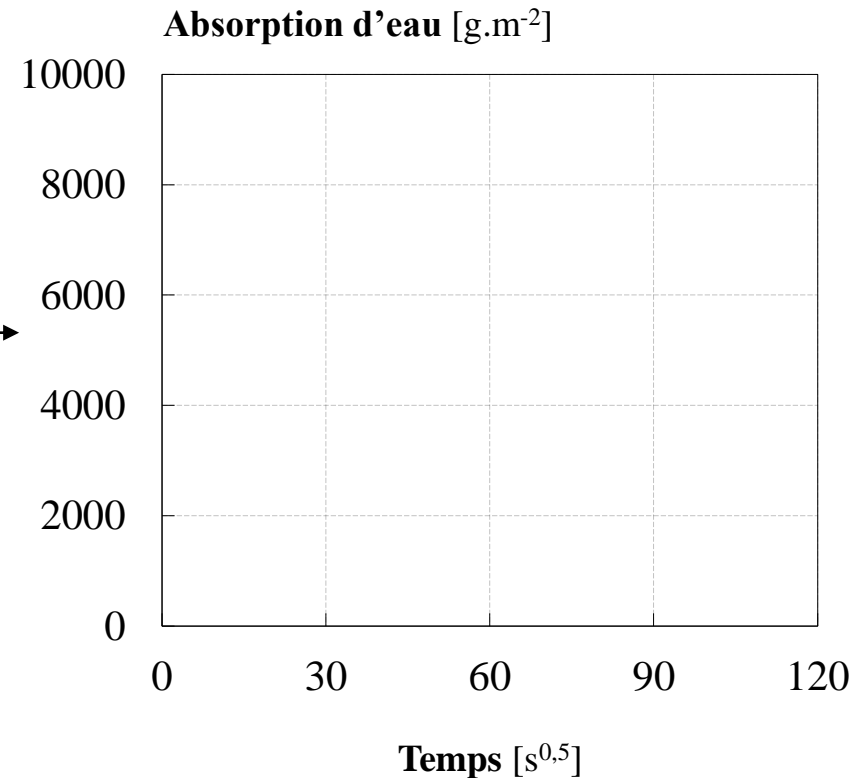
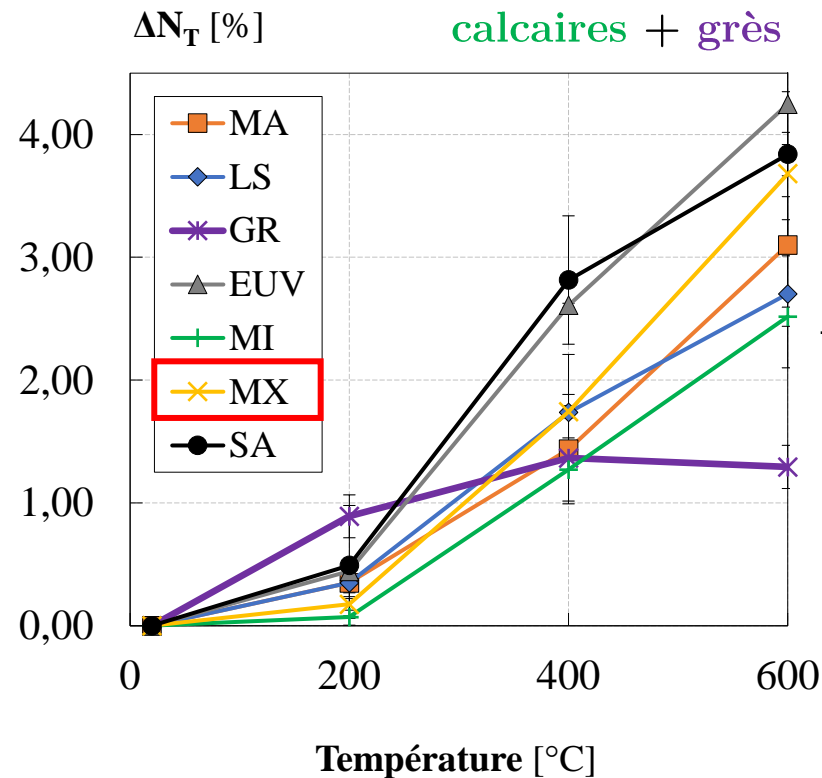
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

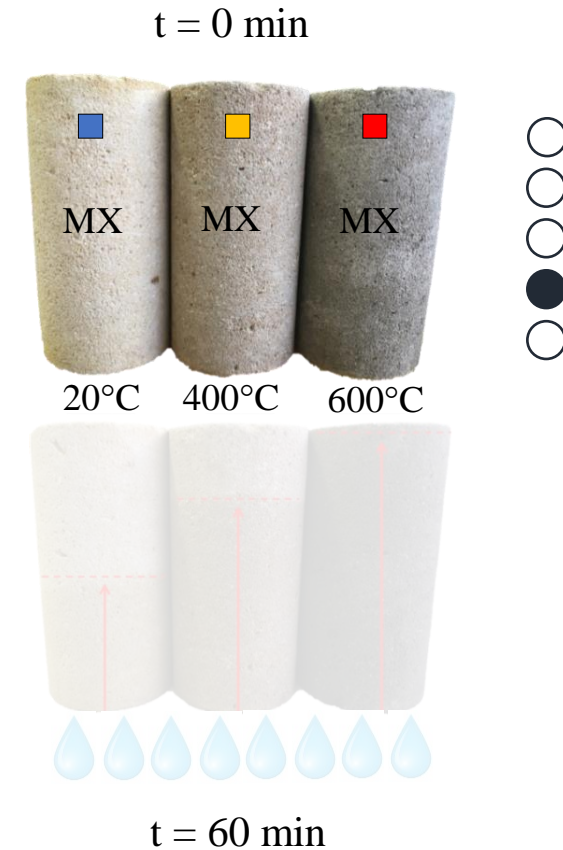
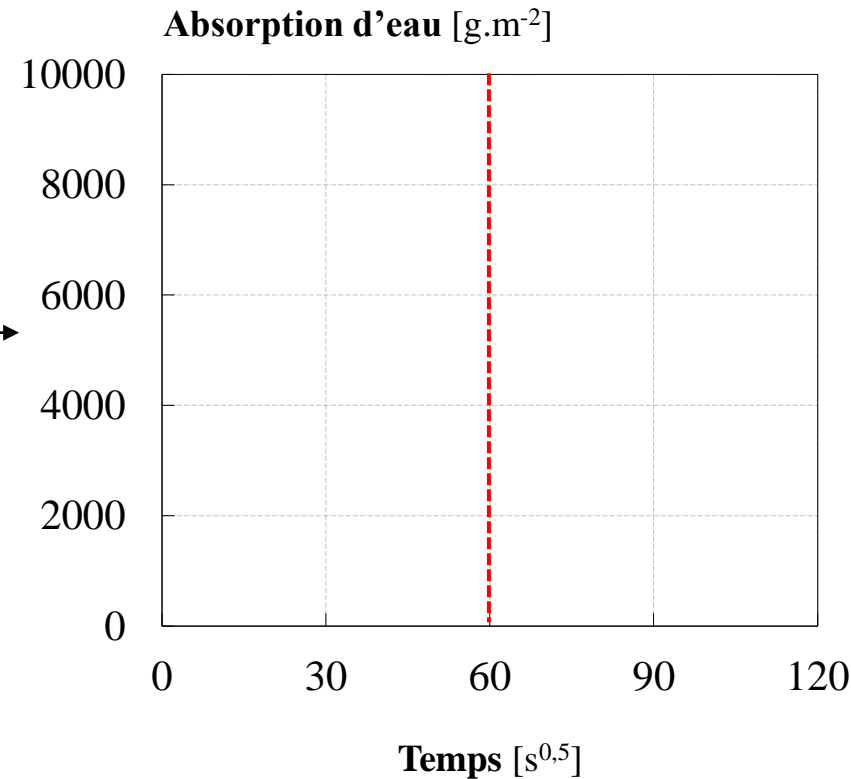
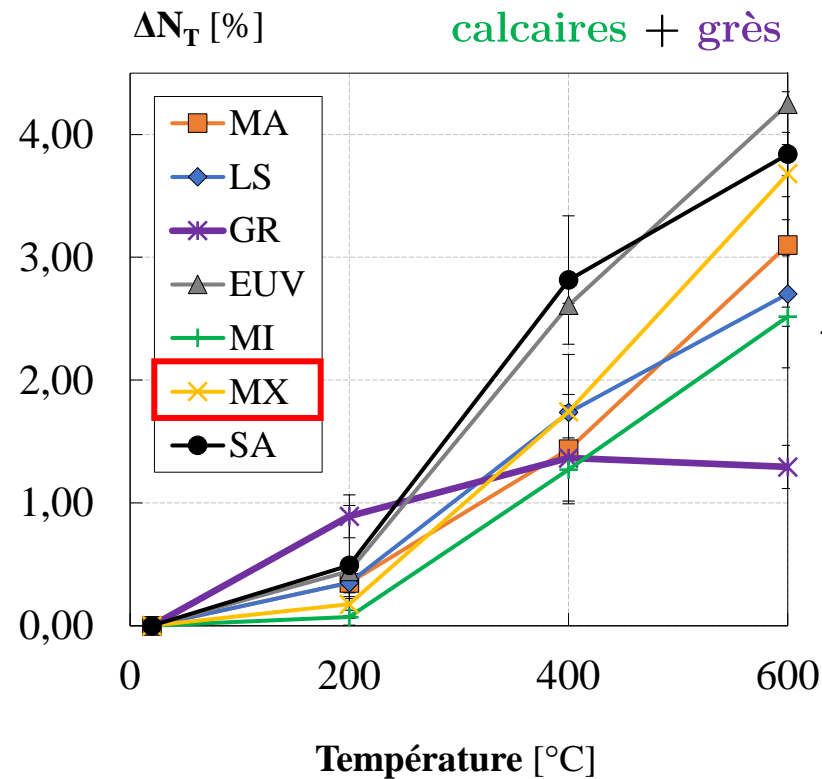
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

 Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

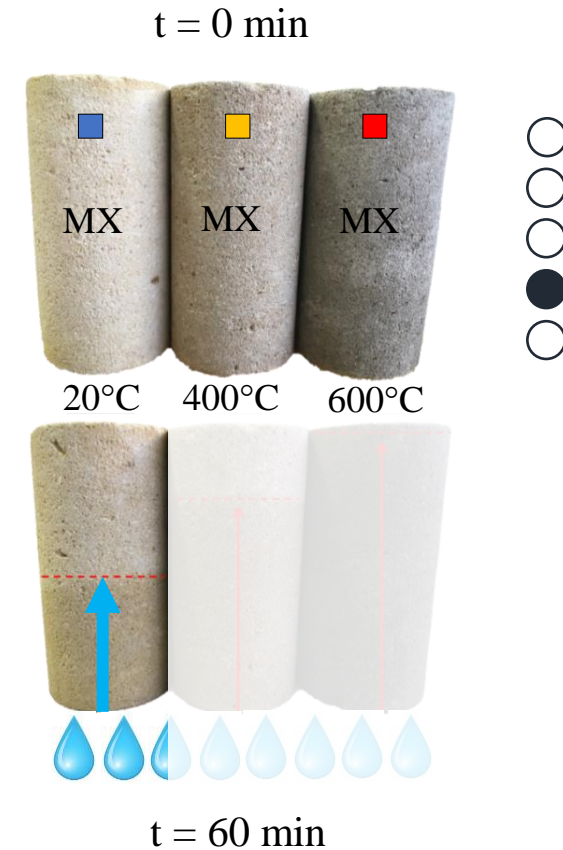
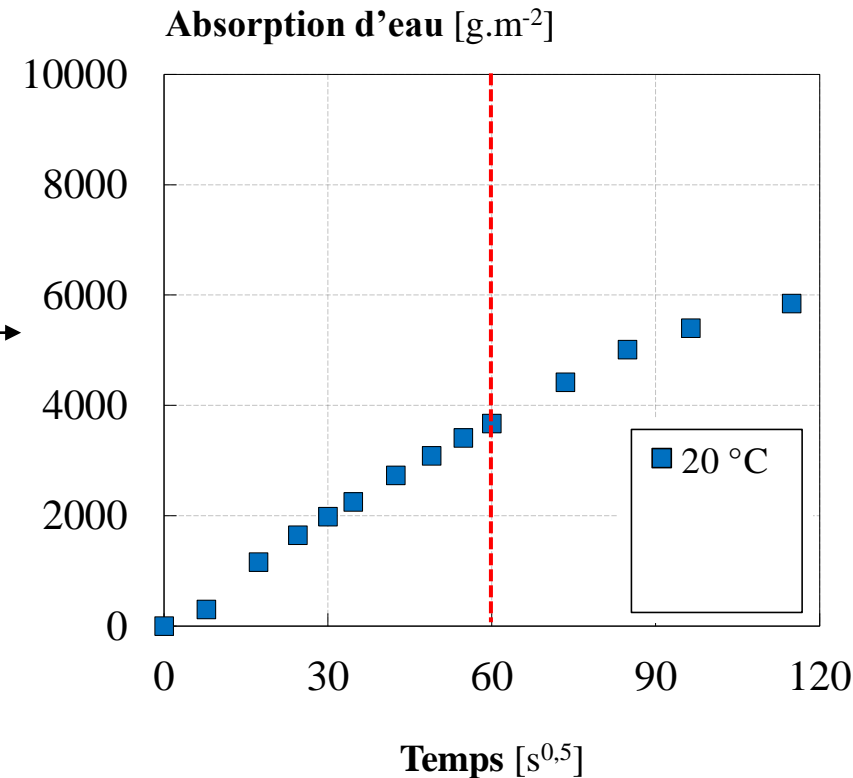
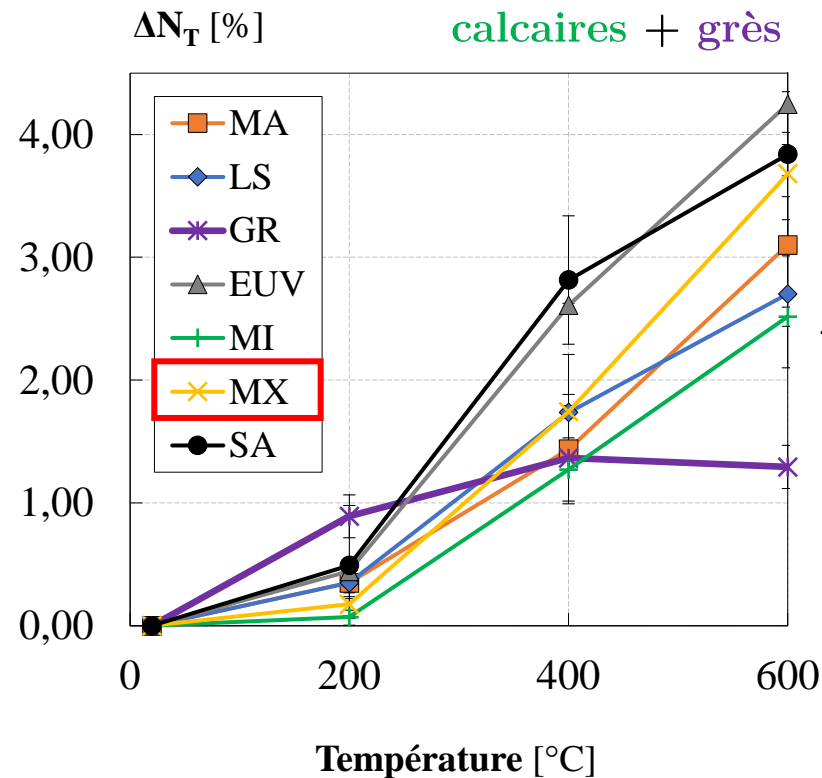
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

