

Quantification du potentiel de stockage du carbone dans les bétons à granulats recyclés

Présentée et soutenue par

Meriem GUESSOUM

13-01-2026

Directrice de thèse : Fouzia KHADRAOUI-MEHIR

Co-directeur : Daniel CHATEIGNER

Encadrant : Bouha EL MOUSTAPHA

Plan de présentation

01. Introduction

04. Analyse des résultats

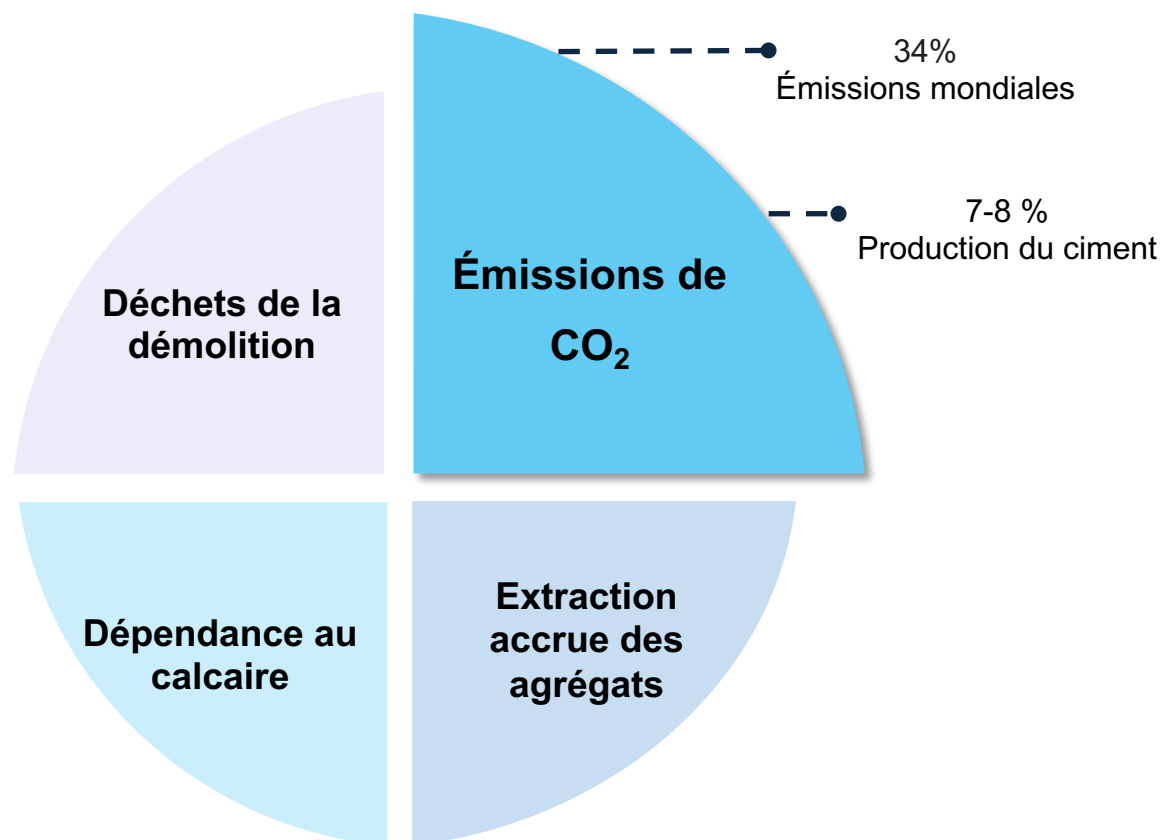
02. Problématique et Objectifs

05. Conclusions et perspectives

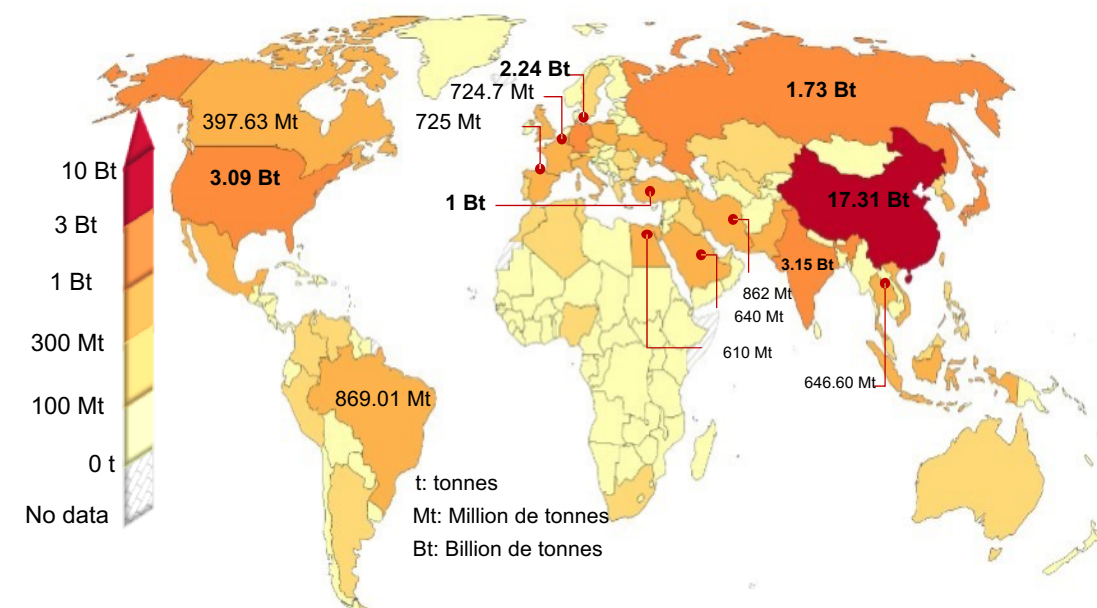
03. Méthodologie

Introduction

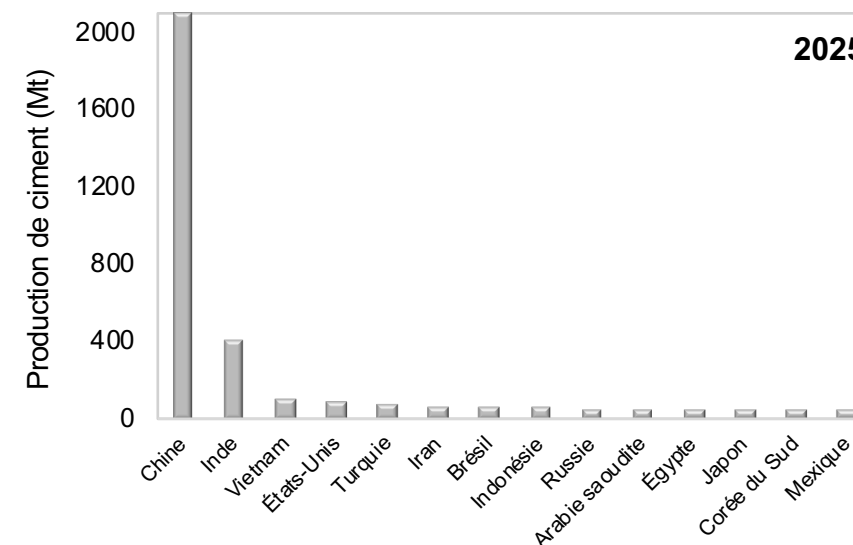
Les quatre enjeux environnementaux majeurs du secteur du bâtiment



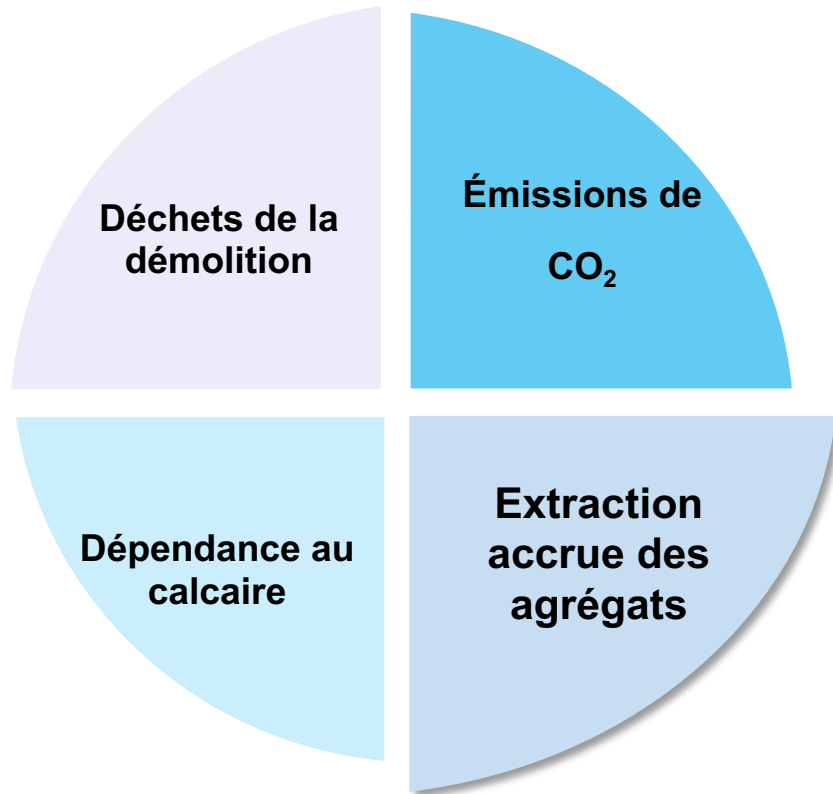
2024, Cumulative CO₂ from cement production



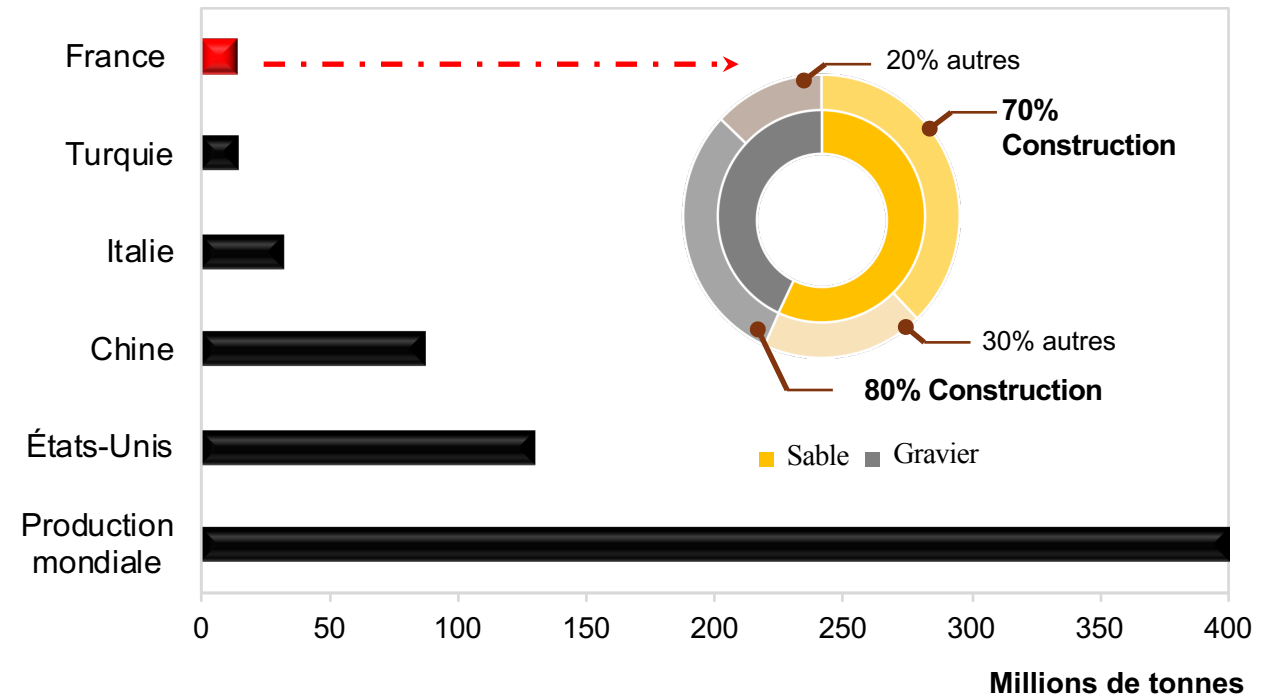
Principaux pays producteurs de ciment dans le monde



Les quatre enjeux environnementaux majeurs du secteur du bâtiment

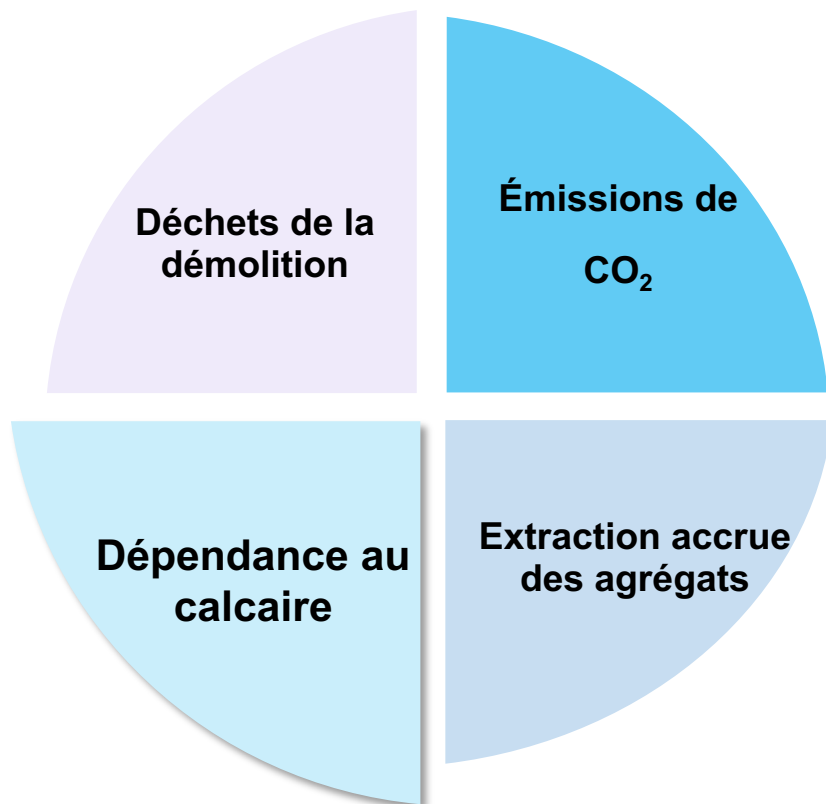


Production mondiale de sable et de gravier industriels (2023)

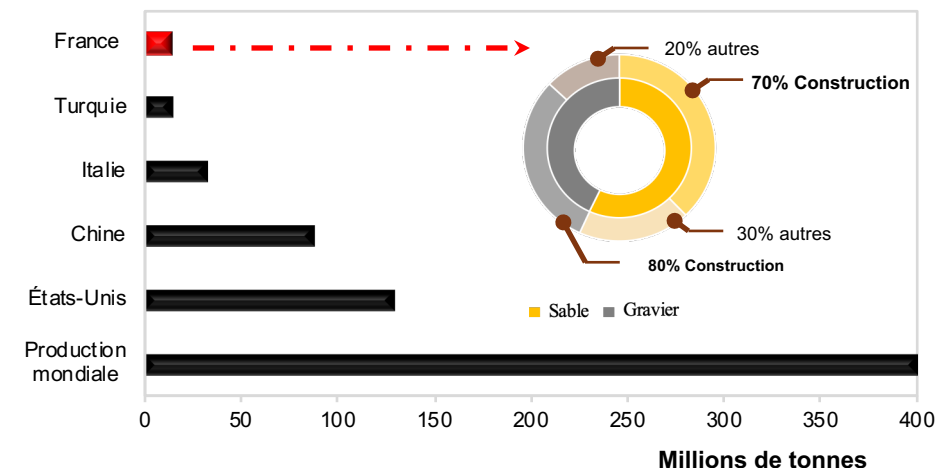


[Sand and gravel production global by country 2024 | Statista](#)

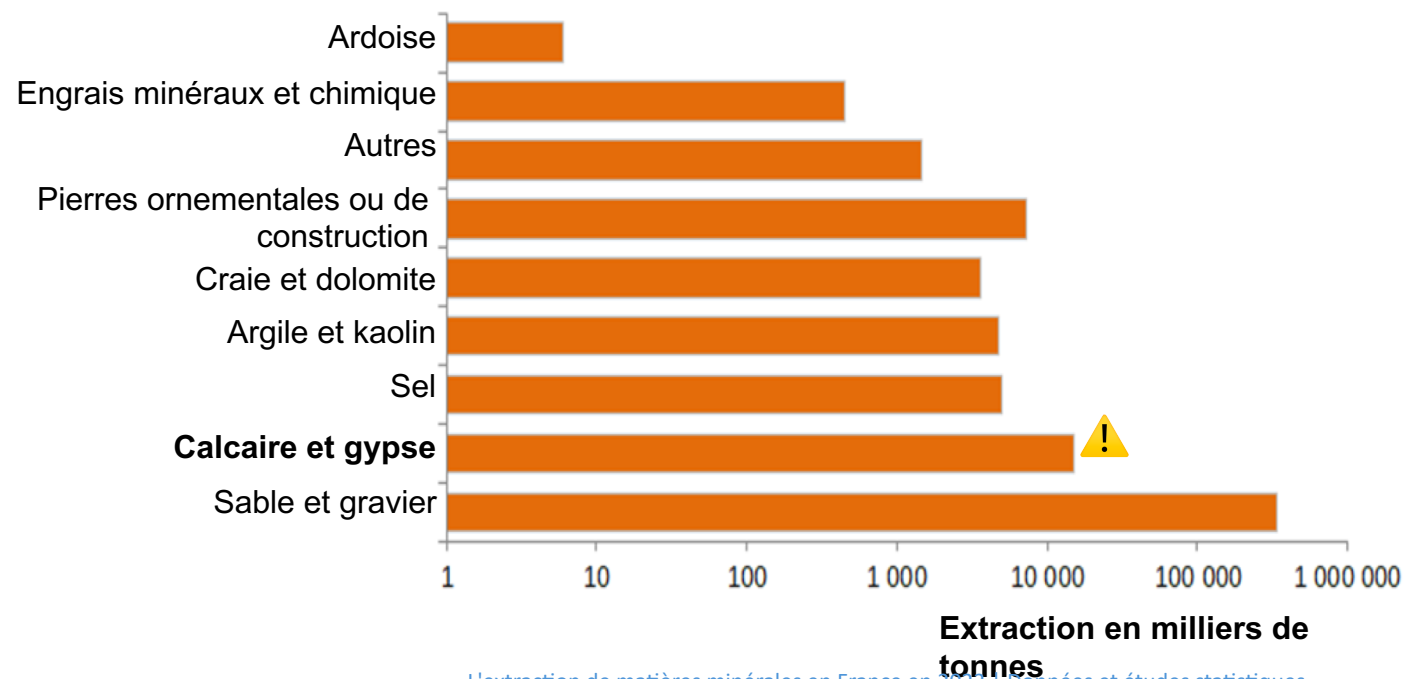
Les quatre enjeux environnementaux majeurs du secteur du bâtiment



Production mondiale de sable et de gravier industriels (2023)



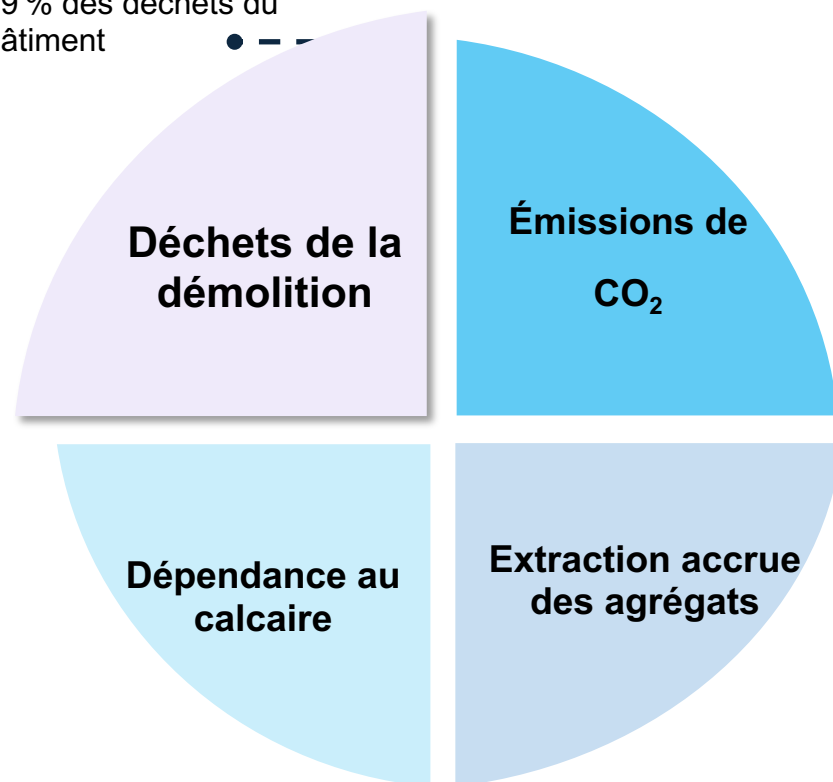
Extraction des minéraux non métalliques



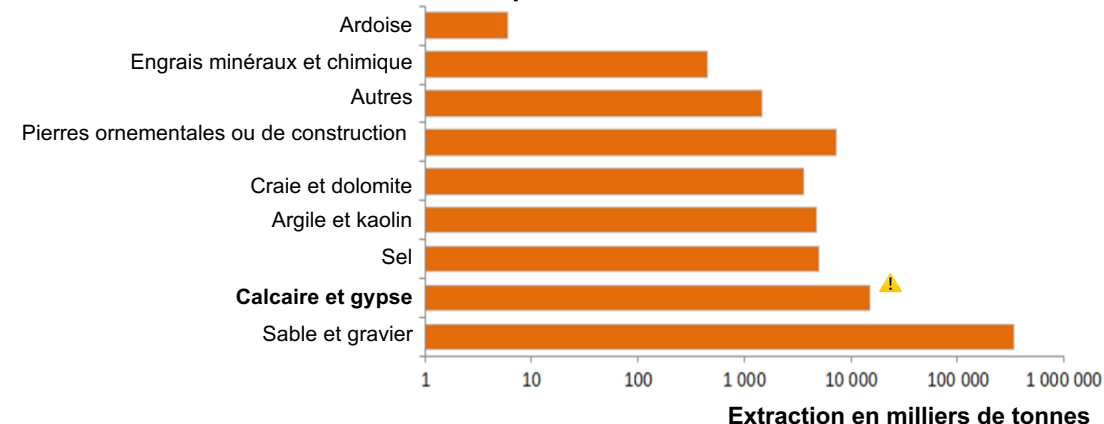
Les quatre enjeux environnementaux majeurs du secteur du bâtiment



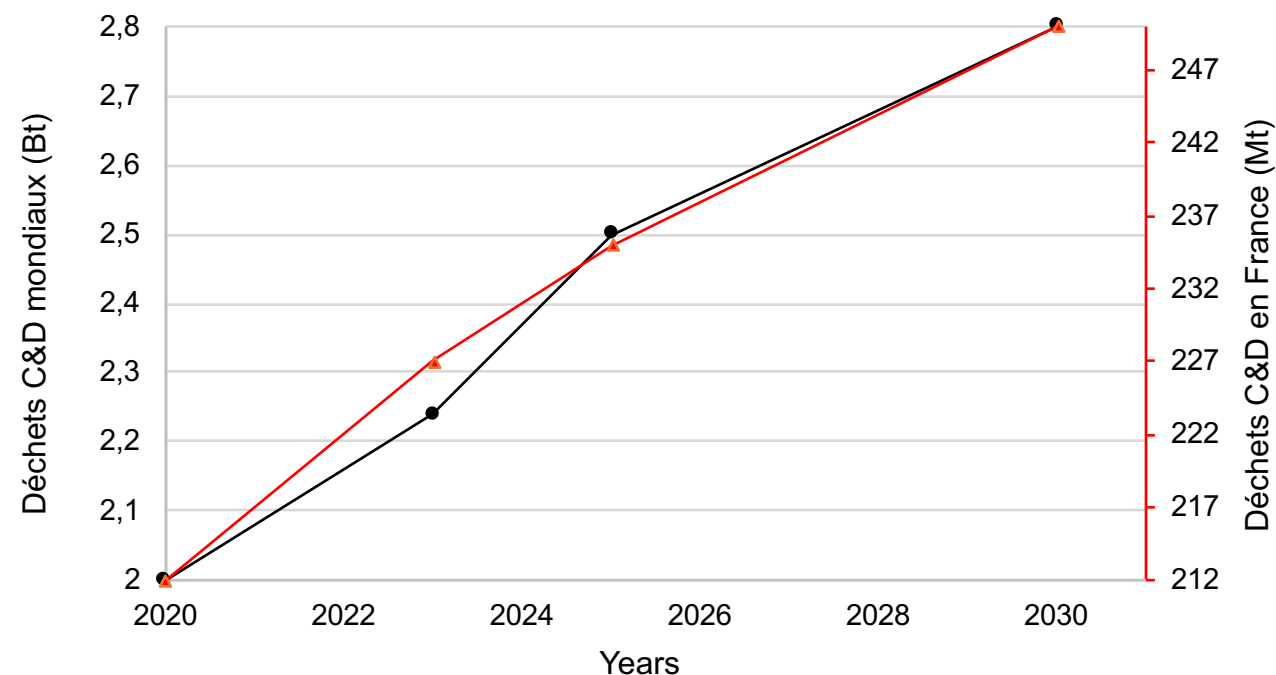
49 % des déchets du bâtiment



Extraction des minéraux non métalliques



Production des déchets de construction et de démolition (C&D)



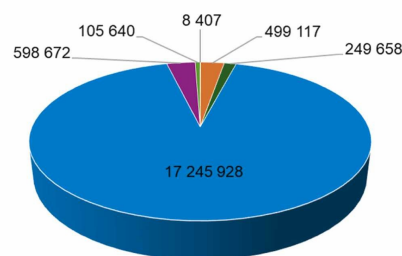
Pacte vert pour l'Europe

Objectif: Atteindre la neutralité climatique d'ici 2050

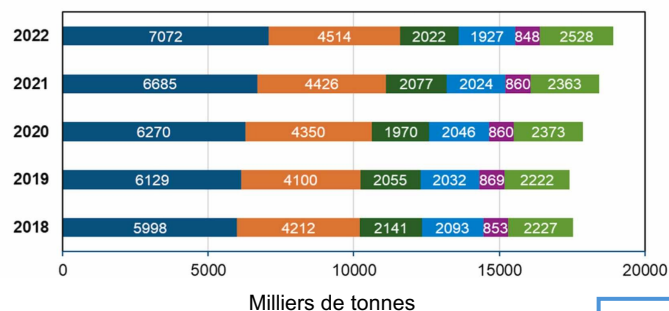
Valorisation des déchets coquillers

Production mondiale de mollusques

■ Africa
■ Northern America
■ Europe
■ Latin America and the Caribbean
■ Asia
■ Oceania



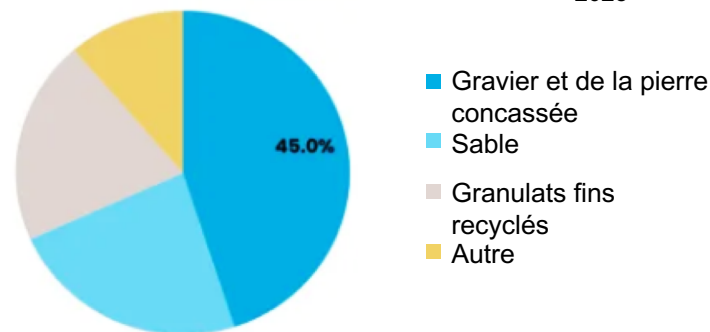
■ Oysters
■ Scallops
■ Constricted tagelus
■ Clams, cockles and ark-shells
■ Sea mussels
■ Other molluscs



(Zelloufi et al., 2025)