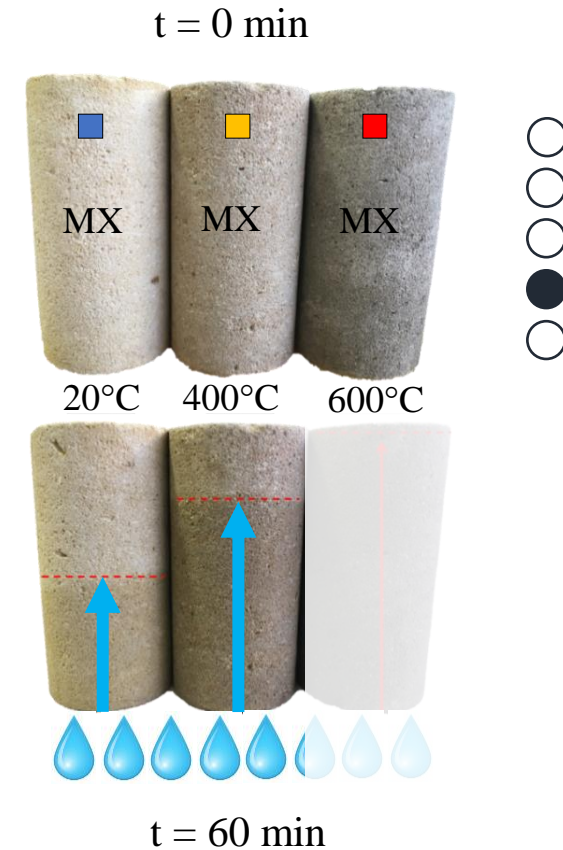
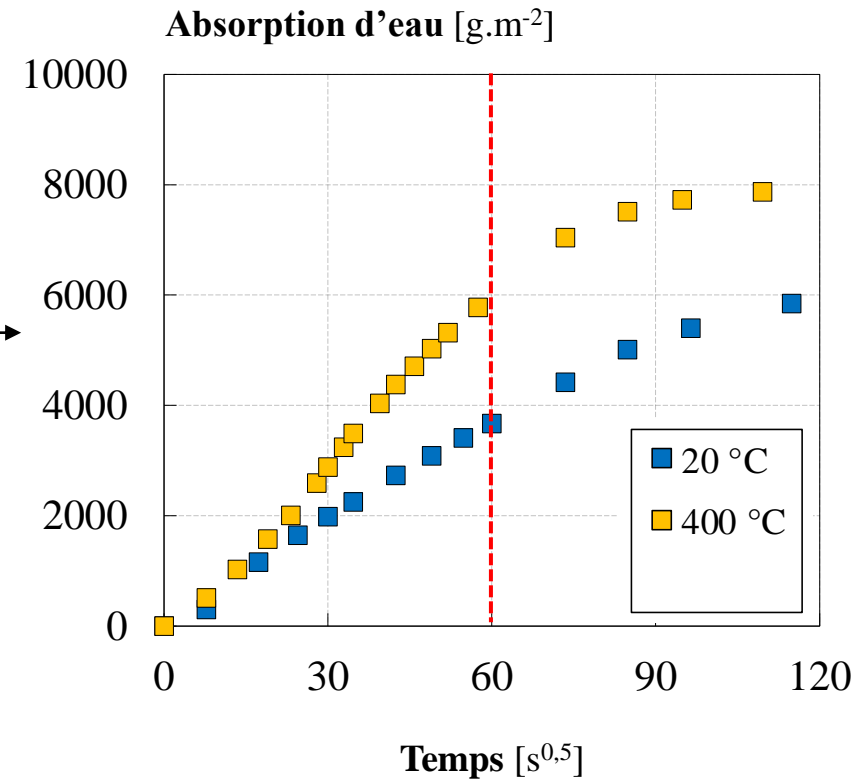
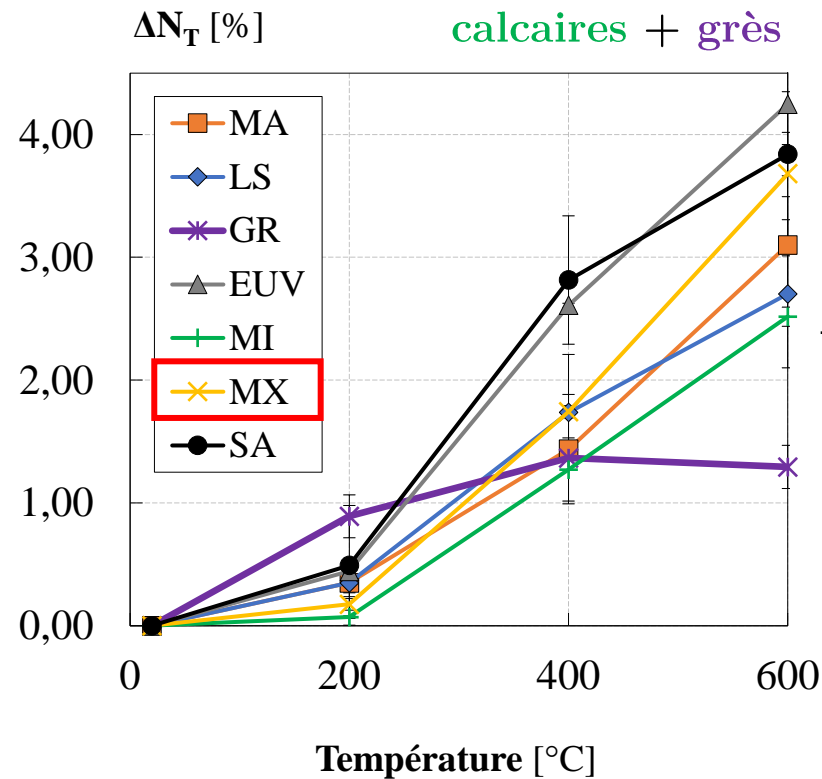
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

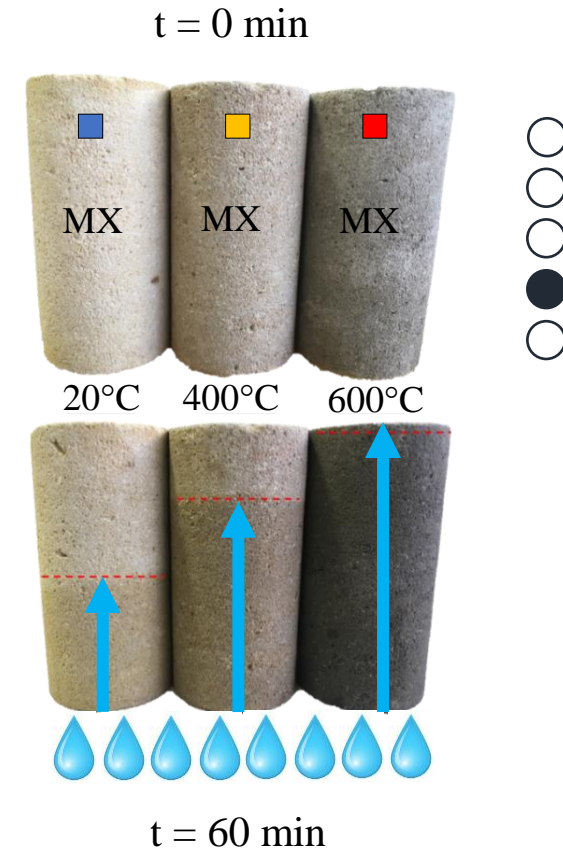
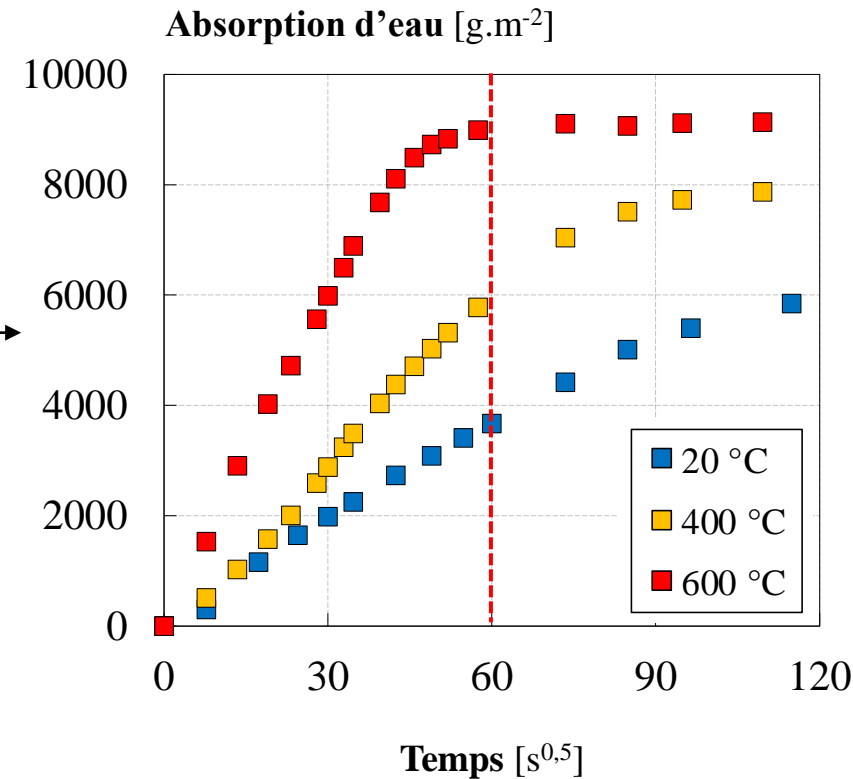
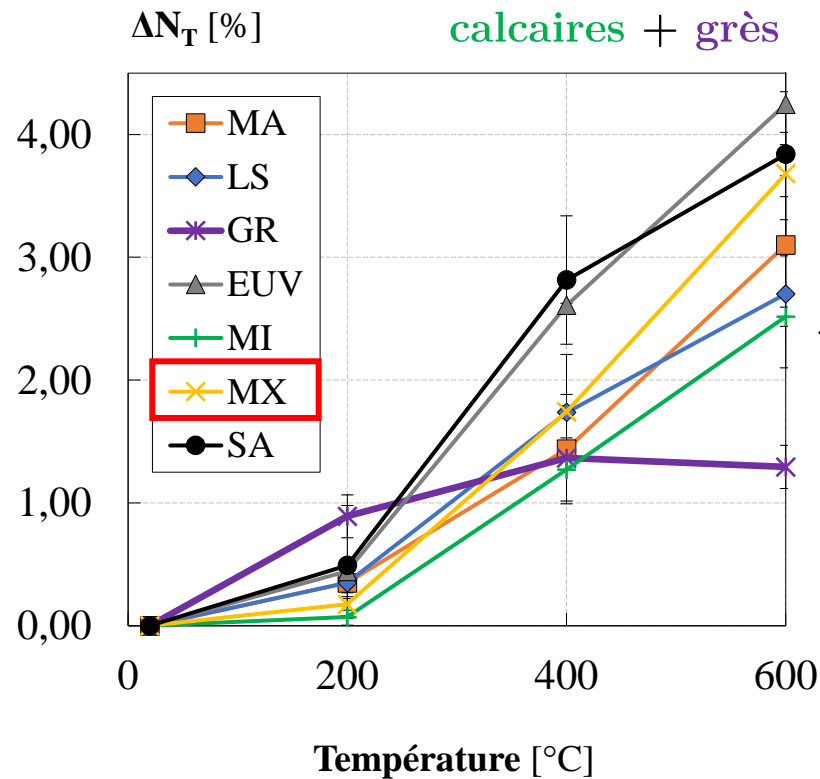
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