Valorisation des granulats de béton recyclé

Marché des granulats de béton recyclé

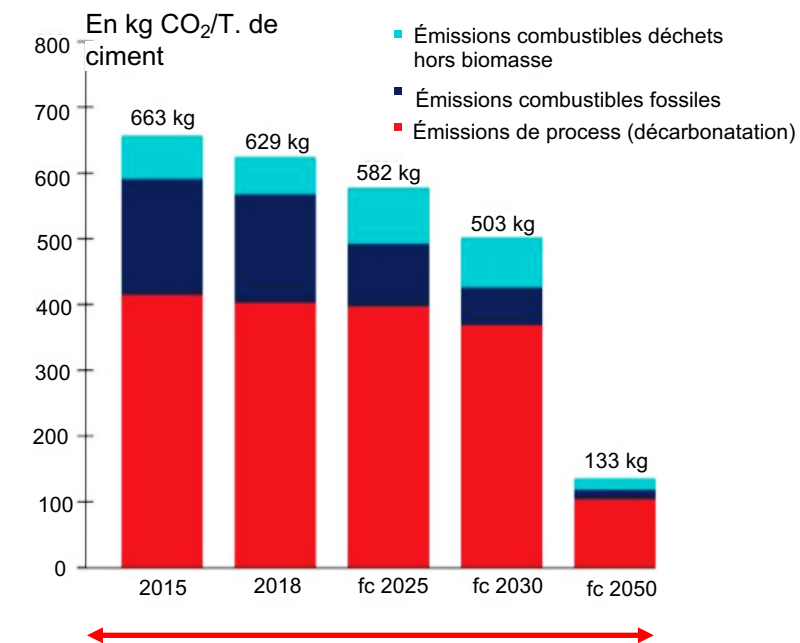


Le segment du gravier et de la pierre concassée domine le marché

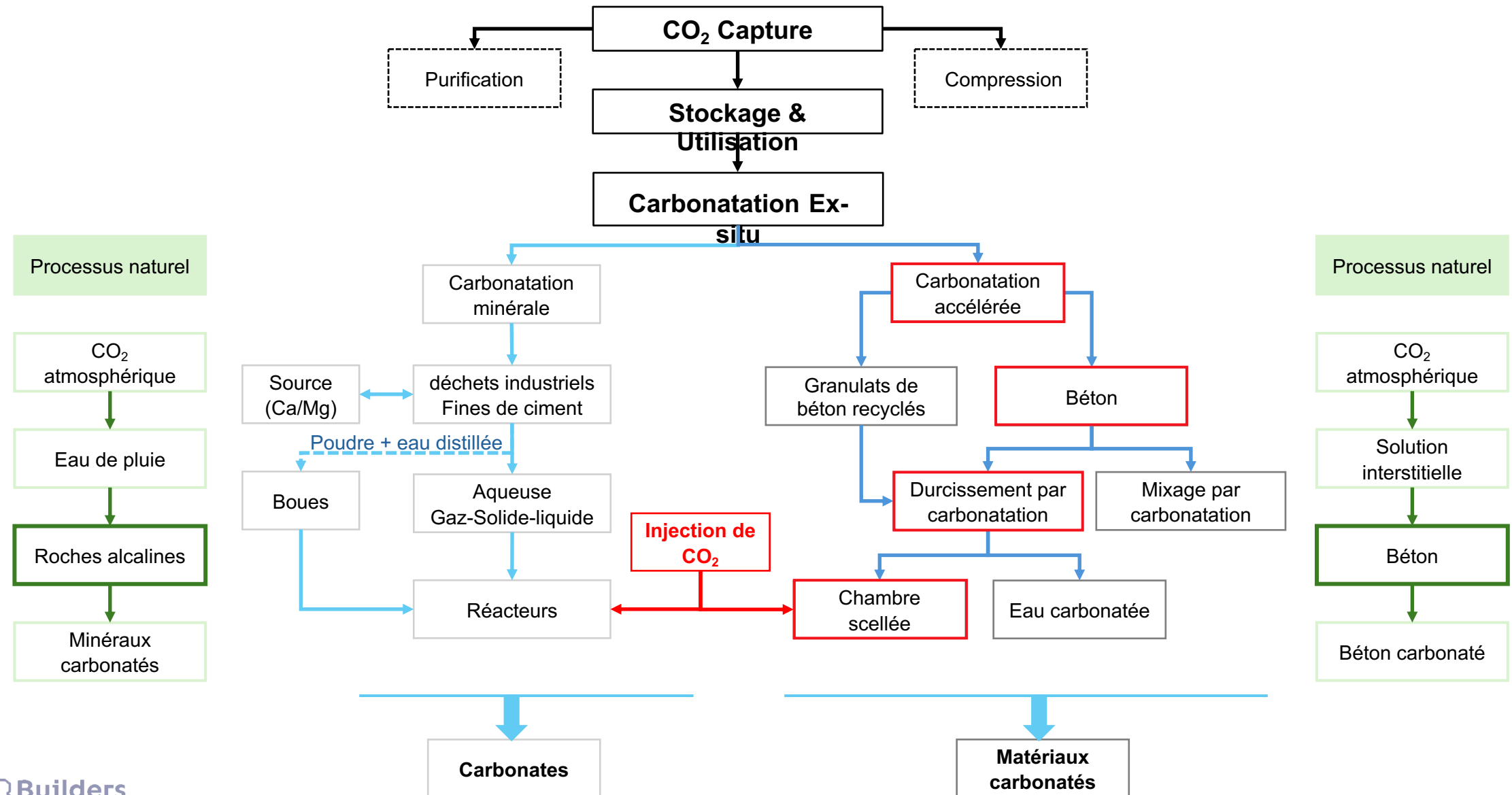
- Matériaux à faible empreinte carbone
- Similarités avec le gravier naturel et le calcaire

Carbone Capture et Stockage/Utilisation CCSU

Évolution des émissions de CO₂ du secteur cimentier

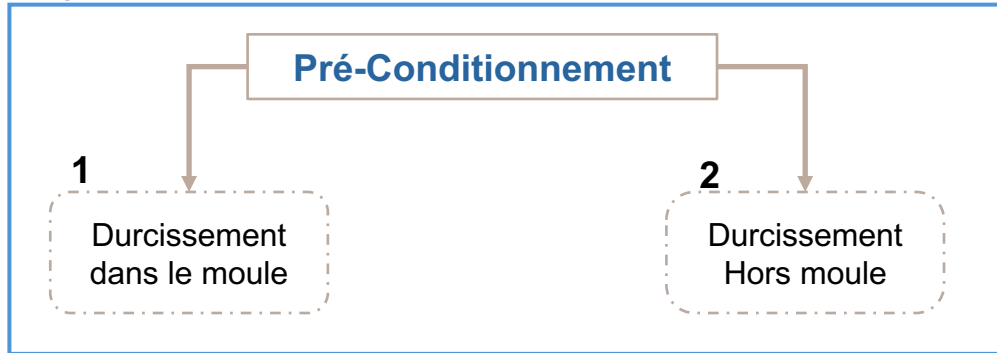


Carbone Capture et Stockage/Utilisation CCSU



Durcissement par carbonatation

Etape 1



Pratiques rapportées dans la littérature

Durcissement dans le moule

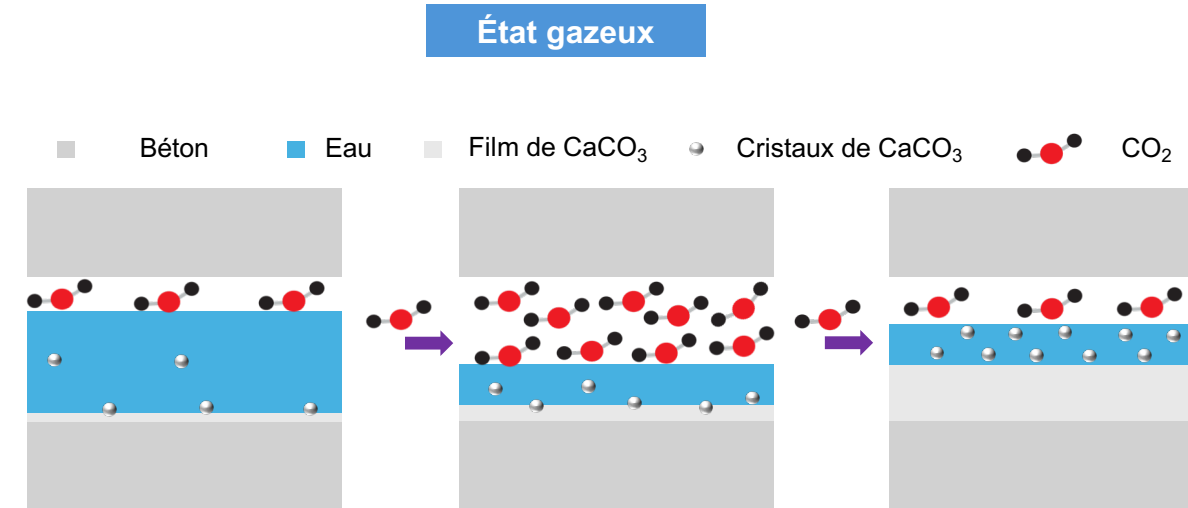
4–18 h de cure en moule
(Bétons fluides)

Démoulage immédiat après le moulage
(produits à mélange sec)

Durcissement hors moule

Température: 22–50 °C
Humidité relative: 30–90 %
Durée : 3 h à 9 jours

Diffusion du CO₂ dans le réseau poreux du béton



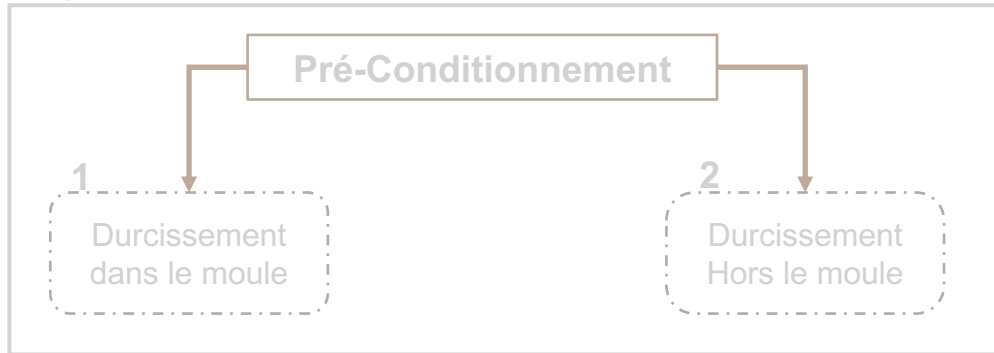
Élimination **insuffisante** de l'eau → Diffusion limitée du CO₂

Élimination **excessive** de l'eau → Interrompt l'hydratation et la carbonatation

**Degré optimal d'élimination de l'eau
58–62 %**

Durcissement par carbonatation

Etape 1



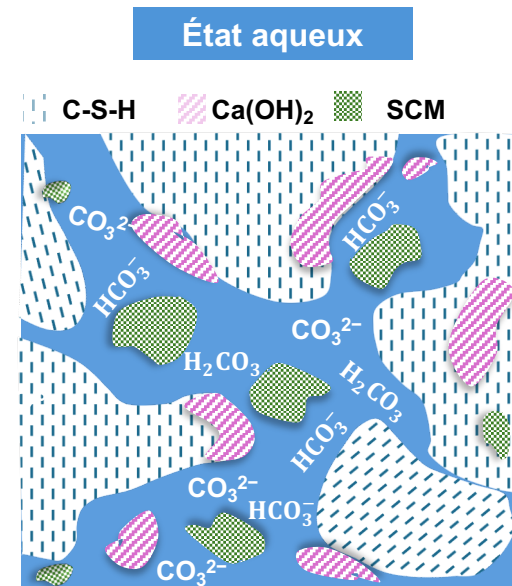
Etape 2



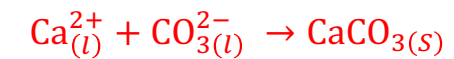
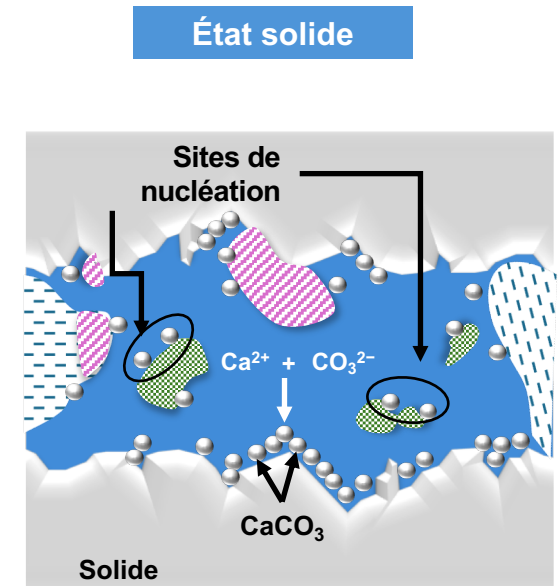
Paramètres recommandés

- CO₂ pur
- 50–70% HR
- Forte concentration de CO₂
- 20–25 °C
- Temps d'initiation non défini
- ≈ 40 °C (CaCO₃ précipitation)
- ≈ 100 °C (évaporation de l'eau)

Hydratation / dissolution du CO₂

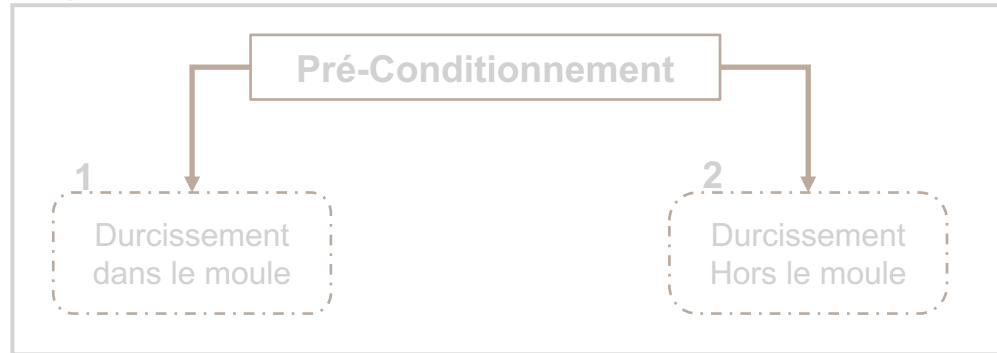


Dissolution-hydrates / précipitation- CaCO₃



Durcissement par carbonatation

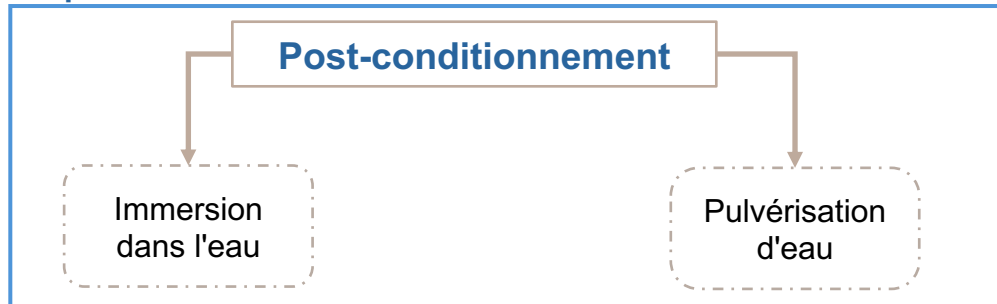
Etape 1



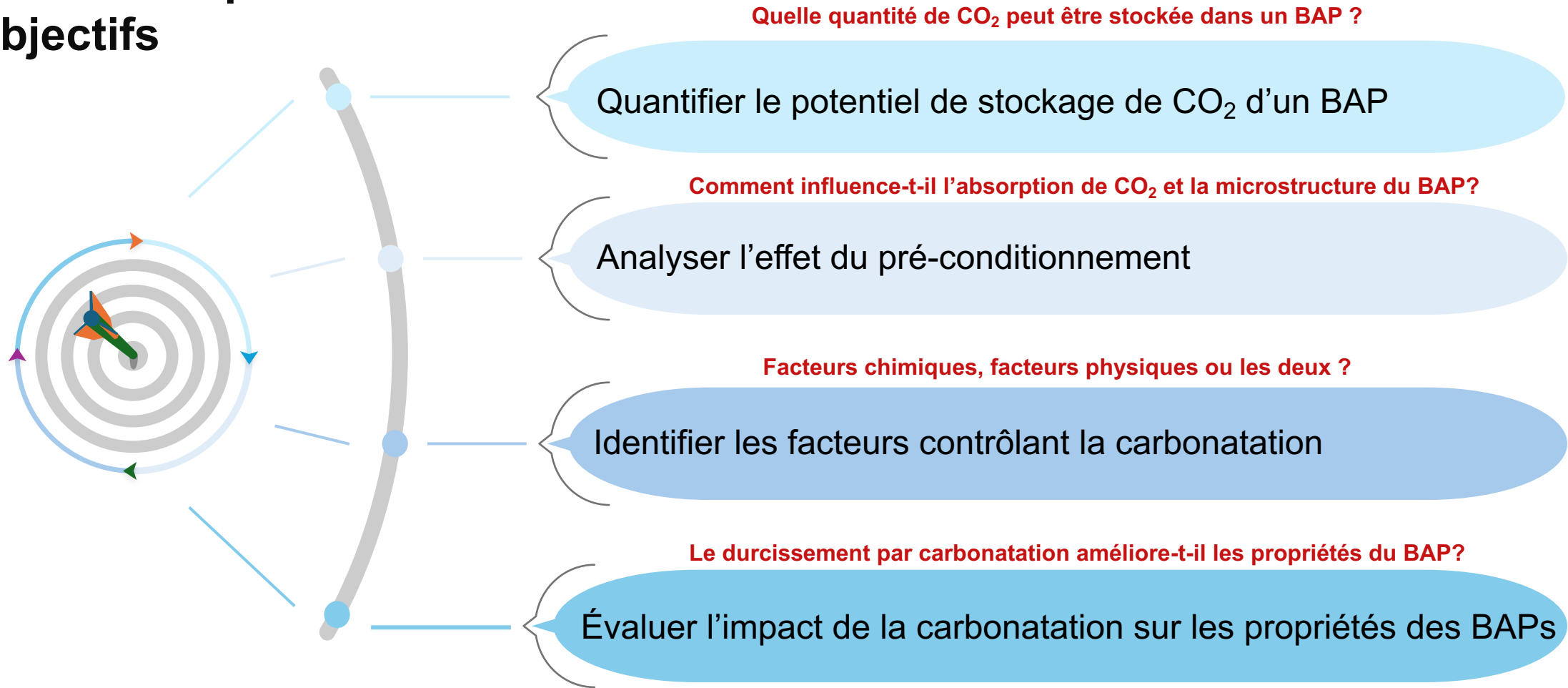
Etape 2



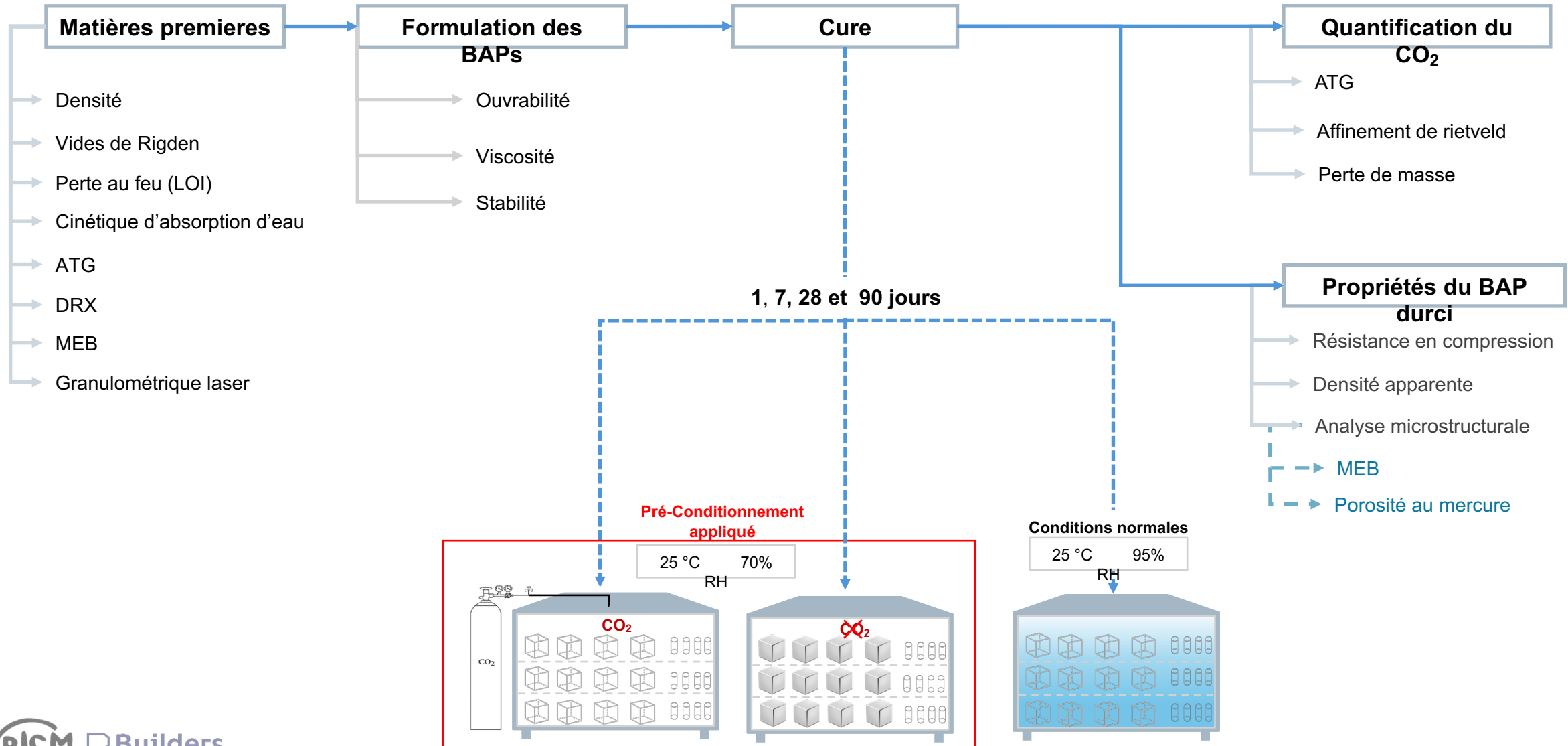
Etape 3



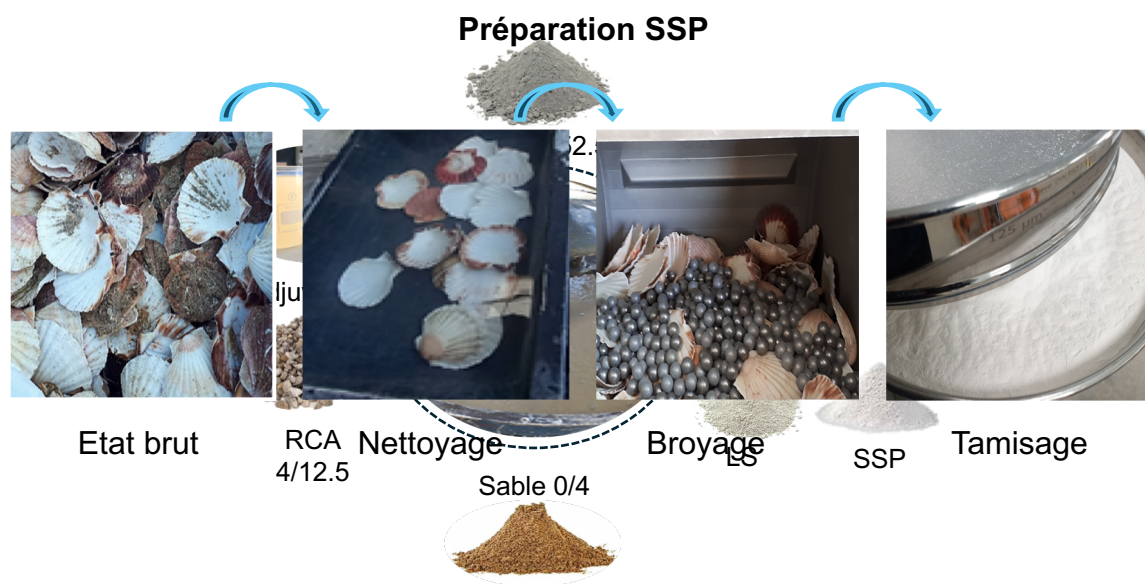
Problématiques et objectifs



Démarche Expérimentale



Composition des bétons autoplaçants (BAPs)



Cahier des charges

BAP

Classe de consistance : SF2 [EN 12350-8]

Viscosité (t_{500}) : < 2 sec [EN 12350-8]

Pourcentage de laitance < 15% [EN 12350-11]

Constituents (kg/m ³)	BAP			
	LS-NG	LS-RG	SSP-NG	SSP-RG
Sable	847.77	847.77	842.11	842.11
NCA	719.14	-	714.34	-
RCA	-	646.06	-	641.75
CEM II	320	320	320	320
LS	137.5	137.5	-	-
SSP	-	-	137.5	137.5
Eeau _{tot}	219.6			
Superplastifiant	4.58			
Accélérateur de prise	3.66			

NCA → RCA

LS → SSP
(30% en masse du ciment)

SSP: Poudre de coquille Saint-Jacques

LS: Poudre de calcaire

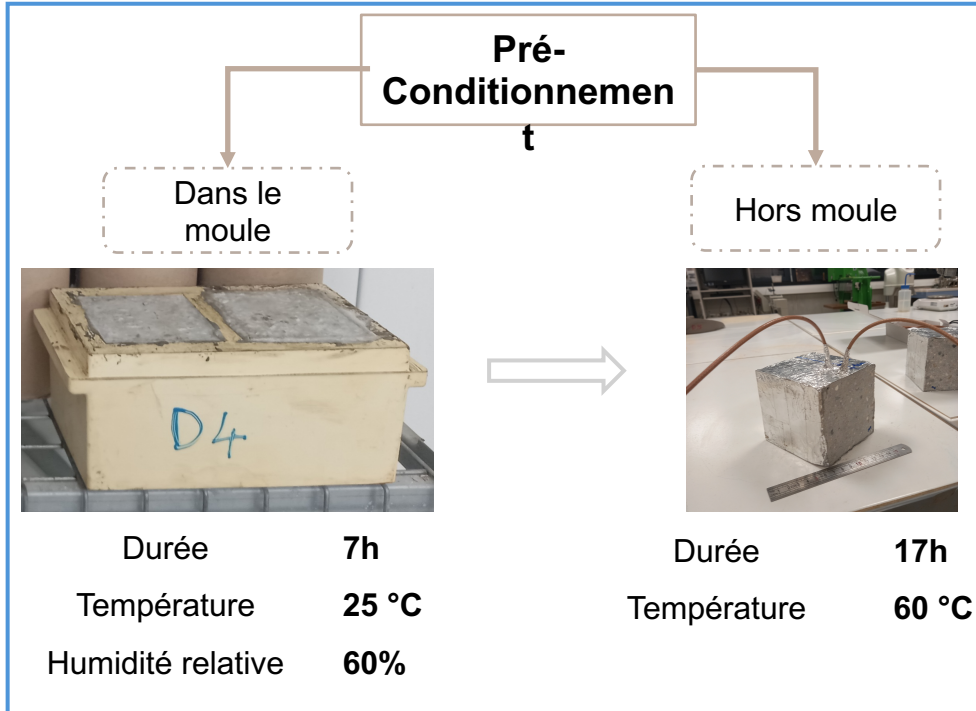
RCA Gravier recyclé

NCA Gravier naturel

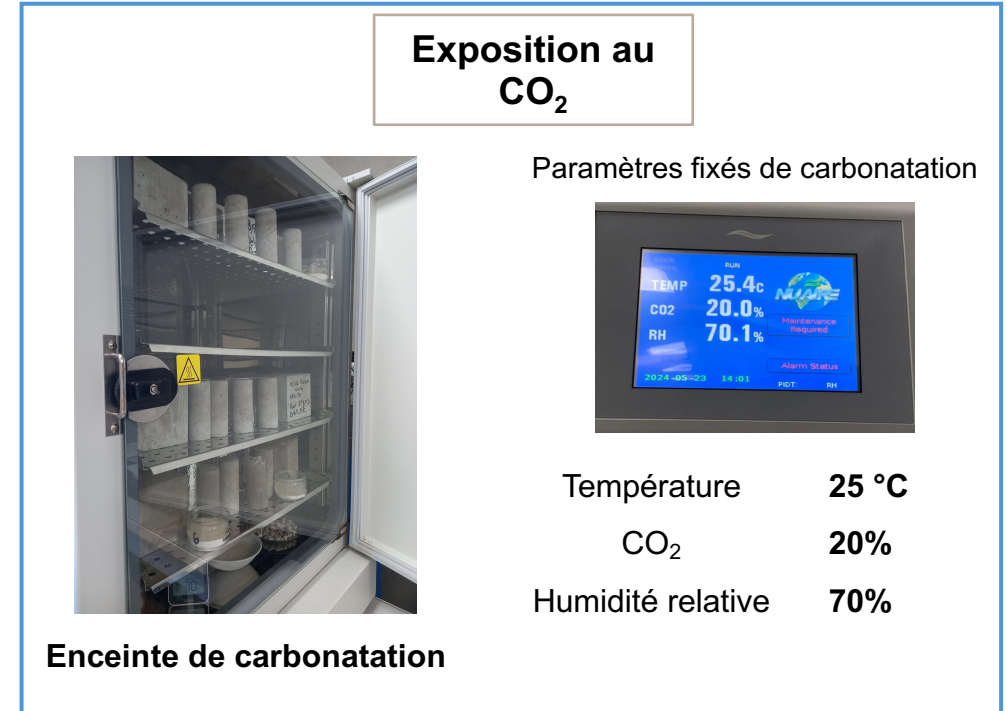
:

Adaptation du protocole de stockage du carbone

Etape 1



Etape 2



Etape 3

70% HR - (**max recommandé**)

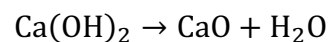
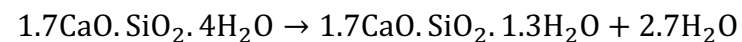
Humidité suffisante pour hydratation

Post-préconditionnement jugé inutile → retiré du protocole

Quantification du CO₂ stocké: **ATG**

1.

Teneur en hydrates (C-S-H, Ca(OH)₂)



2.

CaCO₃ issu du C-S-H et Ca(OH)₂

$$m_{\text{CaCO}_3\text{C-S-H}} = n_{\text{C-S-H}} \times 1.7$$

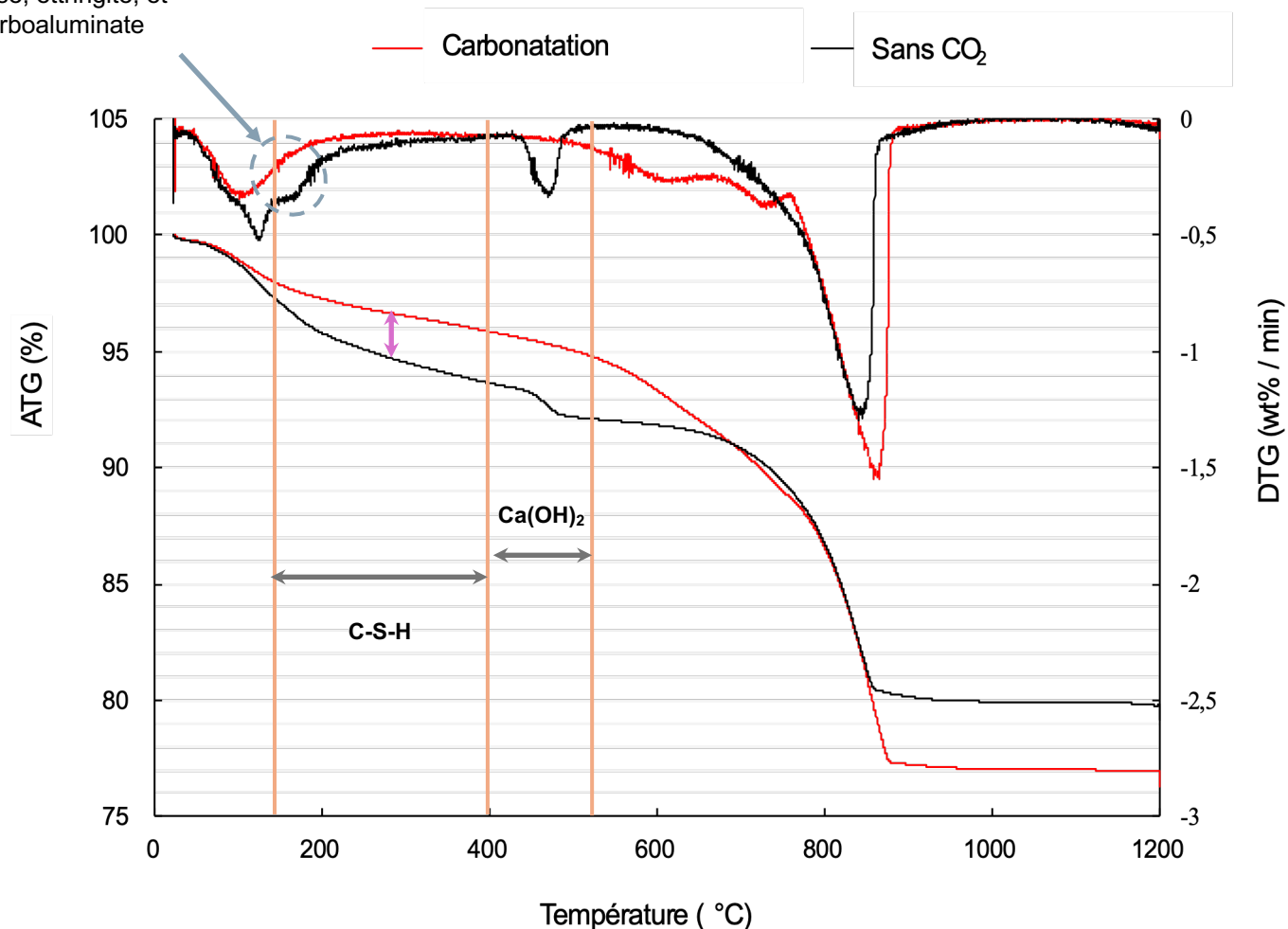
$$m_{\text{CaCO}_3\text{Ca(OH)}_2} = n_{\text{Ca(OH)}_2}$$

3.