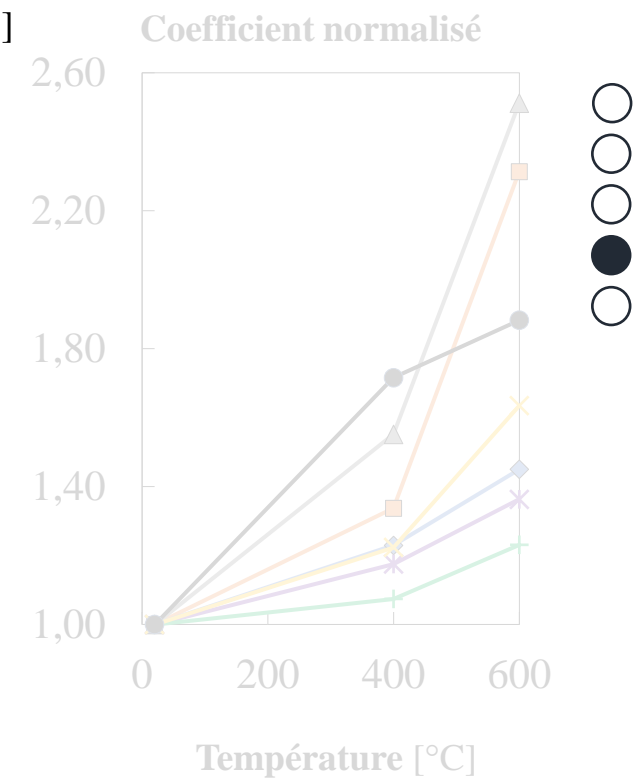
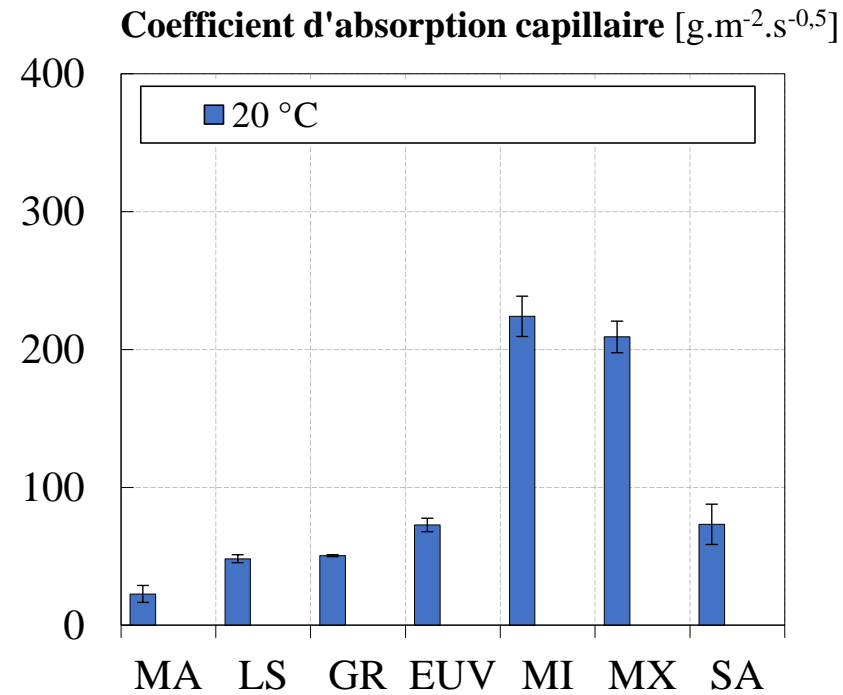
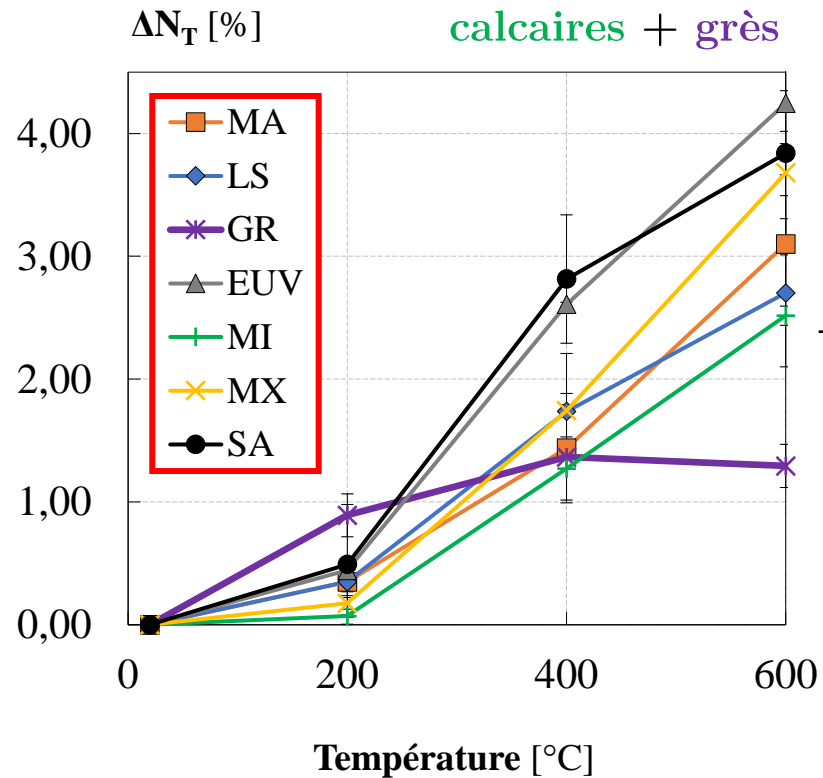
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

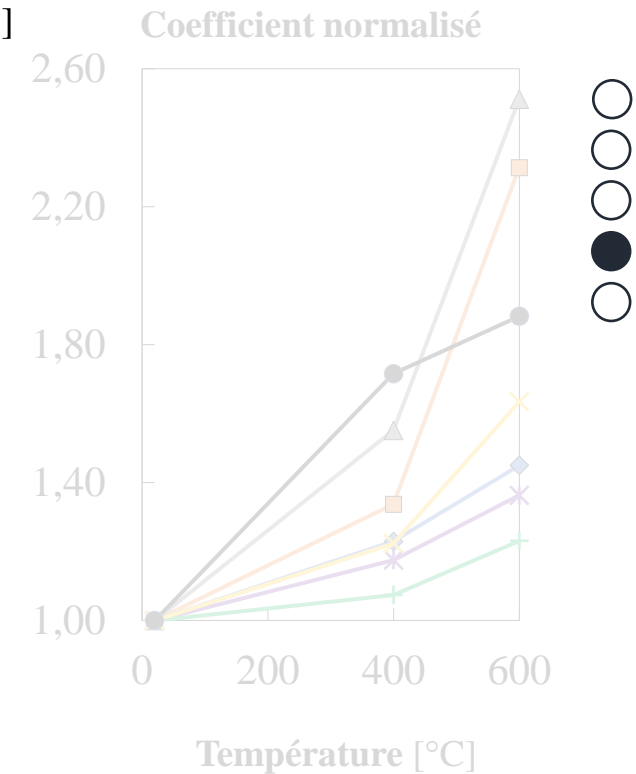
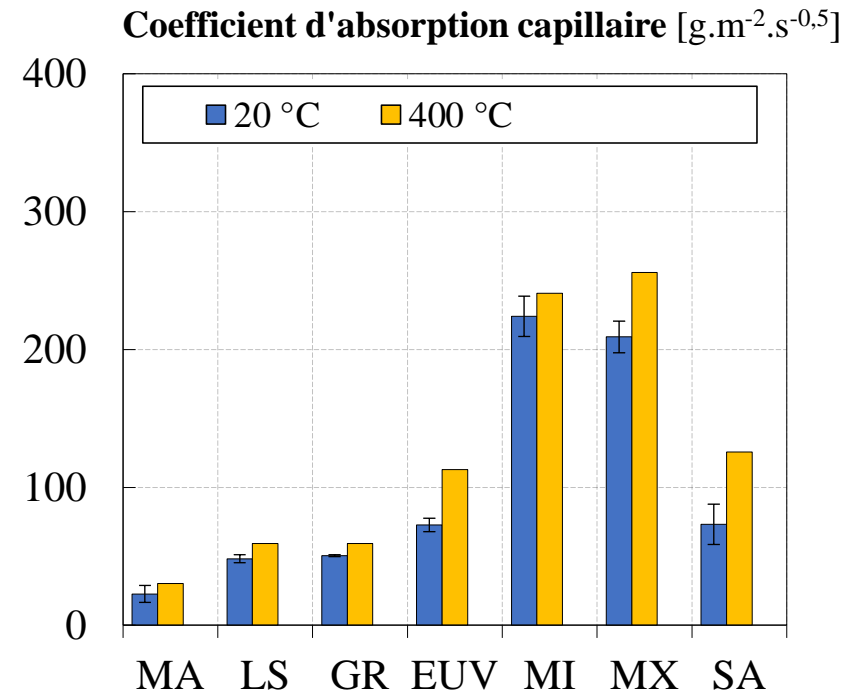
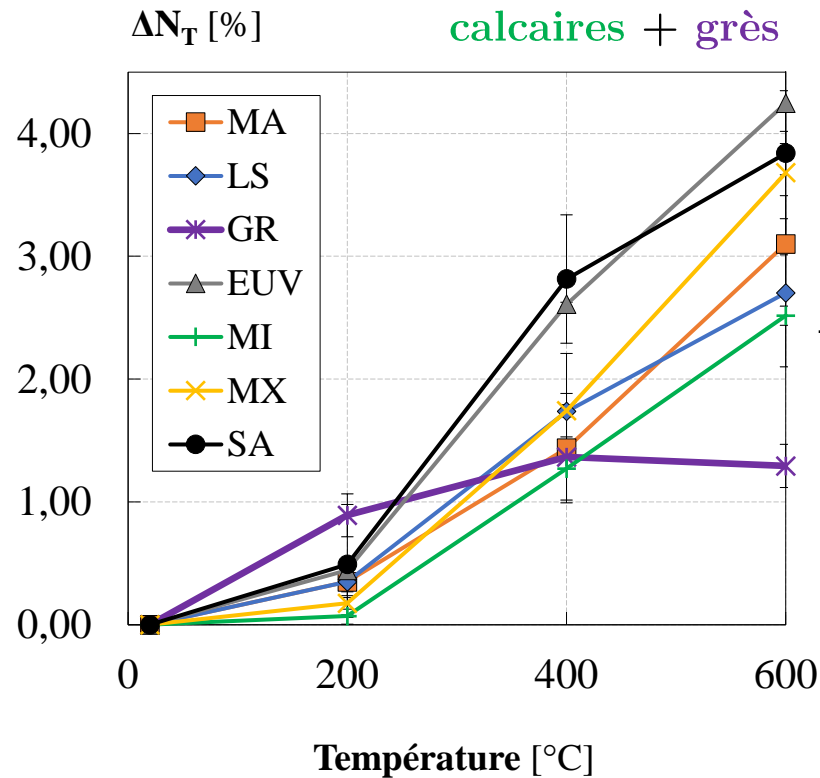
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