CO₂ stocké

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{CaCO}_3\text{ tot}} \times M_{\text{CO}_2} / M_{\text{CaCO}_3}$$

Gypse, ettringite, et
carboaluminate



Seuls **C-S-H** et **Ca(OH)₂** participent à la carbonatation


Tous les produits d'hydratation contribuant à la perte de masse entre
150 °C et **400 °C** sont regroupés sous la notation **C-S-H**

Quantification du CO₂ stocké: **DRX**

Identifier les phases probables

- Les produits d'hydratation
Ca(OH)₂ – Ettringite – Gypse
- Les phases anhydres
C₂S – C₃S
- Les phases issues de la réaction LS/SSP avec les phases aluminates
Monocarboaluminate – Hemicarboaluminate
- Les phases carbonatées
Calcite – Vâtérîte – Aragonite
- Les phases provenant des agrégats
Chlorite – Muscovite – Albite – Quartz – Orthoclase.....

Crystallographic Information Files (CIF)

 (Crystallography Open Database)
<https://www.crystallography.net/cod/>

- Paramètres cristallographiques pour une phase idéale / pure
- Référence initiale pour comparer les données expérimentales aux valeurs théoriques

Affinement Rietveld

- Importer les fiches CIF dans le logiciel d'affinement (MAUD)
- **Quantifier les phases**

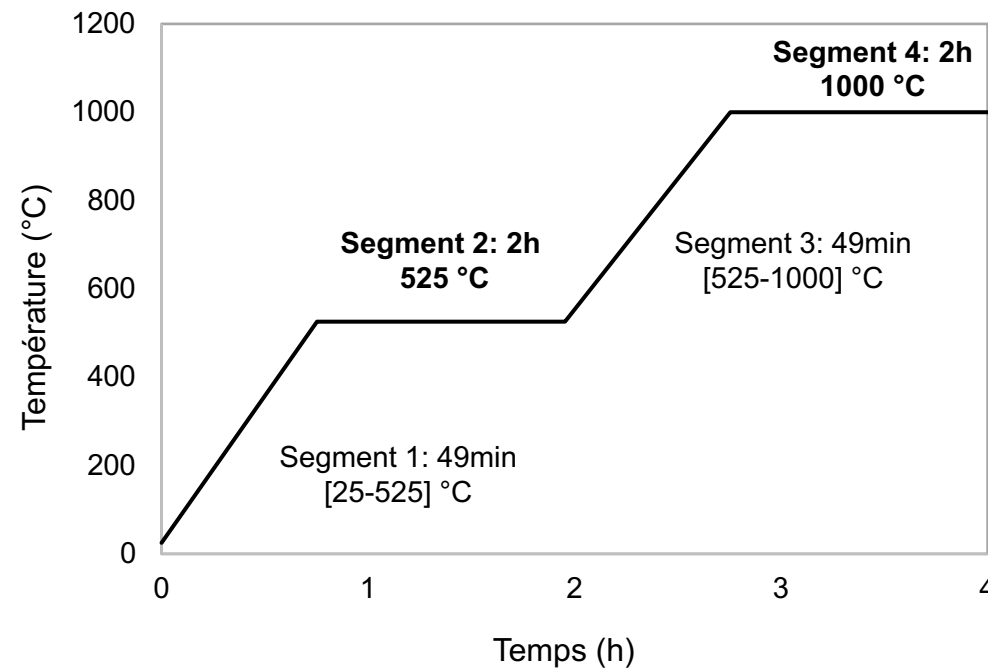
Quantification du CO₂ stocké: **Perte de masse**

Séchage initial

Température: 105°C
Durée: 24h

CO₂ stocké

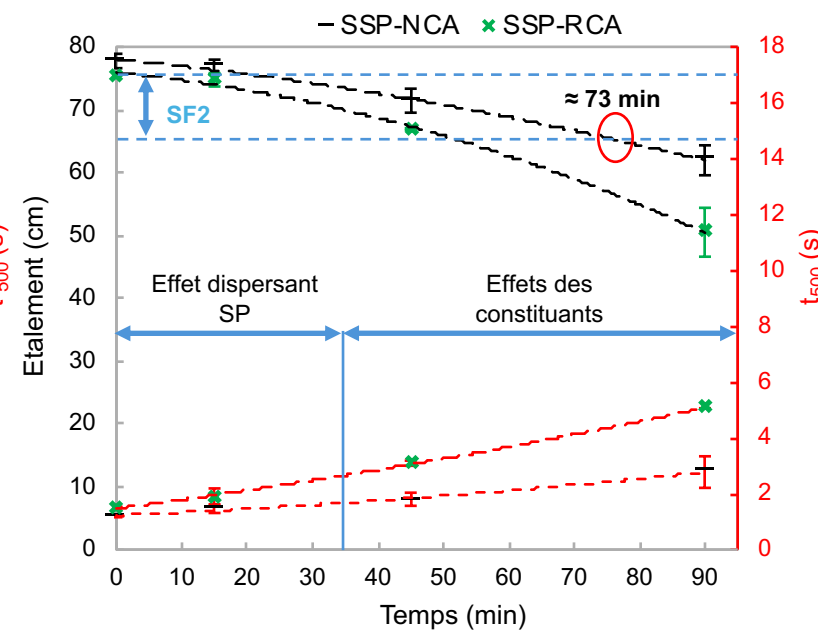
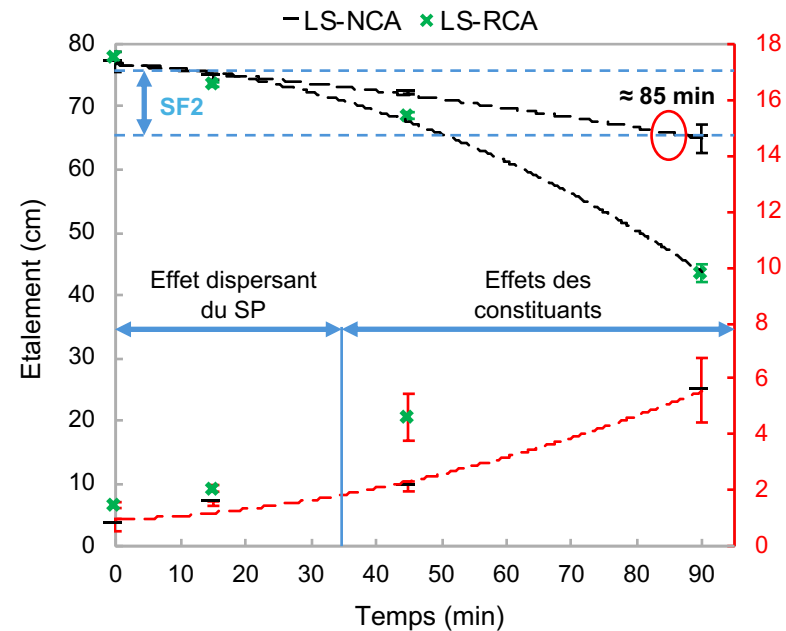
Calcination



Rhéologie des BAPs

1- Rhéologie

Etalement et viscosité au cône d'Abrams [EN 12350-8]: SF2



Effet du précurseur-Liant

Ouvrabilité

LS-NCA → maintien prolongé SF2

Viscosité

SSP-NCA → Viscosité initiale élevée

Facteurs clés

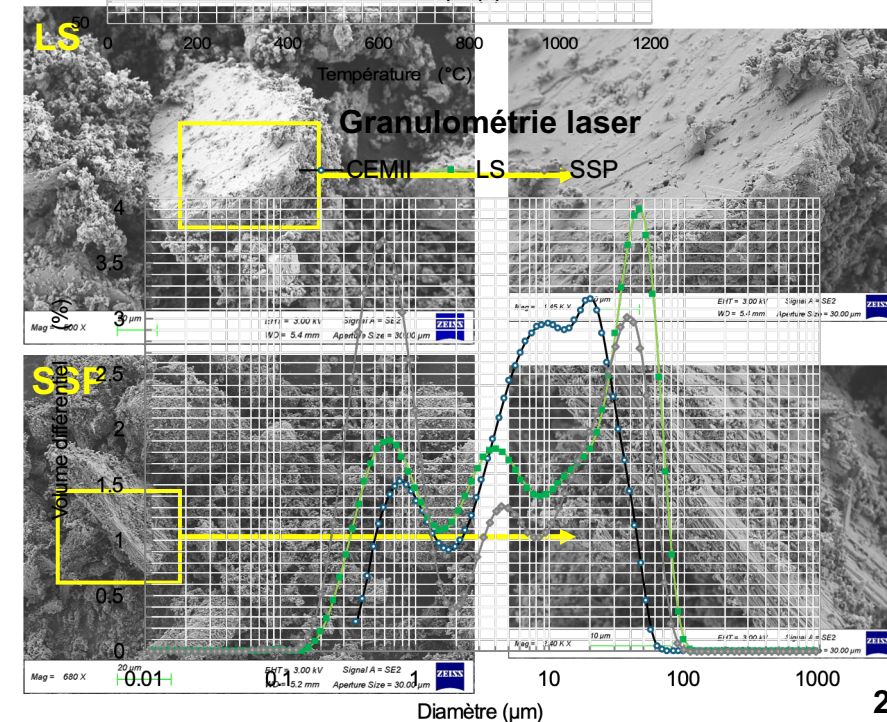
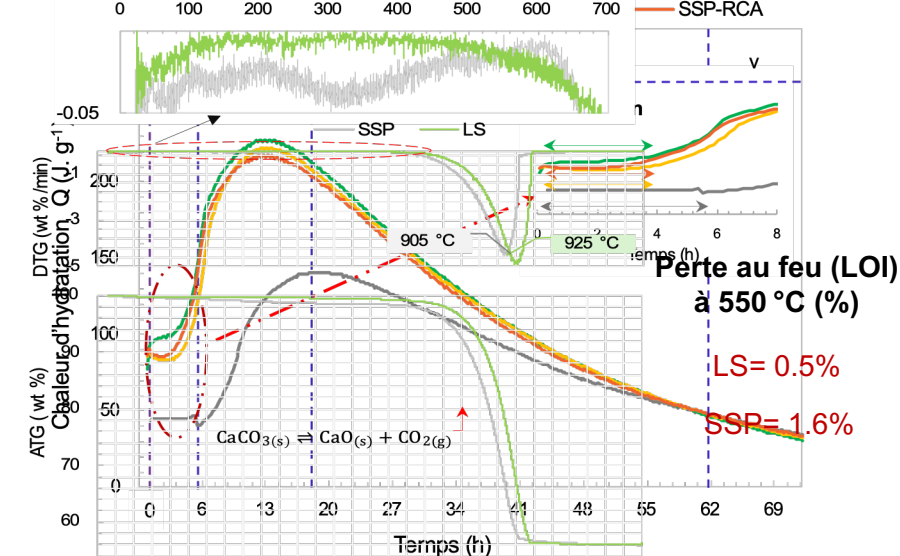
Caractéristiques du SSP

Porosité

Matière organique

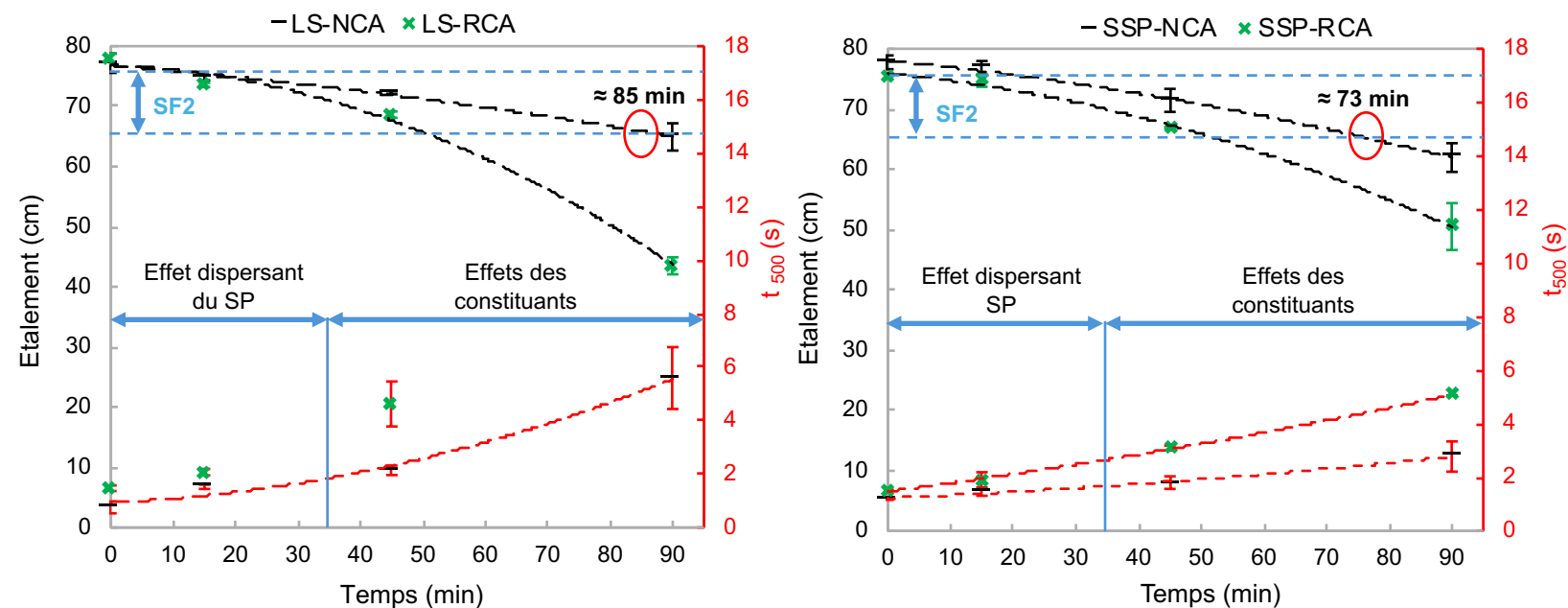
Particules ultra fines

Analyse thermogravimétrique



1- Rhéologie

Etalement et viscosité au cône d'Abrams [EN 12350-8]: SF2



Effet du granulat grossier

Ouvrabilité

LS-RCA et SSP-RCA → ouvrabilité limitée à ~45 min

Viscosité

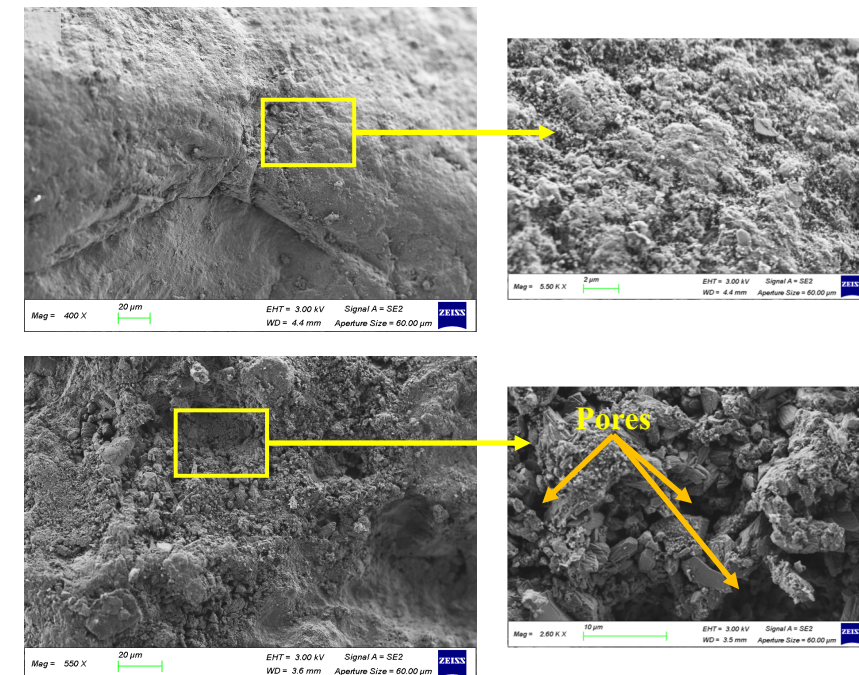
VS1 $\xrightarrow{\sim 45 \text{ min}}$ VS2