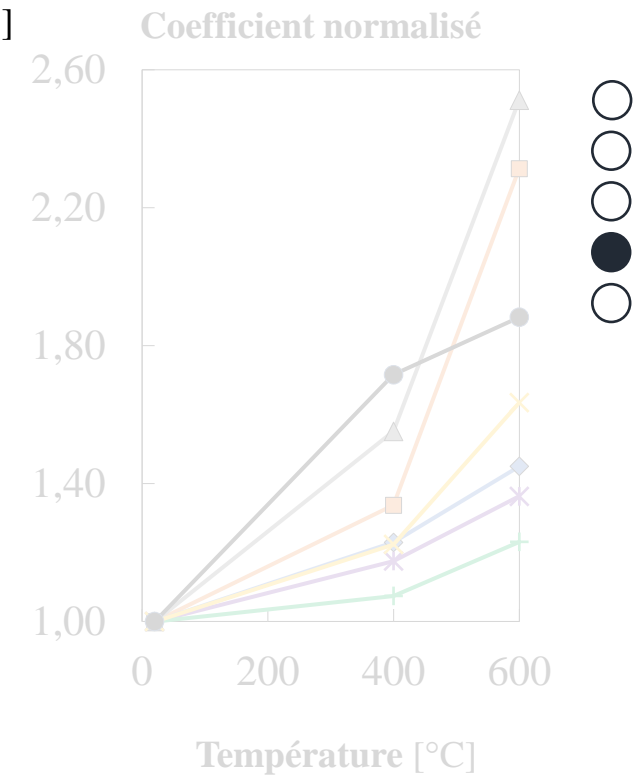
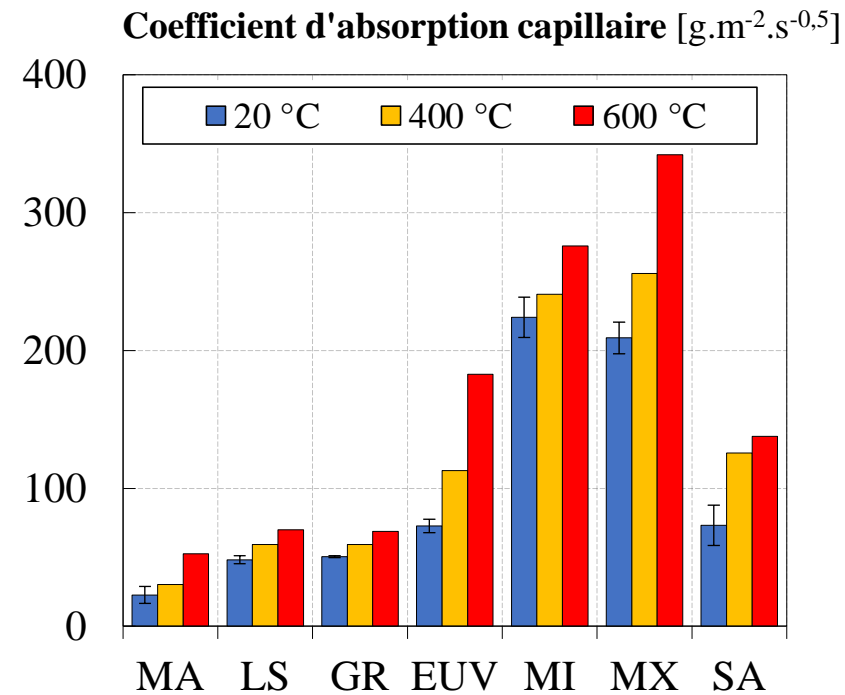
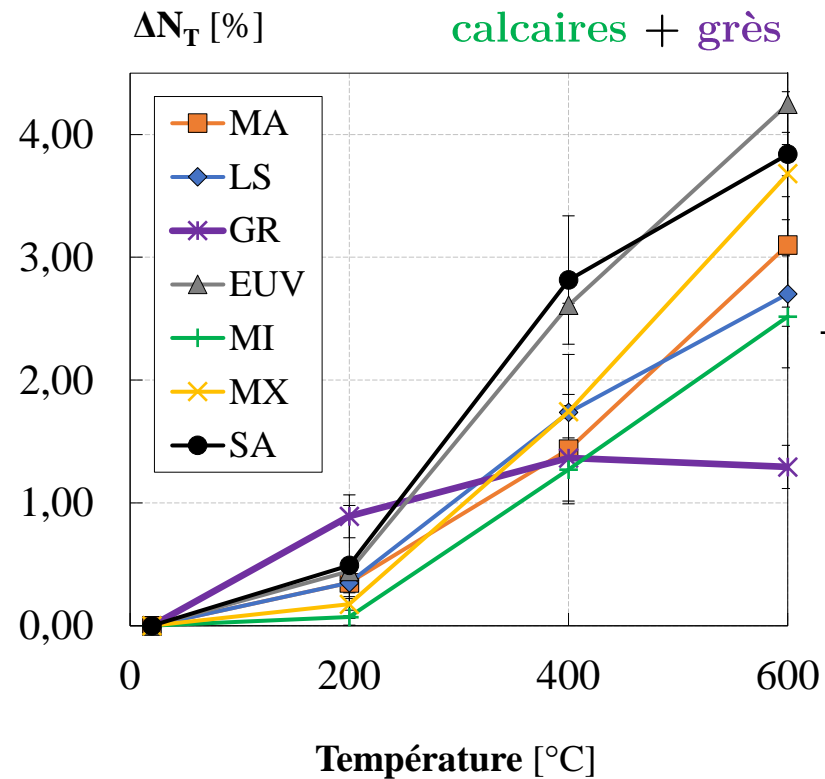
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

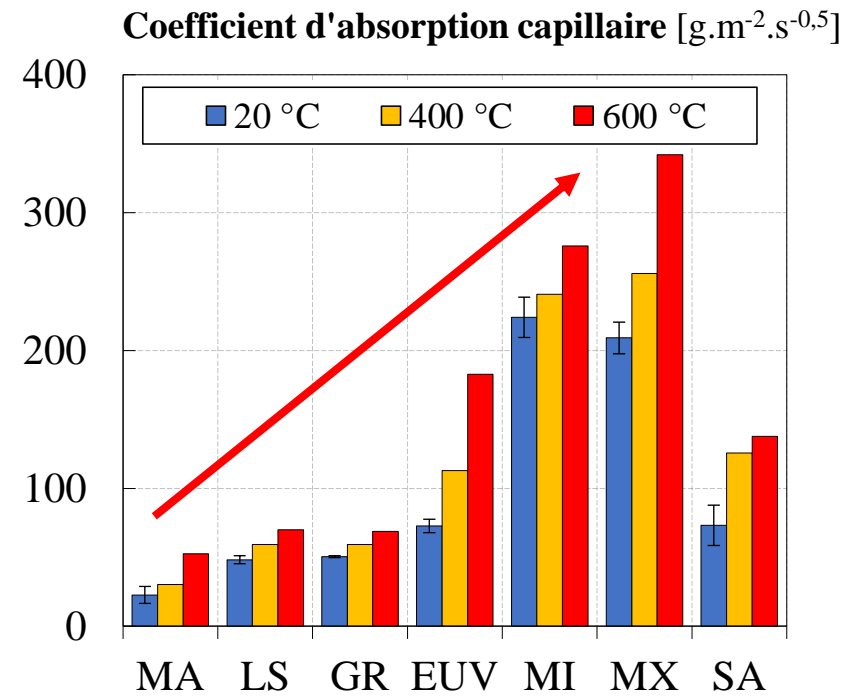
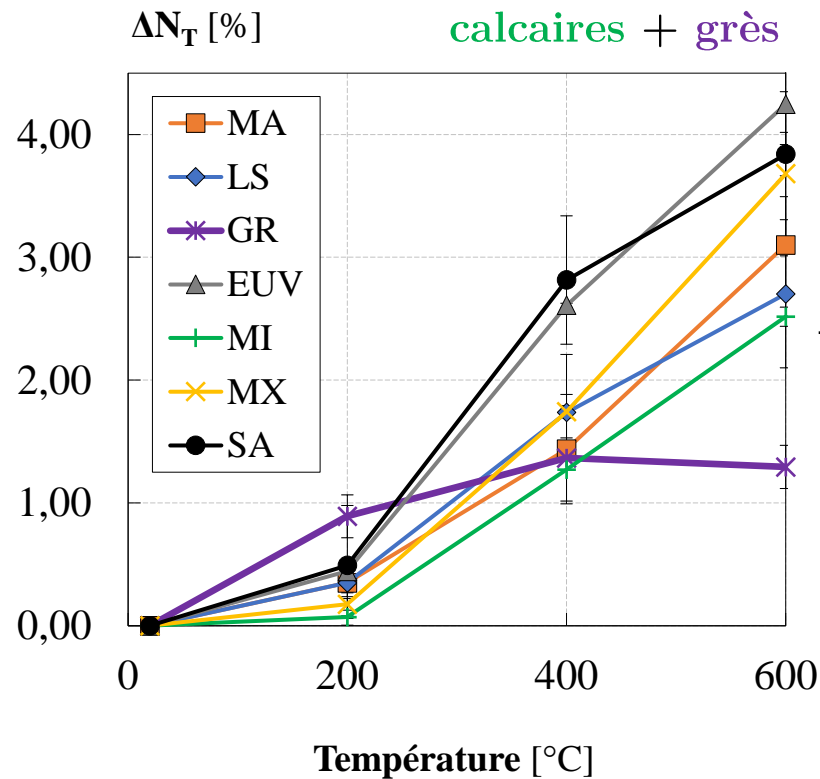
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

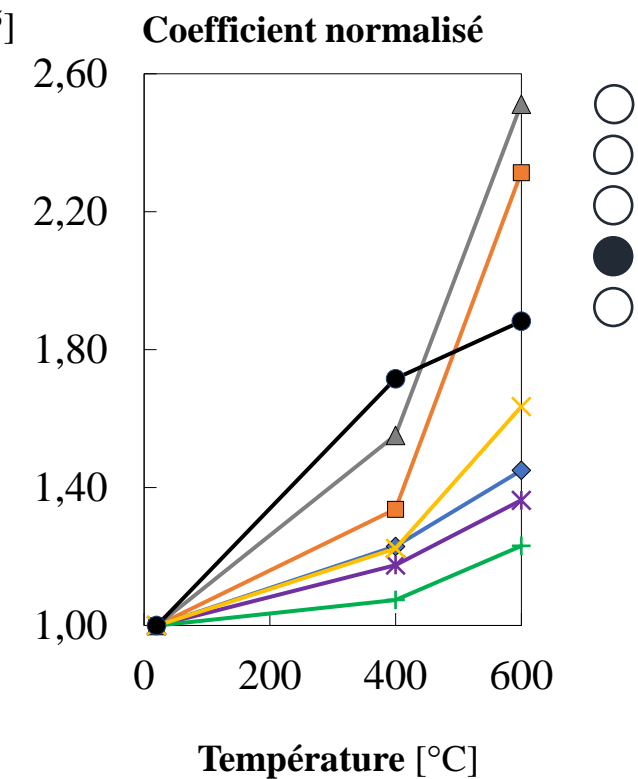
Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



■  générale du coefficient d'absorption



Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

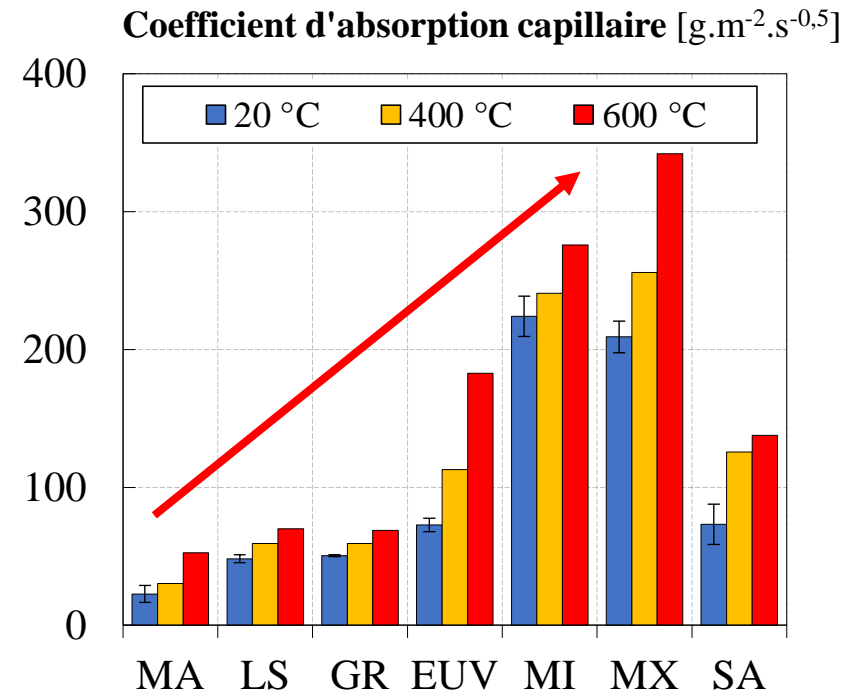
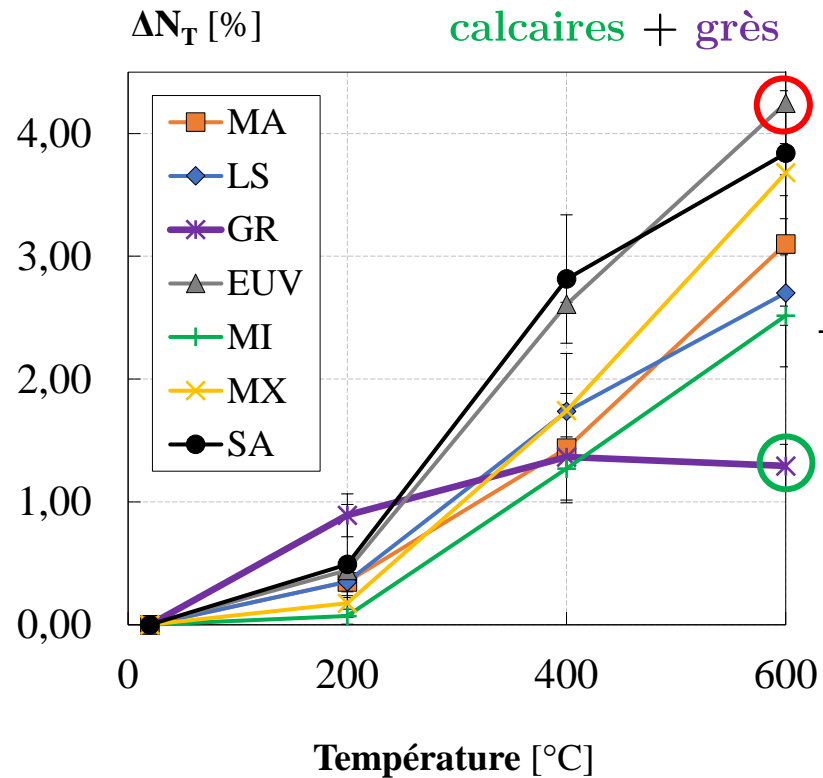
Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

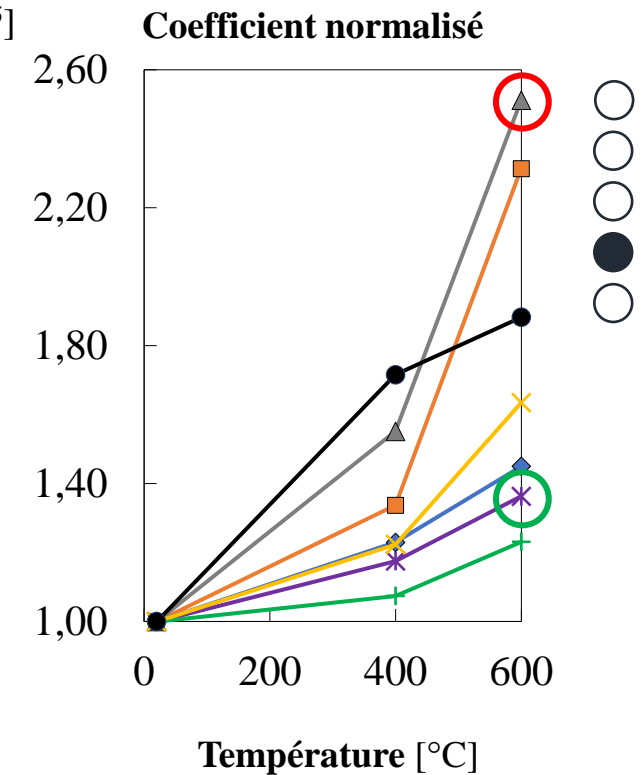
Propriétés de transfert

Porosité totale à l'eau

Absorption capillaire



■  générale du coefficient d'absorption



Comportement à haute température des pierres de construction

Essais expérimentaux *à chaud*

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

❑ Post-refroidissement après cycle de c/r à 800 °C

Evolution de l'état d'endommagement

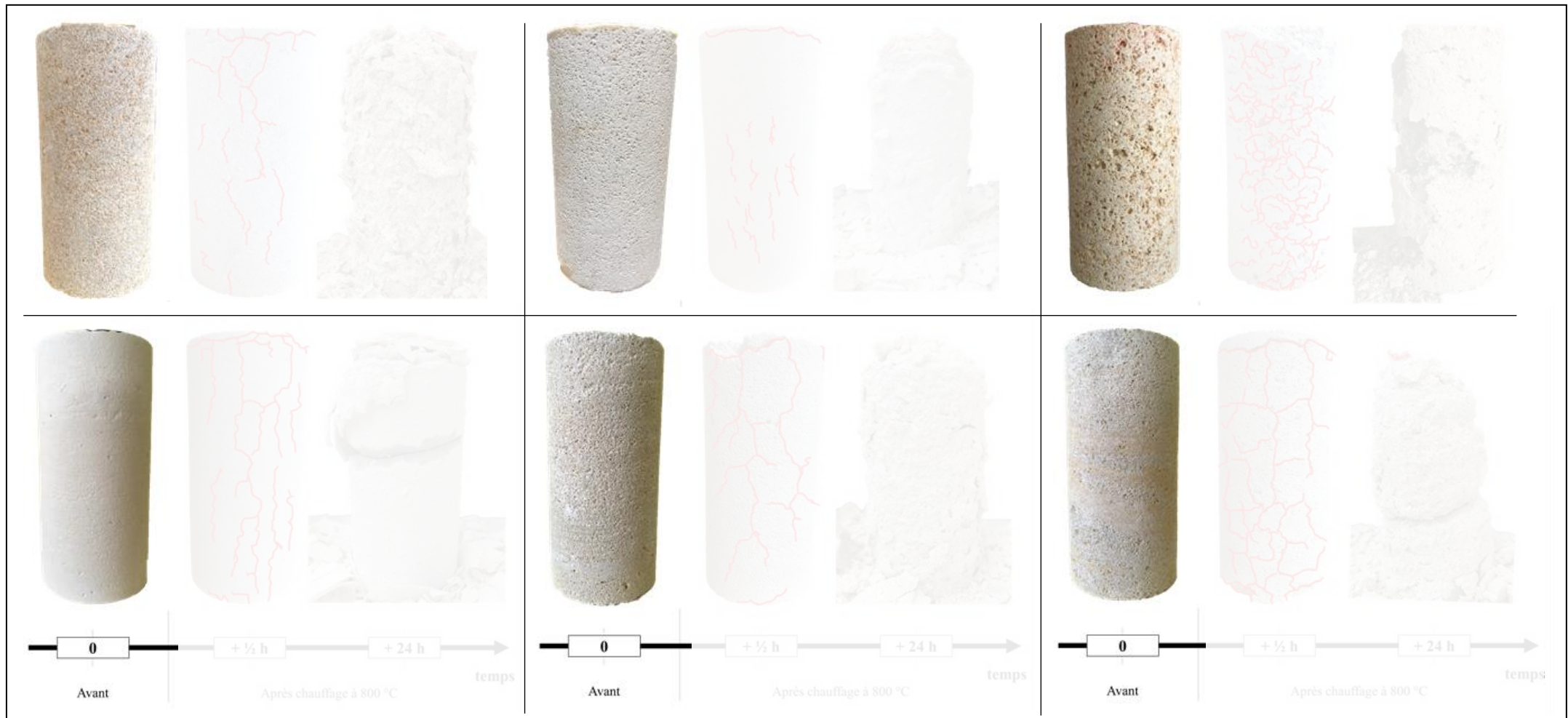


Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

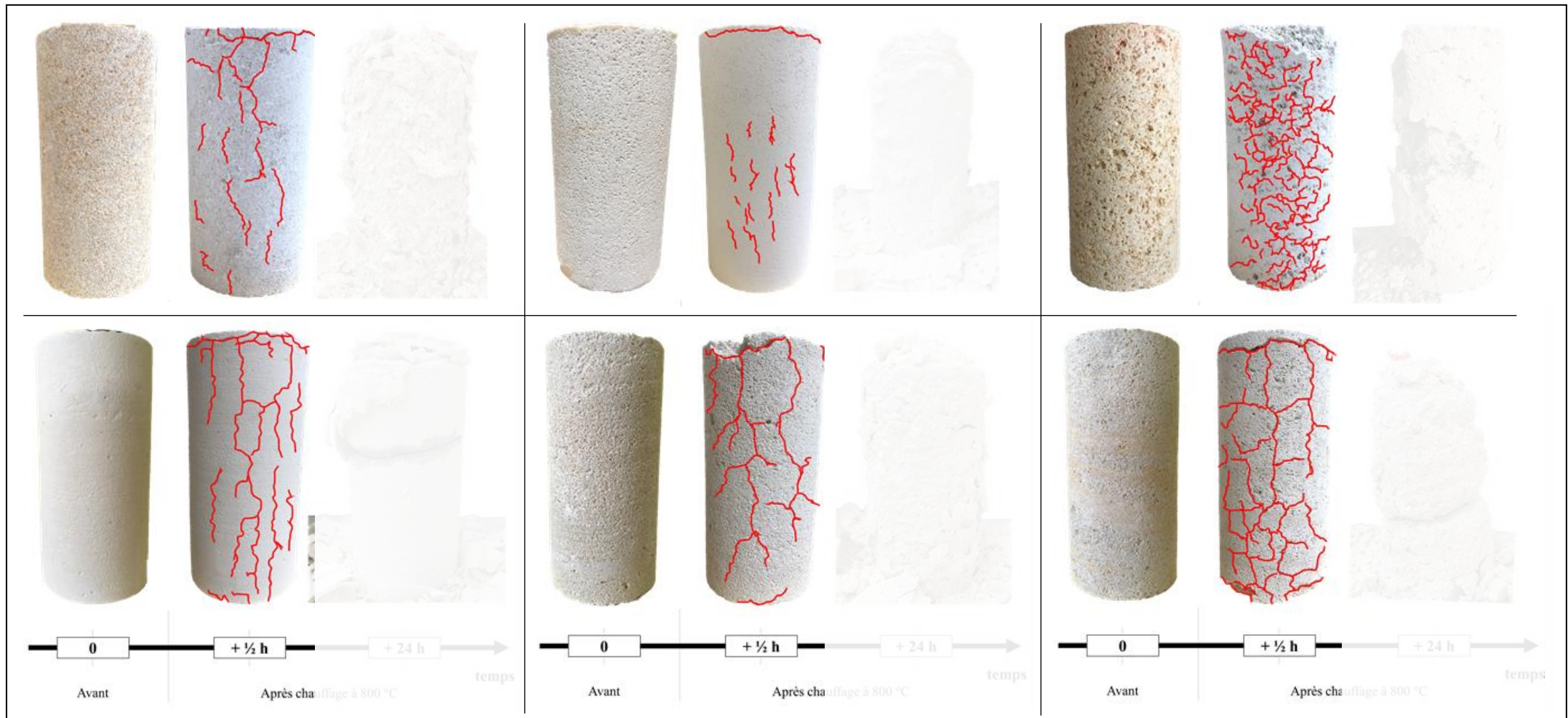


Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

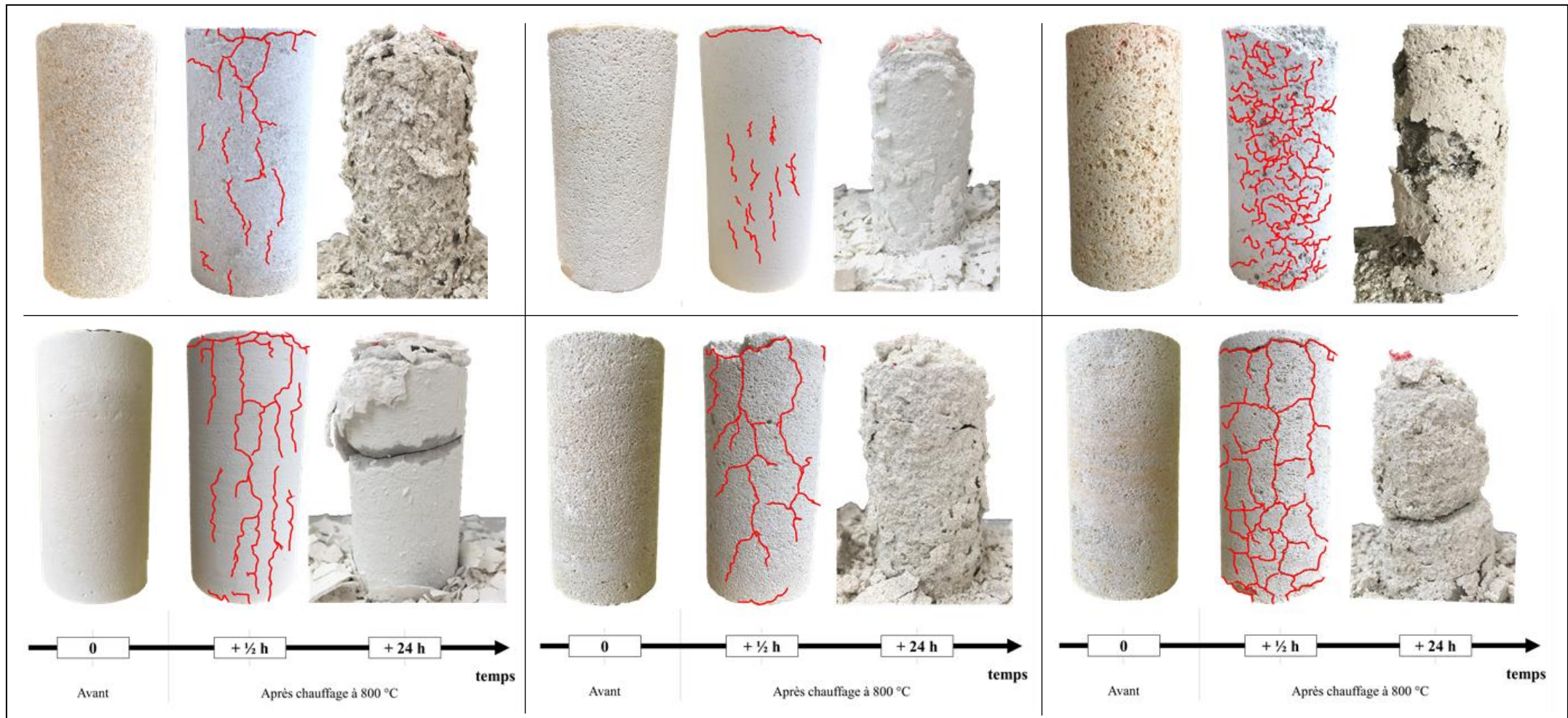


Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

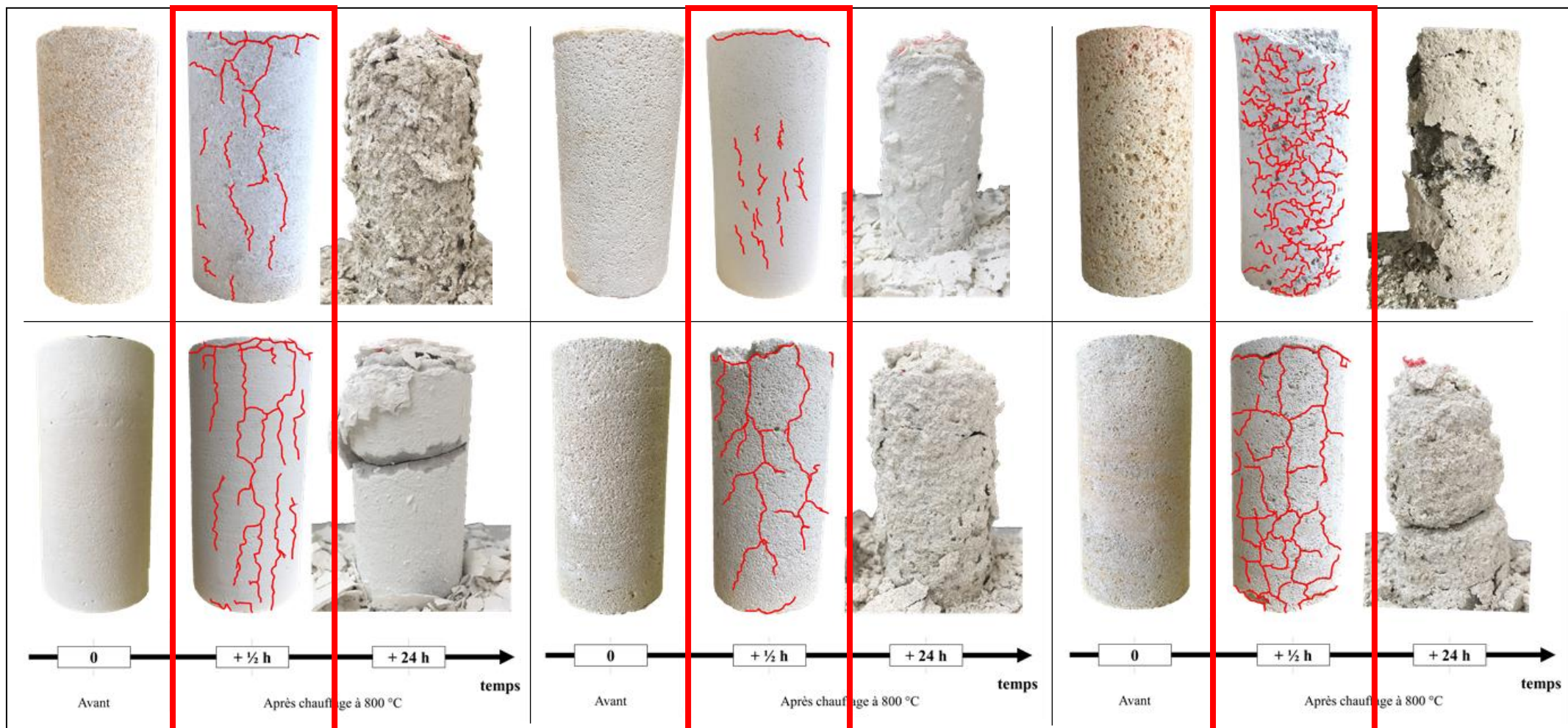


Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

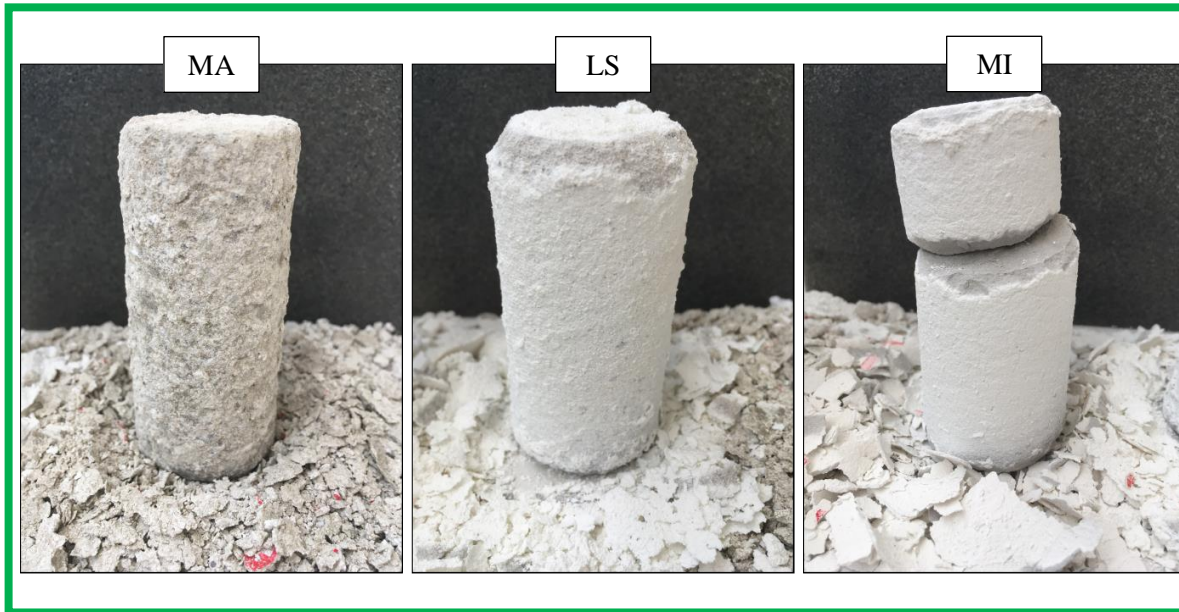


Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

 Post-refroidissement après cycle de c/r à 800 °C