Facteurs clés

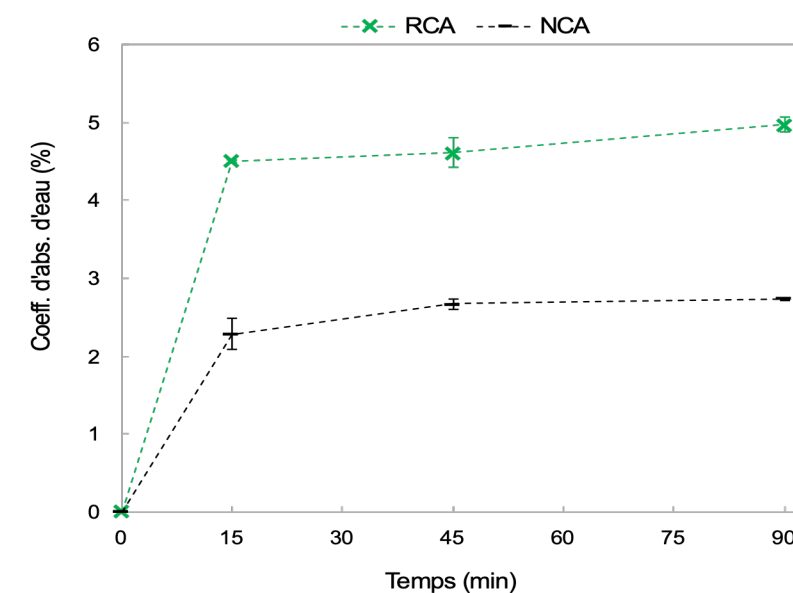
Caractéristiques RCA

Porosité

Absorption d'eau



Absorption d'eau



1- Rhéologie

Résistance à la ségrégation: Indice de stabilité visuelle (ISV)

BAP	Operateur 1	Operateur 2	Moyenne	VSI limites	Stabilité
LS-NCA	2	2	2	2	S à IS
LS-RCA	1	1.3	1.15	1	S
SSP-NCA	1	0.7	0.85	0	S à HS
SSP-RCA	0.5	0	0.25	0	HS

S: Stable IS: Instable HS: Haute Stabilité

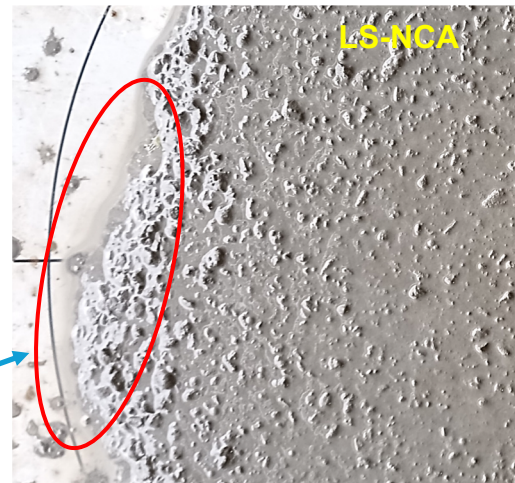
LS-NCA et LS-RCA

Halo de mortier

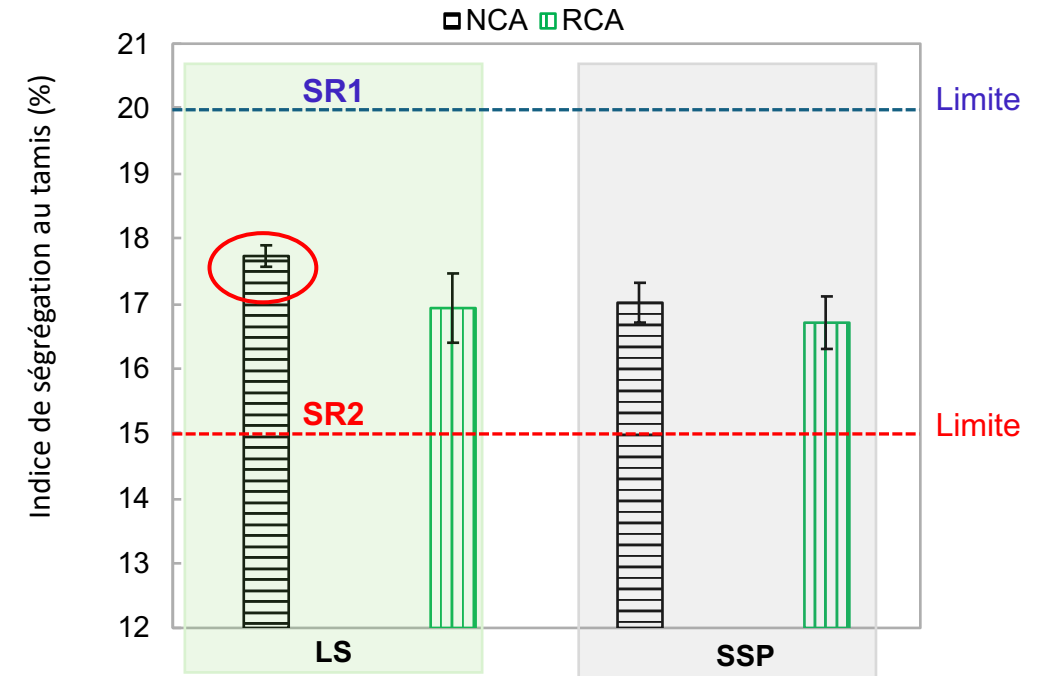
Thixotropie

**Ségrégation
visible**

Ressuage



Résistance à la ségrégation: Stabilité aux tamis [EN 12350-11]



LS-NCA → plus faible résistance à la ségrégation

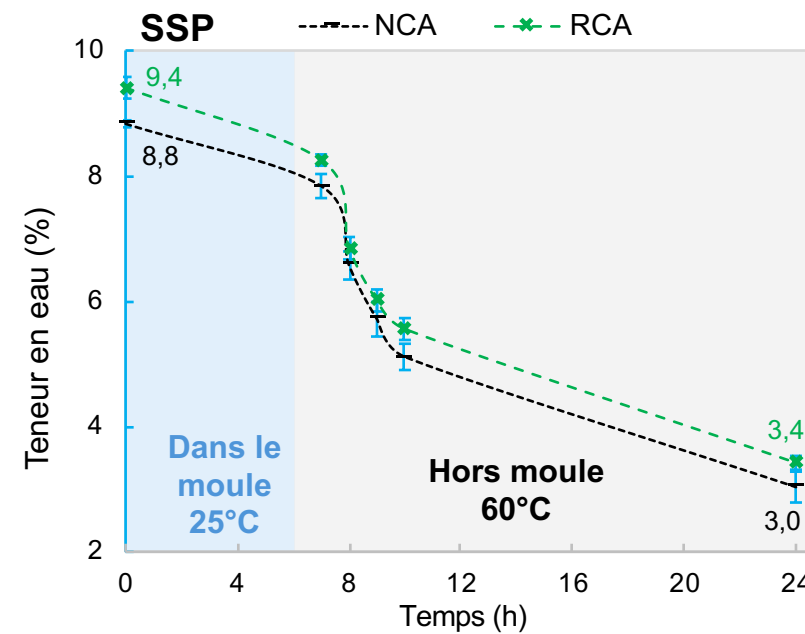
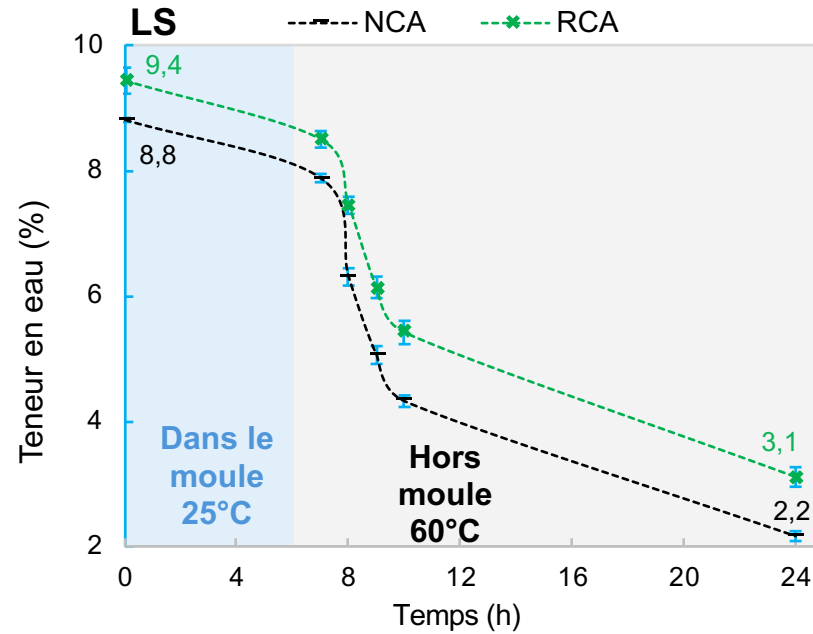
**Meilleure Stabilité
SSP ; RCA**

Durcissement par carbonatation

CO₂ stocké

■ Pré-conditionnement

Teneur en eau



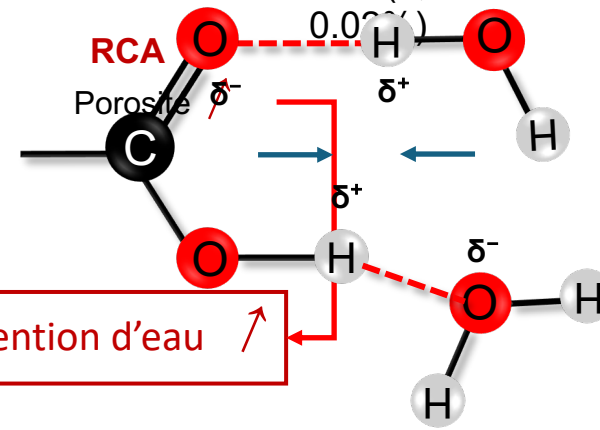
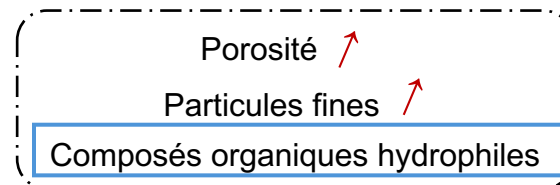
LS-NCA ($2,2 \pm 0,1\%$) < SSP-NCA ($3,0 \pm 0,2\%$) < SSP-RCA ($3,11 \pm 0,02\%$) < LS-RCA ($3,42 \pm 0,02\%$)

Instable

VSI ↑

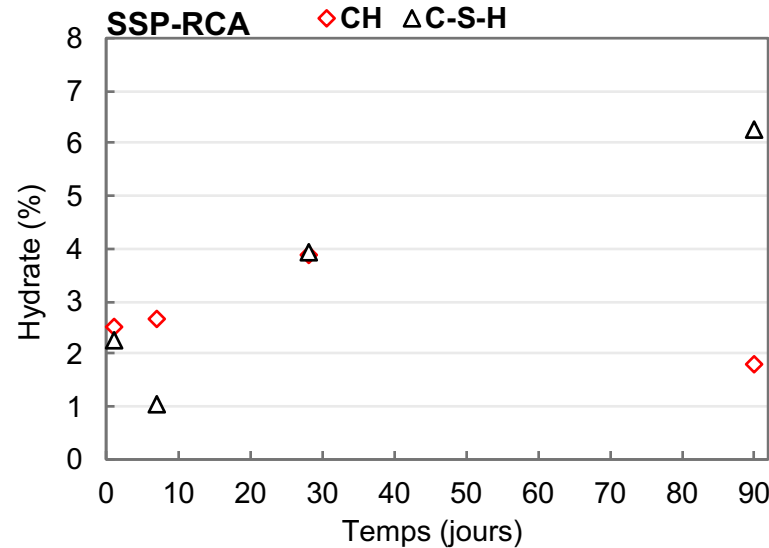
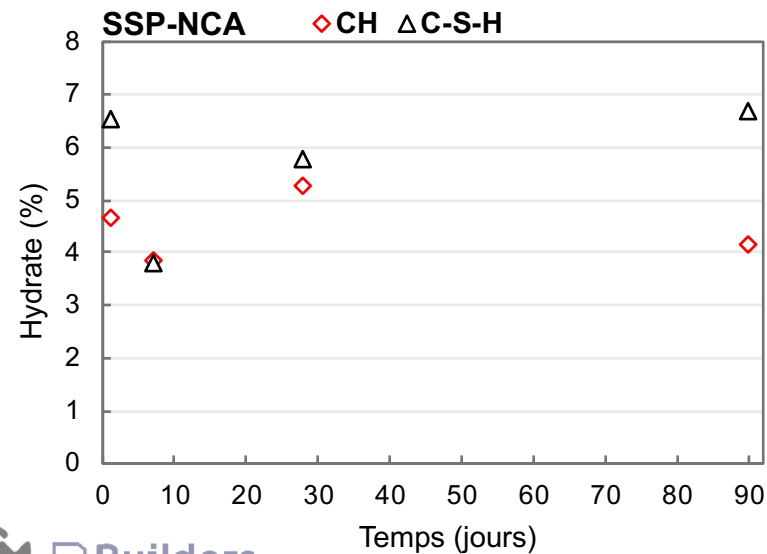
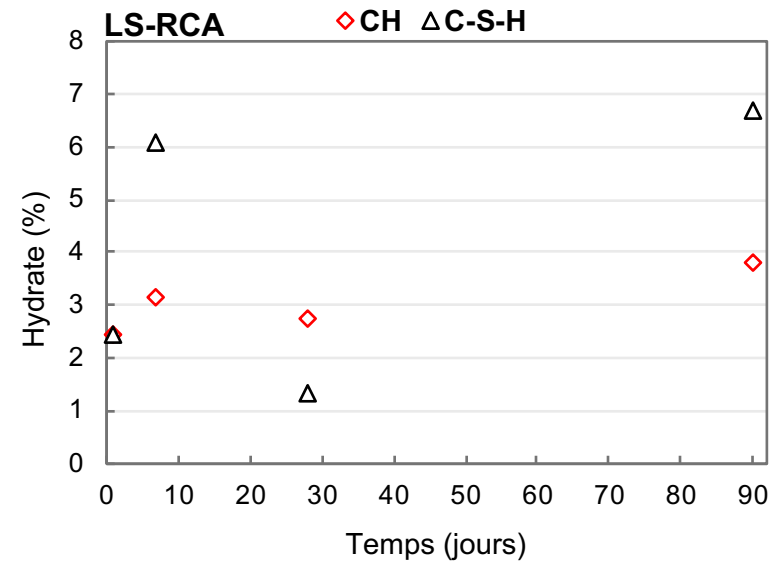
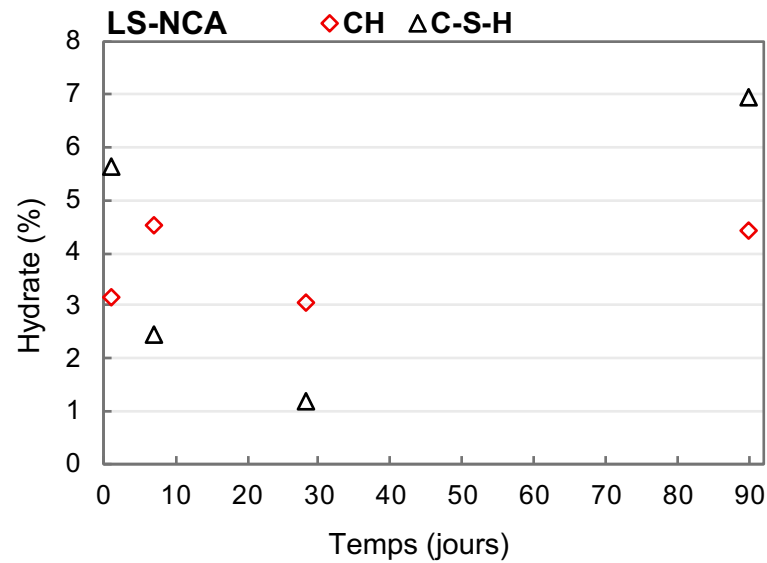
Indice de ségrégation ↑