Evolution de l'état d'endommagement

 $R_C = 27 \text{ MPa}$ $R_C = 18 \text{ MPa}$ $R_C = 16 \text{ MPa}$ 

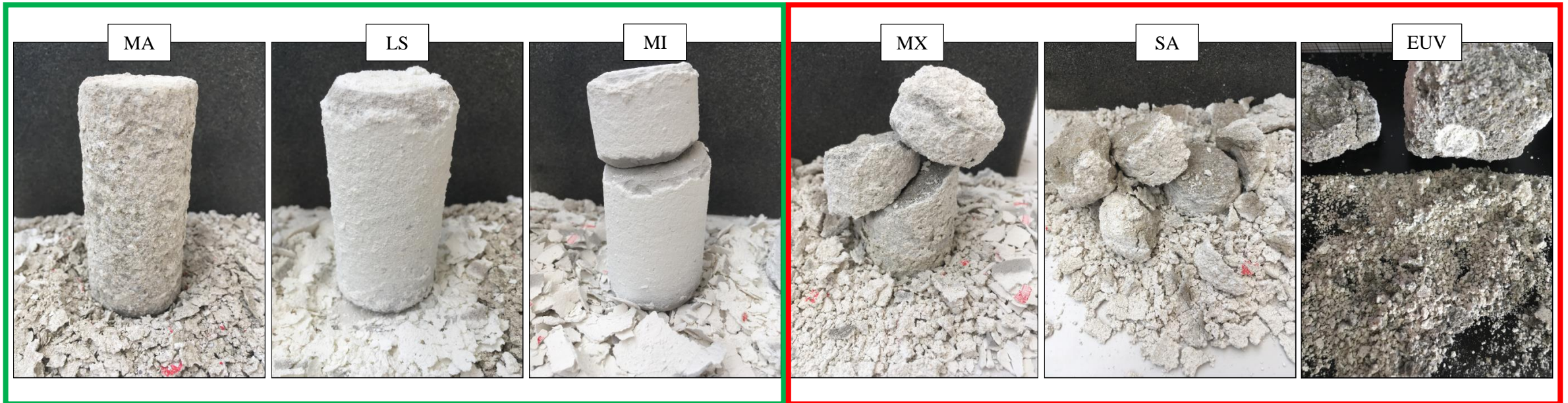
! Essais réalisés 30 min après refroidissement !

Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

❑ Post-refroidissement après cycle de c/r à 800 °C

Evolution de l'état d'endommagement

 $R_C = 27 \text{ MPa}$ $R_C = 18 \text{ MPa}$ $R_C = 16 \text{ MPa}$ $R_C < 5 \text{ MPa}$

! Essais réalisés 30 min après refroidissement !

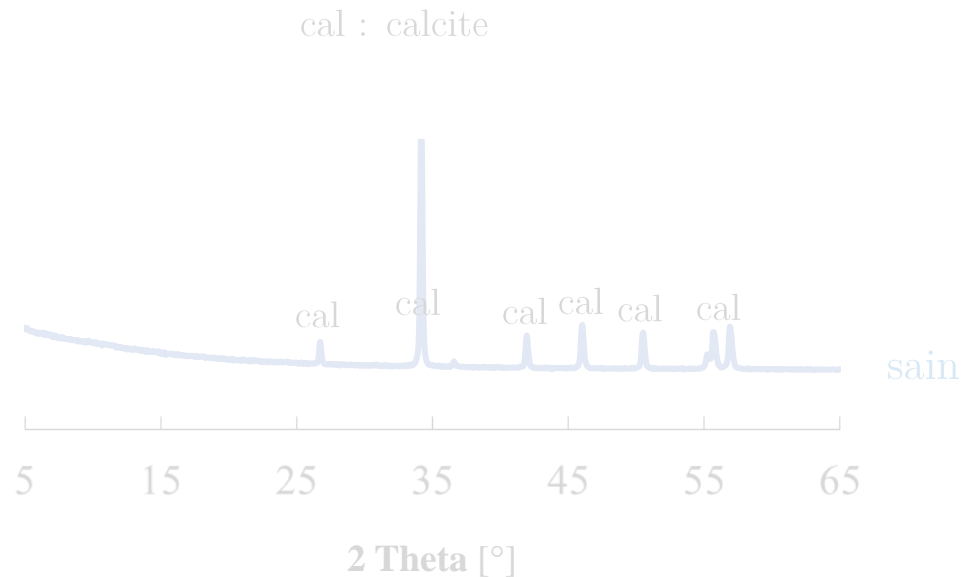
Comportement à haute température des pierres de construction 🔥

Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

Simulation numérique

❑ Post-refroidissement après cycle de c/r à 800 °C

Evolution de l'état d'endommagement



Diffractogramme DRX d'un calcaire : état sain vs post-800 °C



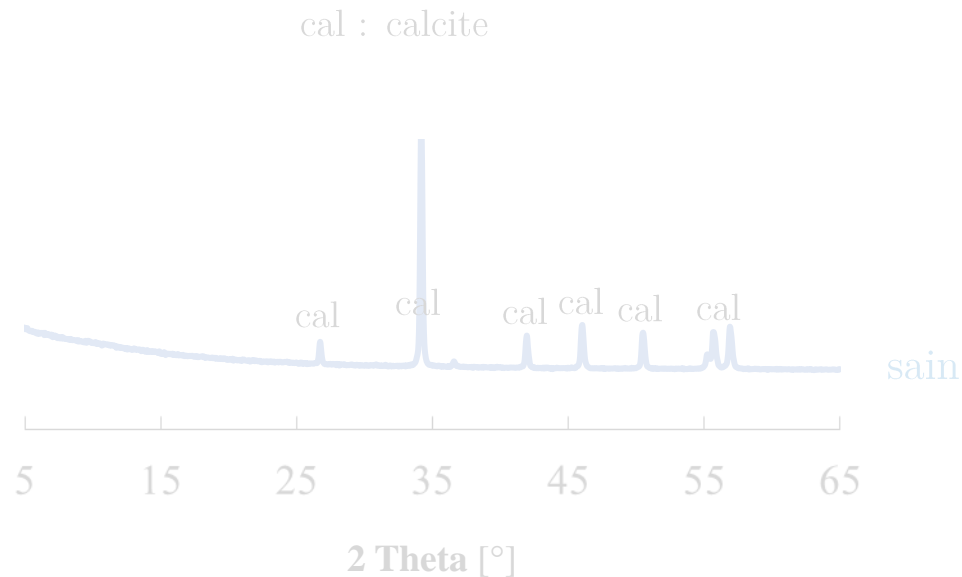
Formation de portlandite à partir de la surface

Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

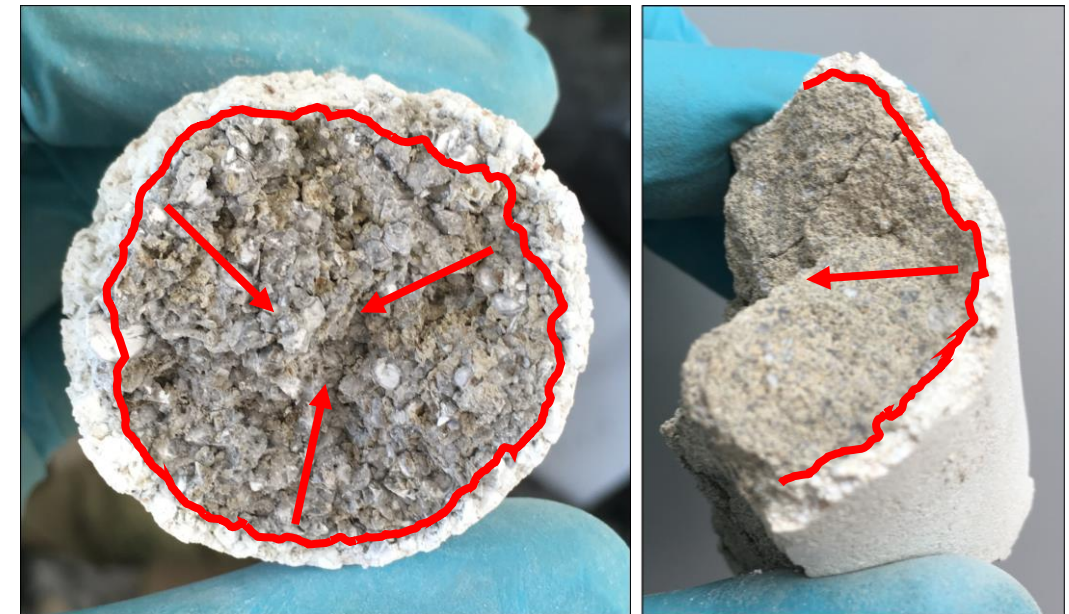
Simulation numérique

❑ Post-refroidissement après cycle de c/r à 800 °C

Evolution de l'état d'endommagement



Diffractogramme DRX d'un calcaire : état sain vs post-800 °C



Formation de portlandite à partir de la surface

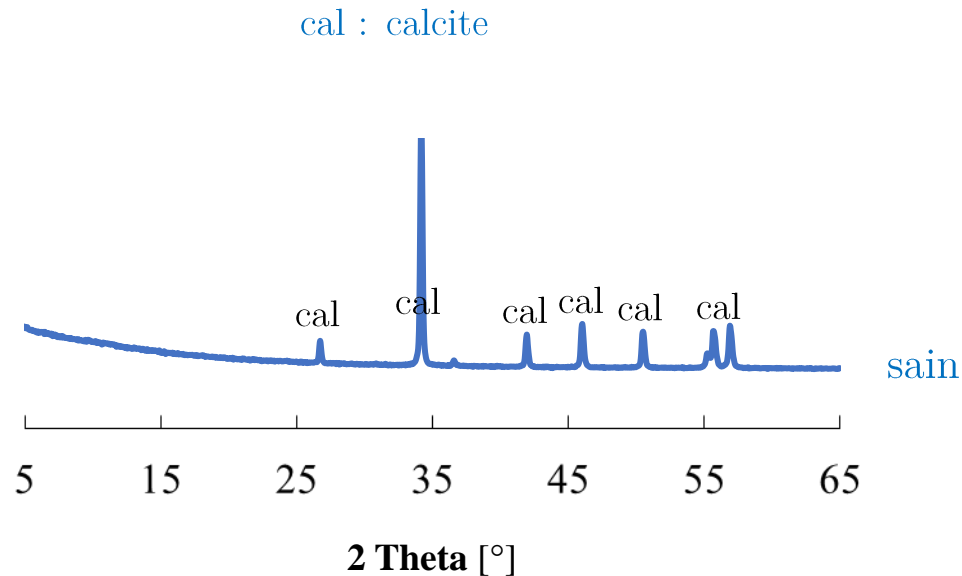
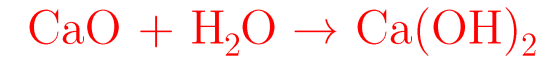


Comportement à haute température des pierres de construction Essais expérimentaux à *chaud*Essais expérimentaux *en résiduel*

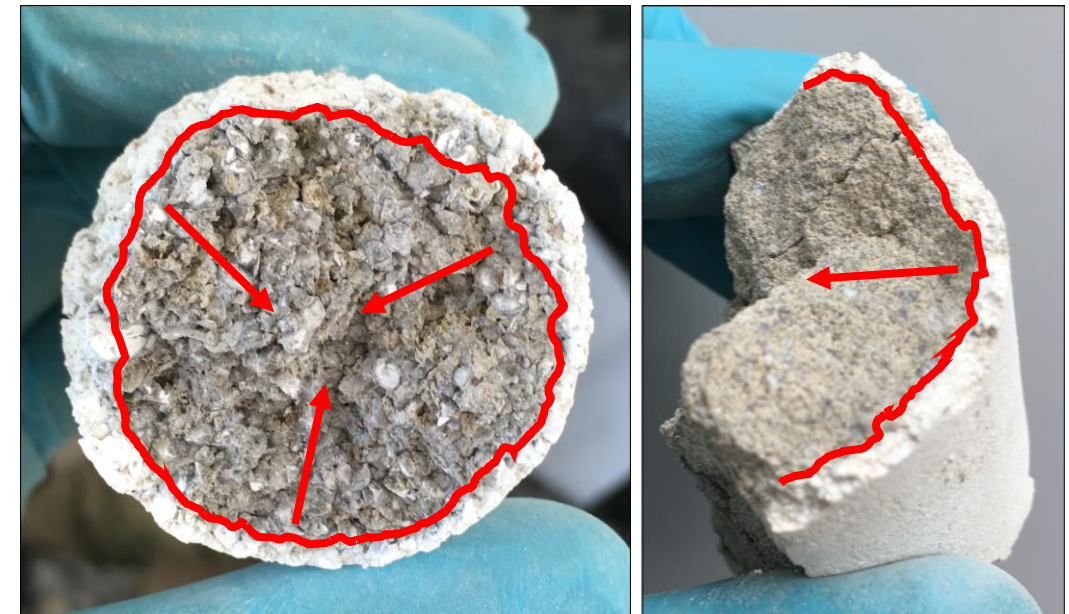
Simulation numérique

❑ Post-refroidissement après cycle de c/r à 800 °C

Evolution de l'état d'endommagement



Diffractogramme DRX d'un calcaire : état sain vs post-800 °C



Formation de portlandite à partir de la surface



Comportement à haute température des pierres de construction 

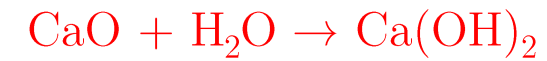
Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

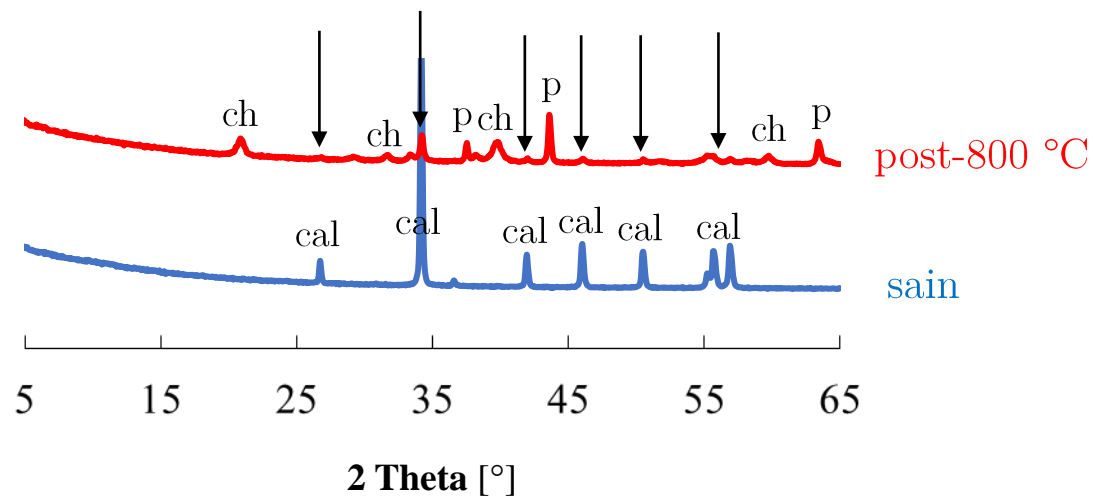
Simulation numérique

❑ Post-refroidissement après cycle de c/r à 800 °C

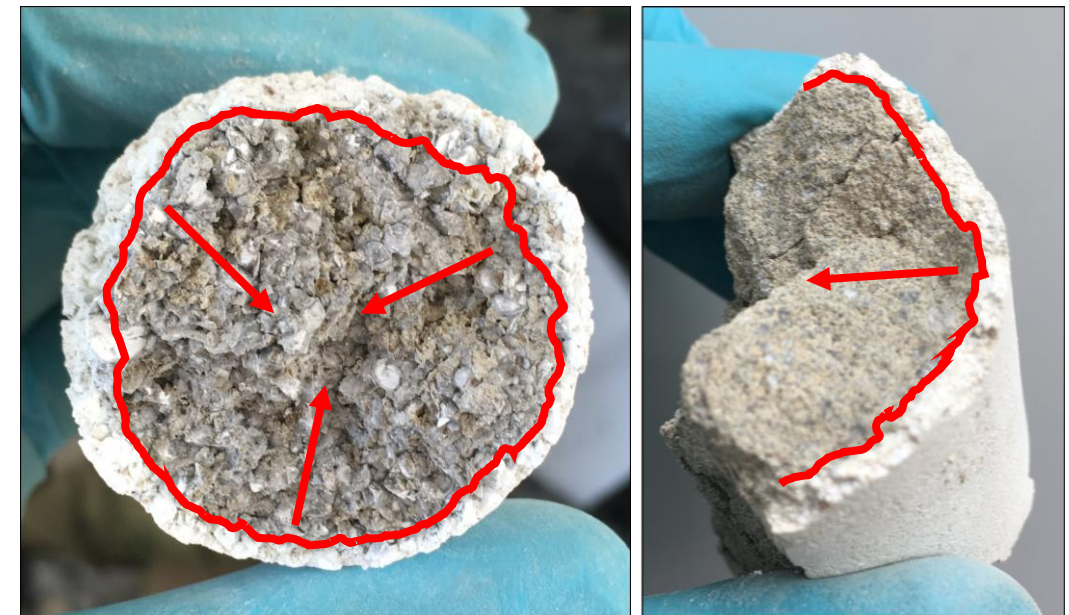
Evolution de l'état d'endommagement



ch : chaux
p : portlandite
cal : calcite



Diffractogramme DRX d'un calcaire : état sain vs post-800 °C



Formation de portlandite à partir de la surface

Comportement à haute température des pierres de construction 

Essais expérimentaux à chaud

Essais expérimentaux en résiduel

Simulation numérique

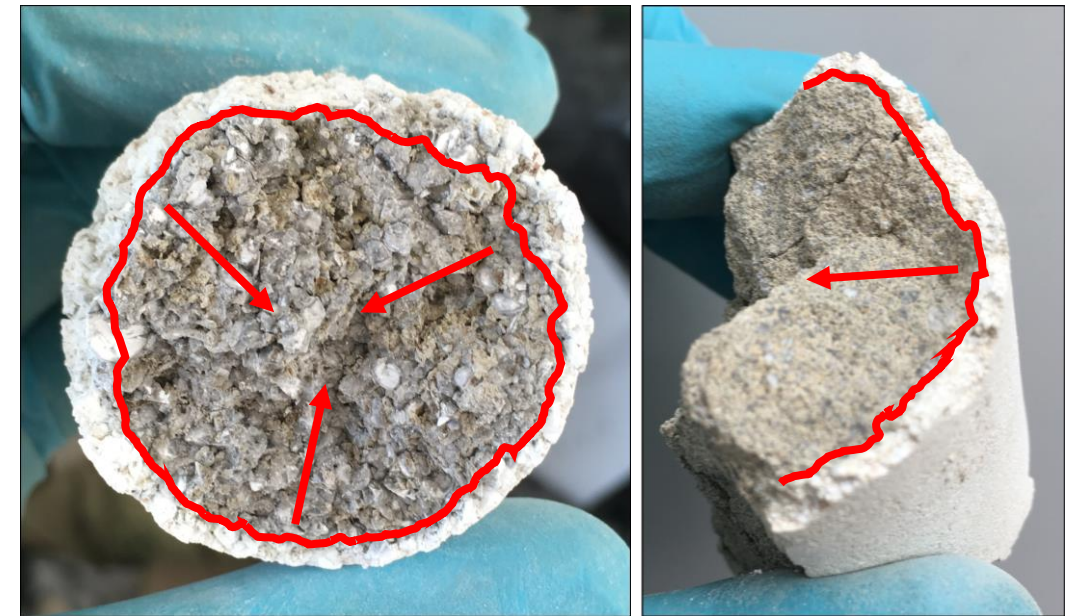
❑ Post-refroidissement après cycle de c/r à 800 °C