SSP



CO₂ stocké: ATG

Teneur en hydrates participant à la carbonatation



Carbonatation précoce (1 jour)

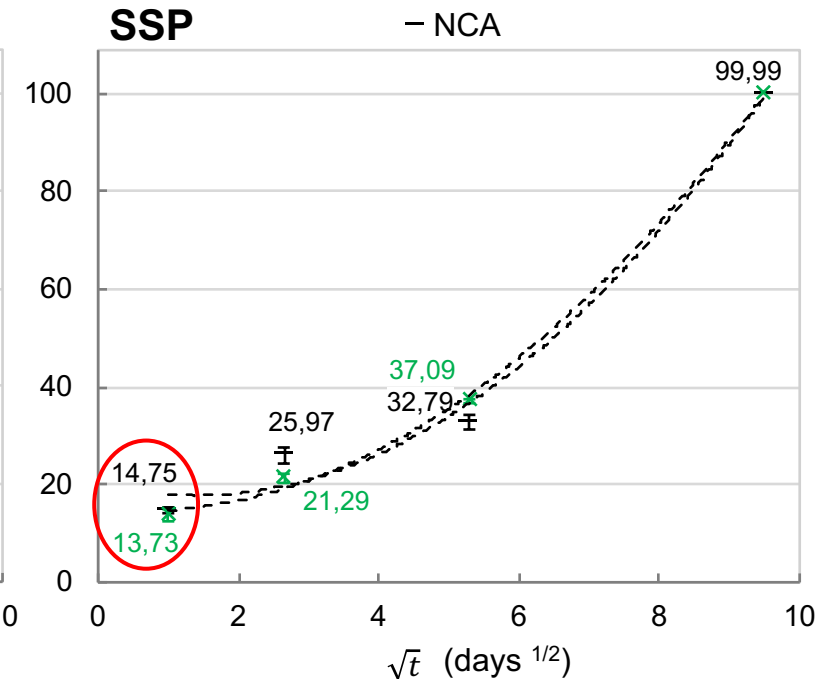
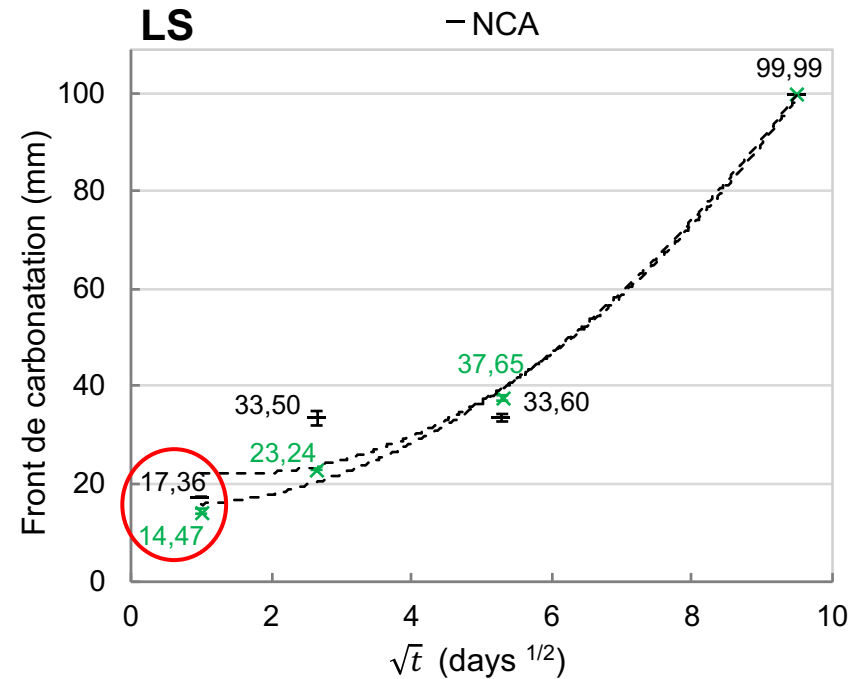
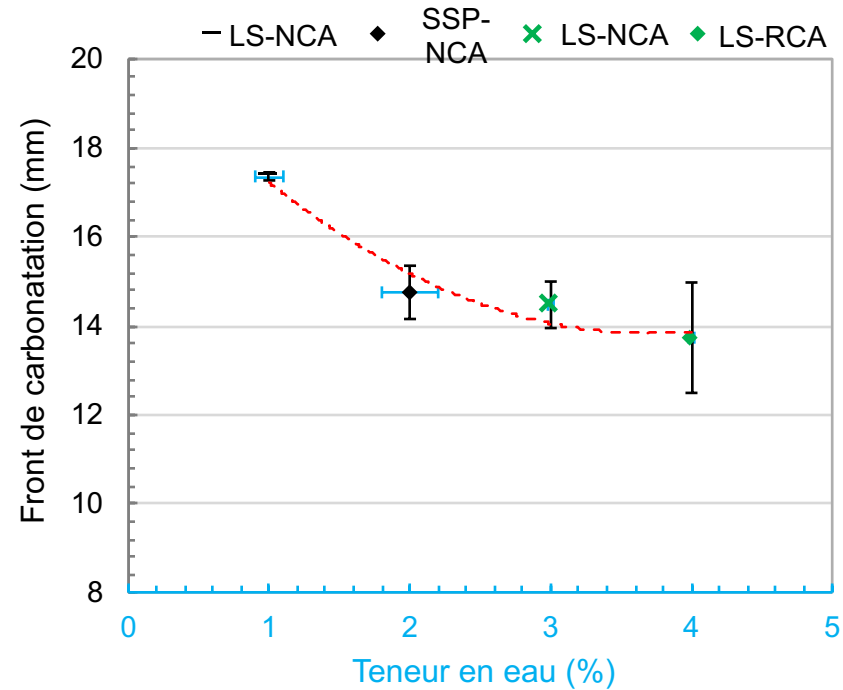
Quantité d'hydrates formés

Quantité de Ca(OH)₂

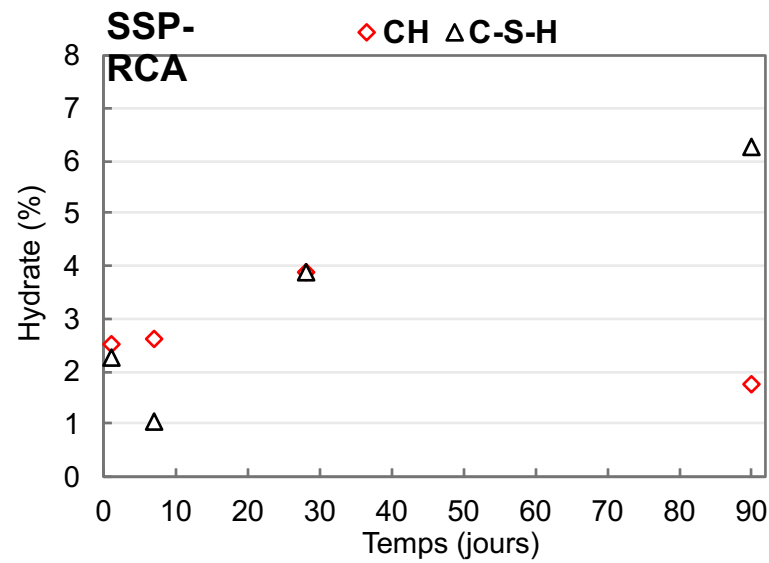
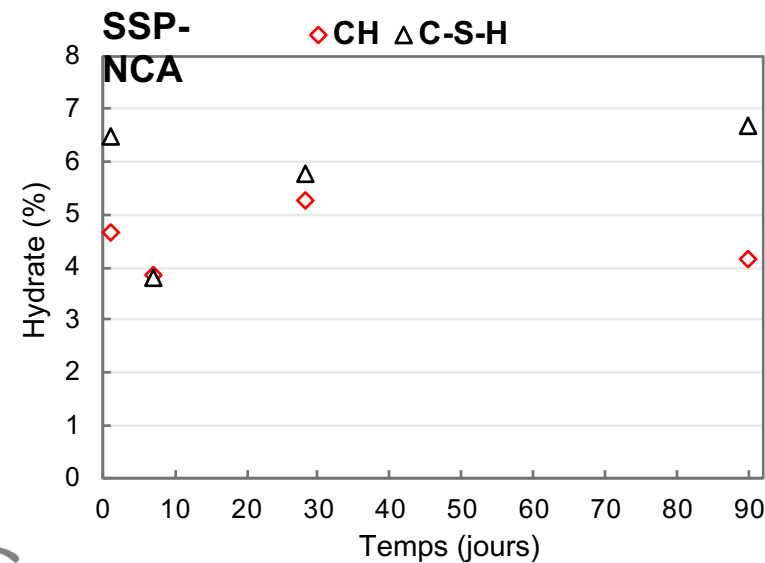
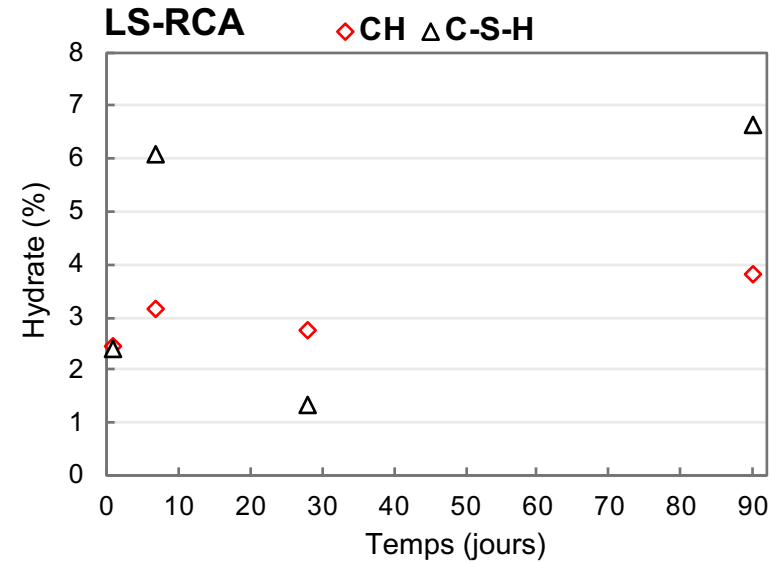
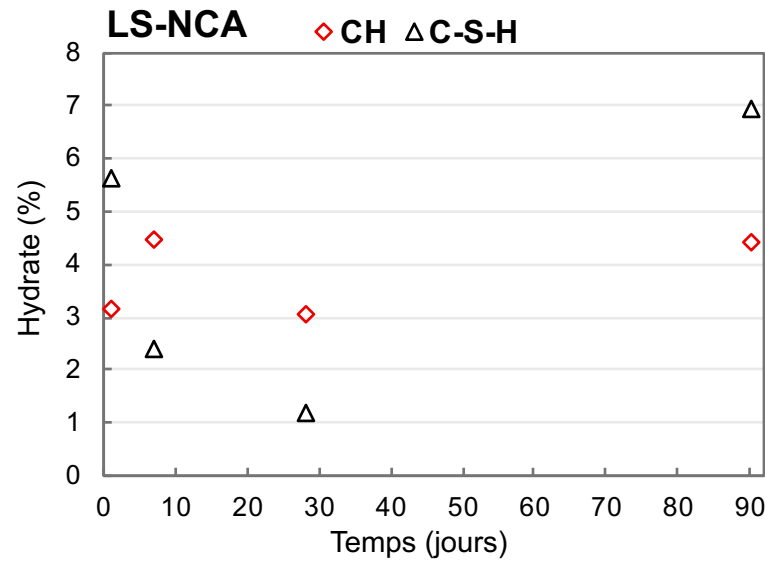
Diffusion de CO₂

Front de carbonatation: Phénolphthaléine

Diffusion de CO₂



Quantité du CO₂ stockée estimée par ATG



Carbonatation précoce (1 jour)