Evolution de l'état d'endommagement

Effets immédiats d'un apport d'eau



*Calcaire post-800 °C,
après refroidissement, au
contact d'eau*



Formation de portlandite à partir de la surface

❑ Identification des mécanismes élémentaires : influence de la composition minéralogique, texture, taille de grains

- Stabilité thermo-chimique des pierres liée à la nature du minéral prédominant : grès étudié vs pierres calcaires
 - grès : aucune perte de masse | dilatation progressive jusqu'à 573 °C puis stagnation
 - calcaires : décarbonation de la calcite (700-930 °C) : 44 % perte de masse | dilatation jusqu'à 880 °C puis contraction
- Paramètres secondaires augmentant la sensibilité à HT : large taille de grains, composition poly-minérale

❑ Évaluation des effets de hautes températures sur les propriétés résiduelles des pierres altérées

- Sur les performances mécaniques : comportement meilleur du grès étudié face à la majorité des calcaires
 - pertes mécaniques modérées jusqu'à 400 °C, puis pertes (parfois) importantes jusqu'à 800 °C
- Sur la durabilité à court et moyen terme :
 - altération du réseau poreux → augmentation de la capacité d'absorption d'eau
 - au-delà de 700 °C : impact néfaste et immédiat de l'eau sur la désagrégation de la pierre

❑ Contribution au diagnostic post-incendie des pierres soumises à de hautes températures

- Estimation de la température maximale atteinte par la pierre : colorimétrie, analyses DRX, vitesse des ondes P
- Prédiction de l'évolution des performances mécaniques à différents niveaux de température (par méthode non-destructive)
- Simulation par méthodes numériques : détermination du profil de température et cartographie d'endommagement

❑ Identification des mécanismes élémentaires : influence de la composition minéralogique, texture, taille de grains

- Stabilité thermo-chimique des pierres liée à la nature du minéral prédominant : grès étudié vs pierres calcaires
 - grès : aucune perte de masse | dilatation progressive jusqu'à 573 °C puis stagnation
 - calcaires : décarbonation de la calcite (700-930 °C) : 44 % perte de masse | dilatation jusqu'à 880 °C puis contraction
- Paramètres secondaires augmentant la sensibilité à HT : large taille de grains, composition poly-minérale

❑ Évaluation des effets de hautes températures sur les propriétés résiduelles des pierres altérées

- Sur les performances mécaniques : comportement meilleur du grès étudié face à la majorité des calcaires
 - pertes mécaniques modérées jusqu'à 400 °C, puis pertes (parfois) importantes jusqu'à 800 °C
- Sur la durabilité à court et moyen terme :
 - altération du réseau poreux → augmentation de la capacité d'absorption d'eau
 - au-delà de 700 °C : impact néfaste et immédiat de l'eau sur la désagrégation de la pierre

❑ Contribution au diagnostic post-incendie des pierres soumises à de hautes températures

- Estimation de la température maximale atteinte par la pierre : colorimétrie, analyses DRX, vitesse des ondes P
- Prédiction de l'évolution des performances mécaniques à différents niveaux de température (par méthode non-destructive)
- Simulation par méthodes numériques : détermination du profil de température et cartographie d'endommagement

❑ Identification des mécanismes élémentaires : influence de la composition minéralogique, texture, taille de grains

- Stabilité thermo-chimique des pierres liée à la nature du minéral prédominant : grès étudié vs pierres calcaires
 - grès : aucune perte de masse | dilatation progressive jusqu'à 573 °C puis stagnation
 - calcaires : décarbonation de la calcite (700-930 °C) : 44 % perte de masse | dilatation jusqu'à 880 °C puis contraction
- Paramètres secondaires augmentant la sensibilité à HT : large taille de grains, composition poly-minérale

❑ Évaluation des effets de hautes températures sur les propriétés résiduelles des pierres altérées

- Sur les performances mécaniques : comportement meilleur du grès étudié face à la majorité des calcaires
 - pertes mécaniques modérées jusqu'à 400 °C, puis pertes (parfois) importantes jusqu'à 800 °C
- Sur la durabilité à court et moyen terme :
 - altération du réseau poreux → augmentation de la capacité d'absorption d'eau
 - au-delà de 700 °C : impact néfaste et immédiat de l'eau sur la désagrégation de la pierre

❑ Contribution au diagnostic post-incendie des pierres soumises à de hautes températures

- Estimation de la température maximale atteinte par la pierre : colorimétrie, analyses DRX, vitesse des ondes P
- Prédiction de l'évolution des performances mécaniques à différents niveaux de température (par méthode non-destructive)
- Simulation par méthodes numériques : détermination du profil de température et cartographie d'endommagement

❑ Identification des mécanismes élémentaires : influence de la composition minéralogique, texture, taille de grains

- Stabilité thermo-chimique des pierres liée à la nature du minéral prédominant : grès étudié vs pierres calcaires
 - grès : aucune perte de masse | dilatation progressive jusqu'à 573 °C puis stagnation
 - calcaires : décarbonation de la calcite (700-930 °C) : 44 % perte de masse | dilatation jusqu'à 880 °C puis contraction
- Paramètres secondaires augmentant la sensibilité à HT : large taille de grains, composition poly-minérale

❑ Évaluation des effets de hautes températures sur les propriétés résiduelles des pierres altérées

- Sur les performances mécaniques : comportement meilleur du grès étudié face à la majorité des calcaires
 - pertes mécaniques modérées jusqu'à 400 °C, puis pertes (parfois) importantes jusqu'à 800 °C
- Sur la durabilité à court et moyen terme :
 - altération du réseau poreux → augmentation de la capacité d'absorption d'eau
 - au-delà de 700 °C : impact néfaste et immédiat de l'eau sur la désagrégation de la pierre

❑ Contribution au diagnostic post-incendie des pierres soumises à de hautes températures

- Estimation de la température maximale atteinte par la pierre : colorimétrie, analyses DRX, vitesse des ondes P
- Prédiction de l'évolution des performances mécaniques à différents niveaux de température (par méthode non-destructive)
- Simulation par méthodes numériques : détermination du profil de température et cartographie d'endommagement

❑ Identification des mécanismes élémentaires : influence de la composition minéralogique, texture, taille de grains

- Stabilité thermo-chimique des pierres liée à la nature du minéral prédominant : grès étudié vs pierres calcaires
 - grès : aucune perte de masse | dilatation progressive jusqu'à 573 °C puis stagnation
 - calcaires : décarbonation de la calcite (700-930 °C) : 44 % perte de masse | dilatation jusqu'à 880 °C puis contraction
- Paramètres secondaires augmentant la sensibilité à HT : large taille de grains, composition poly-minérale

❑ Évaluation des effets de hautes températures sur les propriétés résiduelles des pierres altérées

- Sur les performances mécaniques : comportement meilleur du grès étudié face à la majorité des calcaires
 - pertes mécaniques modérées jusqu'à 400 °C, puis pertes (parfois) importantes jusqu'à 800 °C
- Sur la durabilité à court et moyen terme :
 - altération du réseau poreux → augmentation de la capacité d'absorption d'eau
 - au-delà de 700 °C : impact néfaste et immédiat de l'eau sur la désagrégation de la pierre

❑ Contribution au diagnostic post-incendie des pierres soumises à de hautes températures

- Estimation de la température maximale atteinte par la pierre : colorimétrie, analyses DRX, vitesse des ondes P
- Prédiction de l'évolution des performances mécaniques à différents niveaux de température (par méthode non-destructive)
- Simulation par méthodes numériques : détermination du profil de température et cartographie d'endommagement

❑ Identification des mécanismes élémentaires : influence de la composition minéralogique, texture, taille de grains

- Stabilité thermo-chimique des pierres liée à la nature du minéral prédominant : grès étudié vs pierres calcaires
 - grès : aucune perte de masse | dilatation progressive jusqu'à 573 °C puis stagnation
 - calcaires : décarbonation de la calcite (700-930 °C) : 44 % perte de masse | dilatation jusqu'à 880 °C puis contraction
- Paramètres secondaires augmentant la sensibilité à HT : large taille de grains, composition poly-minérale

❑ Évaluation des effets de hautes températures sur les propriétés résiduelles des pierres altérées

- Sur les performances mécaniques : comportement meilleur du grès étudié face à la majorité des calcaires
 - pertes mécaniques modérées jusqu'à 400 °C, puis pertes (parfois) importantes jusqu'à 800 °C
- Sur la durabilité à court et moyen terme :
 - altération du réseau poreux → augmentation de la capacité d'absorption d'eau
 - au-delà de 700 °C : impact néfaste et immédiat de l'eau sur la désagrégation de la pierre

❑ Contribution au diagnostic post-incendie des pierres soumises à de hautes températures

- Estimation de la température maximale atteinte par la pierre : colorimétrie, analyses DRX, vitesse des ondes P
- Prédiction de l'évolution des performances mécaniques à différents niveaux de température (par méthode non-destructive)
- Simulation par méthodes numériques : détermination du profil de température et cartographie d'endommagement

❑ Identification des mécanismes élémentaires : influence de la composition minéralogique, texture, taille de grains

- Stabilité thermo-chimique des pierres liée à la nature du minéral prédominant : grès étudié vs pierres calcaires
 - grès : aucune perte de masse | dilatation progressive jusqu'à 573 °C puis stagnation
 - calcaires : décarbonation de la calcite (700-930 °C) : 44 % perte de masse | dilatation jusqu'à 880 °C puis contraction
- Paramètres secondaires augmentant la sensibilité à HT : large taille de grains, composition poly-minérale

❑ Évaluation des effets de hautes températures sur les propriétés résiduelles des pierres altérées

- Sur les performances mécaniques : comportement meilleur du grès étudié face à la majorité des calcaires
 - pertes mécaniques modérées jusqu'à 400 °C, puis pertes (parfois) importantes jusqu'à 800 °C
- Sur la durabilité à court et moyen terme :
 - altération du réseau poreux → augmentation de la capacité d'absorption d'eau
 - au-delà de 700 °C : impact néfaste et immédiat de l'eau sur la désagrégation de la pierre

❑ Contribution au diagnostic post-incendie des pierres soumises à de hautes températures

- Estimation de la température maximale atteinte par la pierre : colorimétrie, analyses DRX, vitesse des ondes P
- Prédiction de l'évolution des performances mécaniques à différents niveaux de température (par méthode non-destructive)
- Simulation par méthodes numériques : détermination du profil de température et cartographie d'endommagement

❑ Identification des mécanismes élémentaires : influence de la composition minéralogique, texture, taille de grains

- Stabilité thermo-chimique des pierres liée à la nature du minéral prédominant : grès étudié vs pierres calcaires
 - grès : aucune perte de masse | dilatation progressive jusqu'à 573 °C puis stagnation
 - calcaires : décarbonation de la calcite (700-930 °C) : 44 % perte de masse | dilatation jusqu'à 880 °C puis contraction
- Paramètres secondaires augmentant la sensibilité à HT : large taille de grains, composition poly-minérale

❑ Évaluation des effets de hautes températures sur les propriétés résiduelles des pierres altérées

- Sur les performances mécaniques : comportement meilleur du grès étudié face à la majorité des calcaires
 - pertes mécaniques modérées jusqu'à 400 °C, puis pertes (parfois) importantes jusqu'à 800 °C
- Sur la durabilité à court et moyen terme :
 - altération du réseau poreux → augmentation de la capacité d'absorption d'eau
 - au-delà de 700 °C : impact néfaste et immédiat de l'eau sur la désagrégation de la pierre

❑ Contribution au diagnostic post-incendie des pierres soumises à de hautes températures

- Estimation de la température maximale atteinte par la pierre : colorimétrie, analyses DRX, vitesse des ondes P
- Prédiction de l'évolution des performances mécaniques à différents niveaux de température (par méthode non-destructive)
- Simulation par méthodes numériques : détermination du profil de température et cartographie d'endommagement

Poursuite des travaux de recherche, à travers le projet **POSTFIRE** à venir...

Partenaires :

- **L2MGC** – CY Cergy Paris Université
- **CTMNC** – Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction
- **CSTB** – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
- **LRMH** – Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques
- **LAME** – Université d'Orléans
- **ROCAMAT**

(Financement ANR)

Merci de votre attention

Martin VIGROUX

Chef de projet - bâtiment Pierre Naturelle

Tel : +33 (0) 1 45 37 77 89

Mobile : +33 (0) 7 88 49 53 68

E-mail : vigroux.m@ctmnc.fr

Contact :

Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction

17, rue Letellier - 75 015 PARIS

200, avenue Général de Gaulle - 92 140 CLAMART