Quantité d'hydrates formés

Quantité de Ca(OH)₂

Diffusion de CO₂

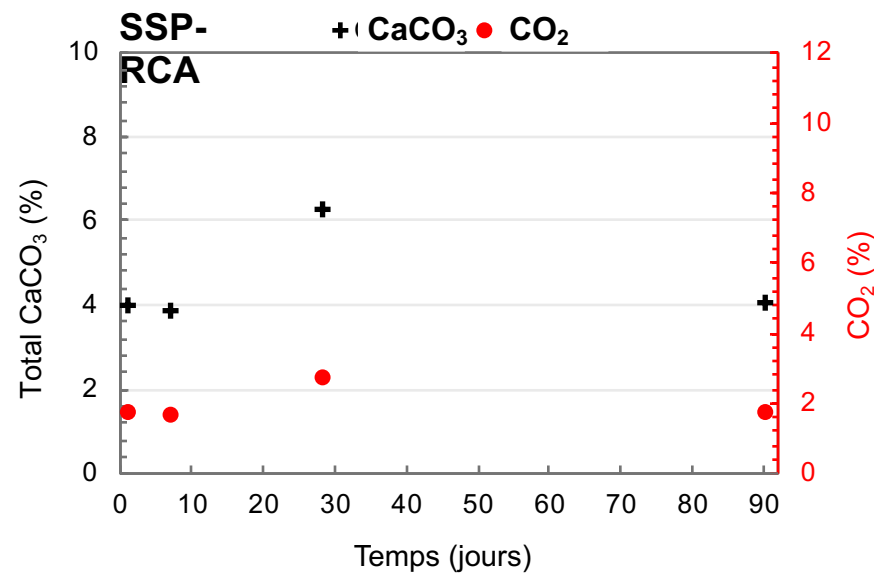
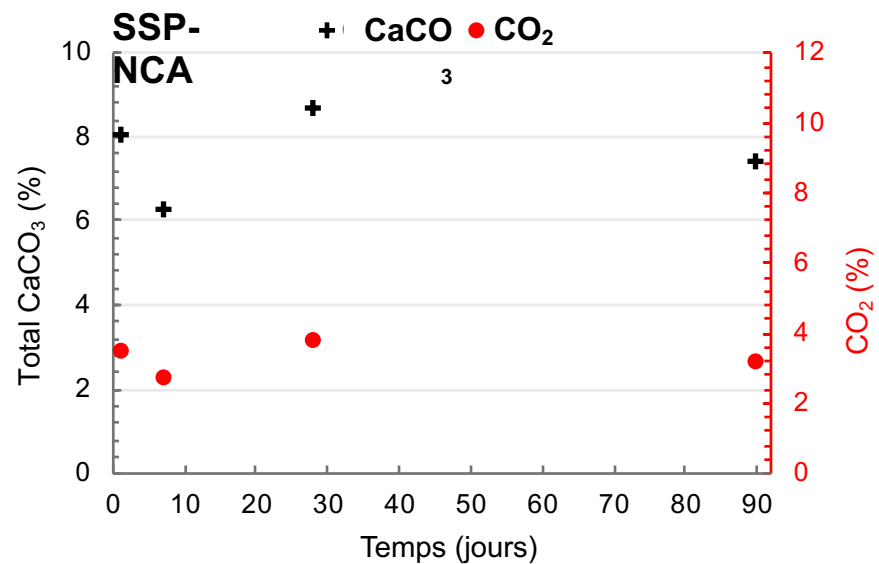
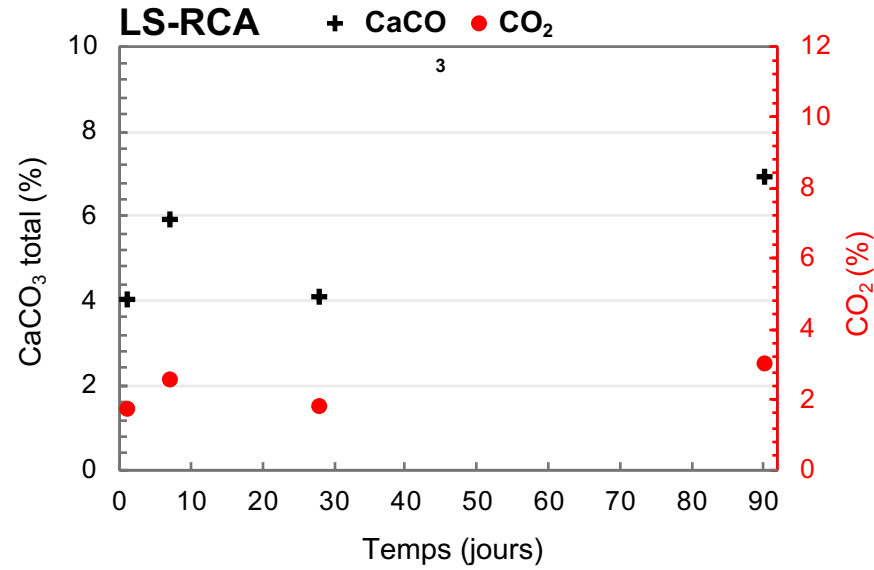
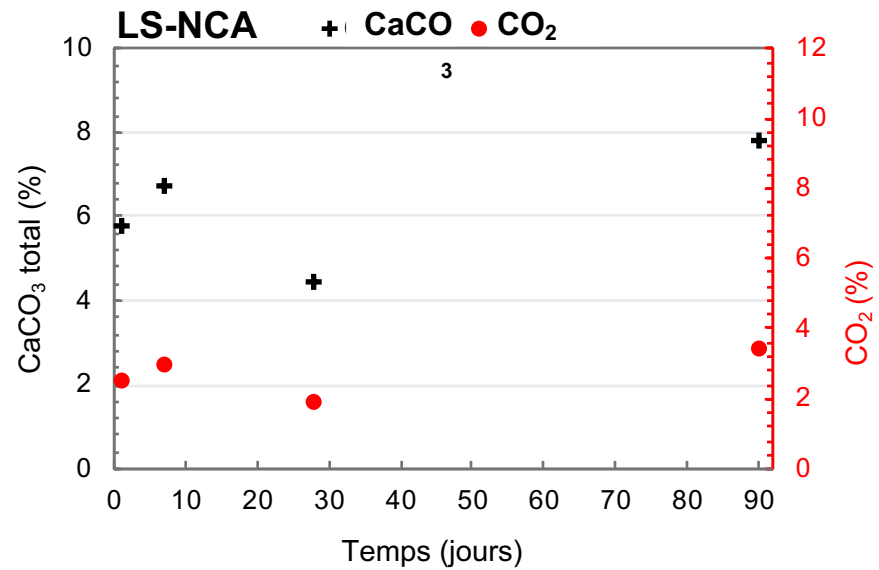
Carbonatation continue

Dissolution des hydrates (liée au pH local)

Alternance hydratation ↔ carbonatation

Passivation des hydrates

Quantité du CO₂ stockée estimée par ATG



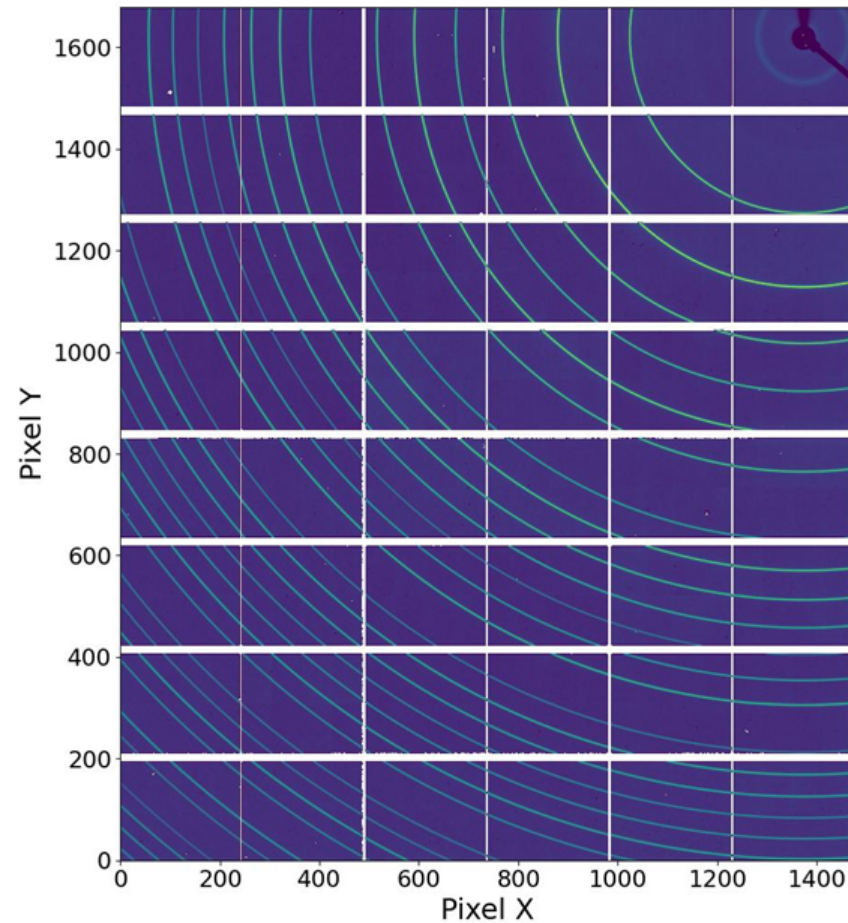
Tendances non monotones

3.5 % CO₂ — SSP-NCA (max; 24h)

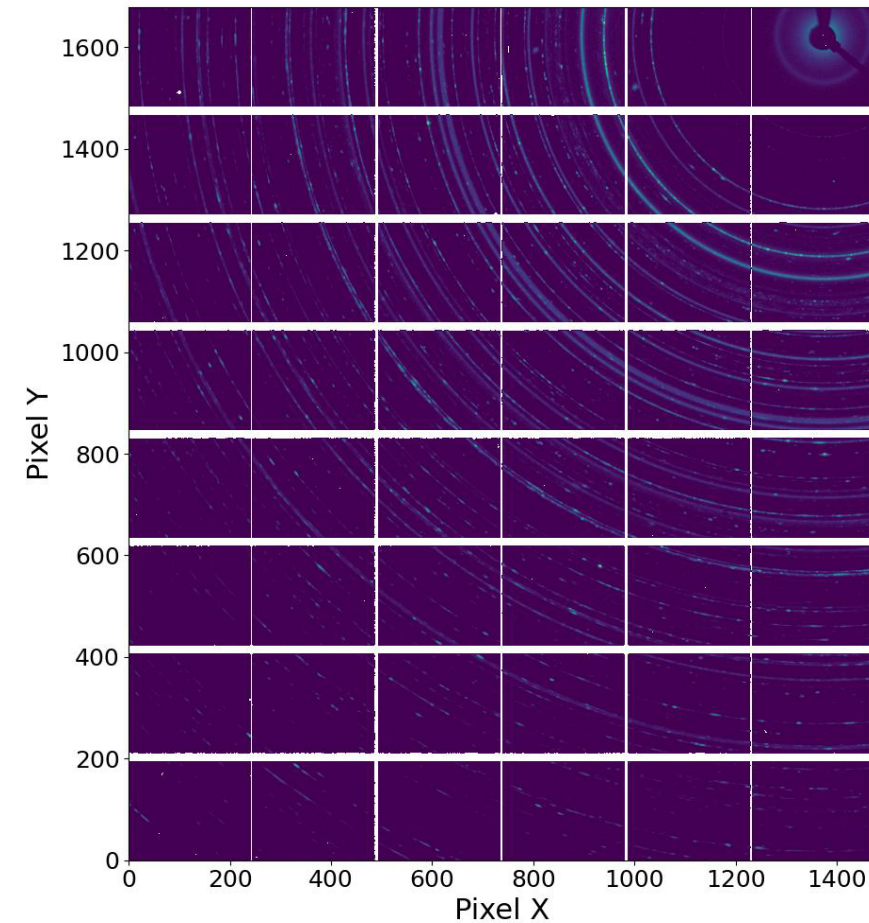
4 % CO₂ — SSP-NCA (max; 28j)

Meilleur stockage avec les échantillons SSP

Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld



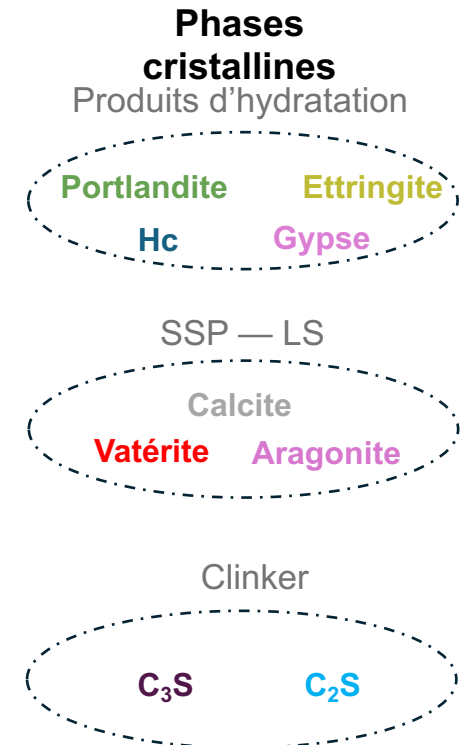
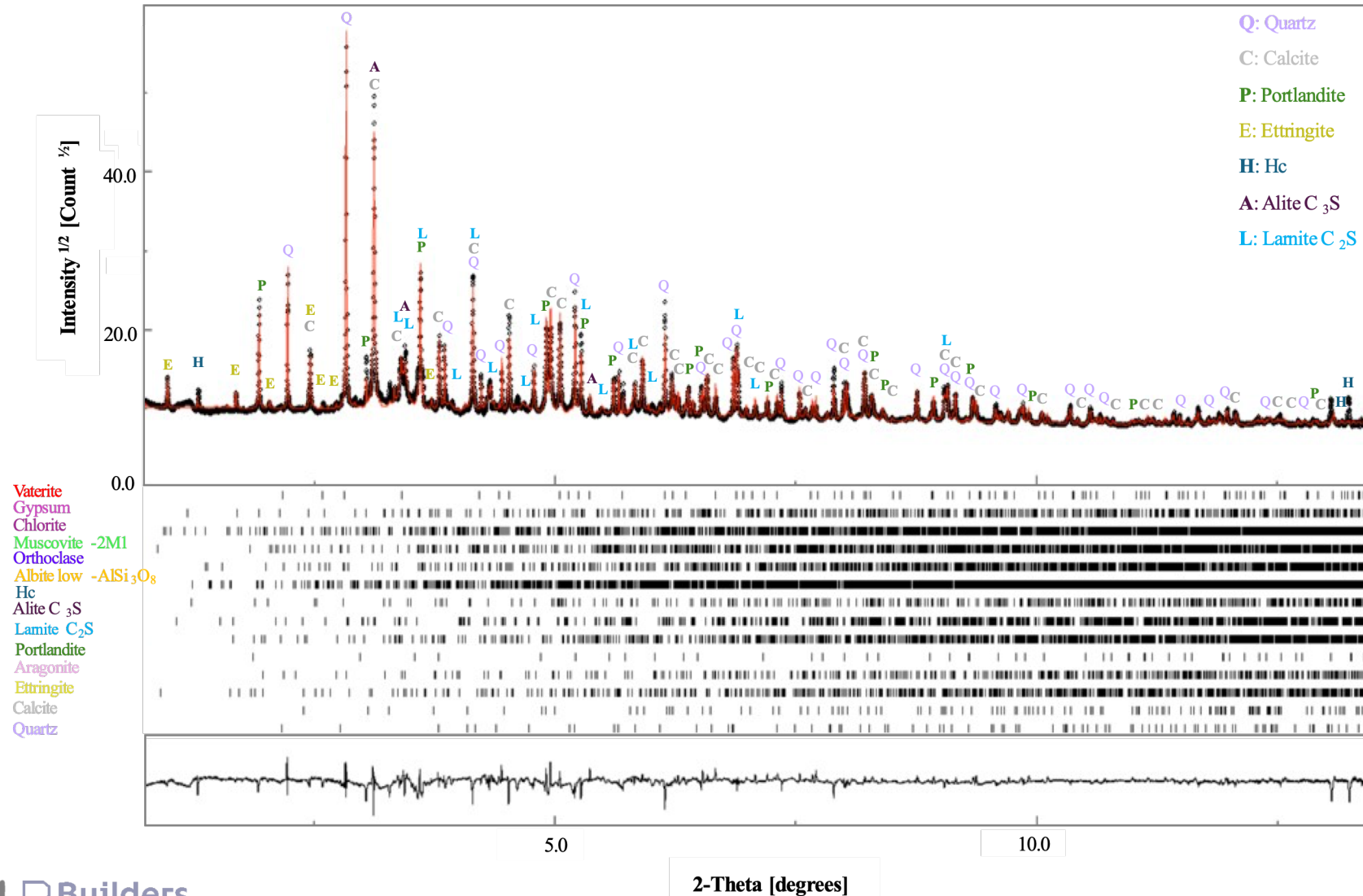
LaB₆ 660b NIST poudre



Échantillon Carbonaté

Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

Durcissement sans carbonatation - 1 jour



Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

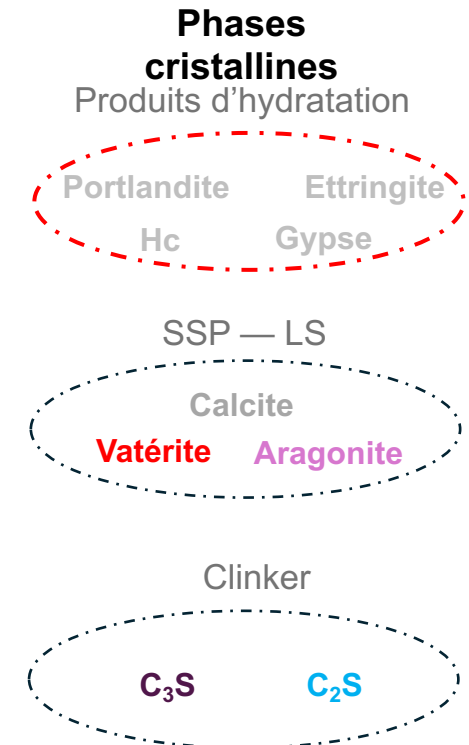
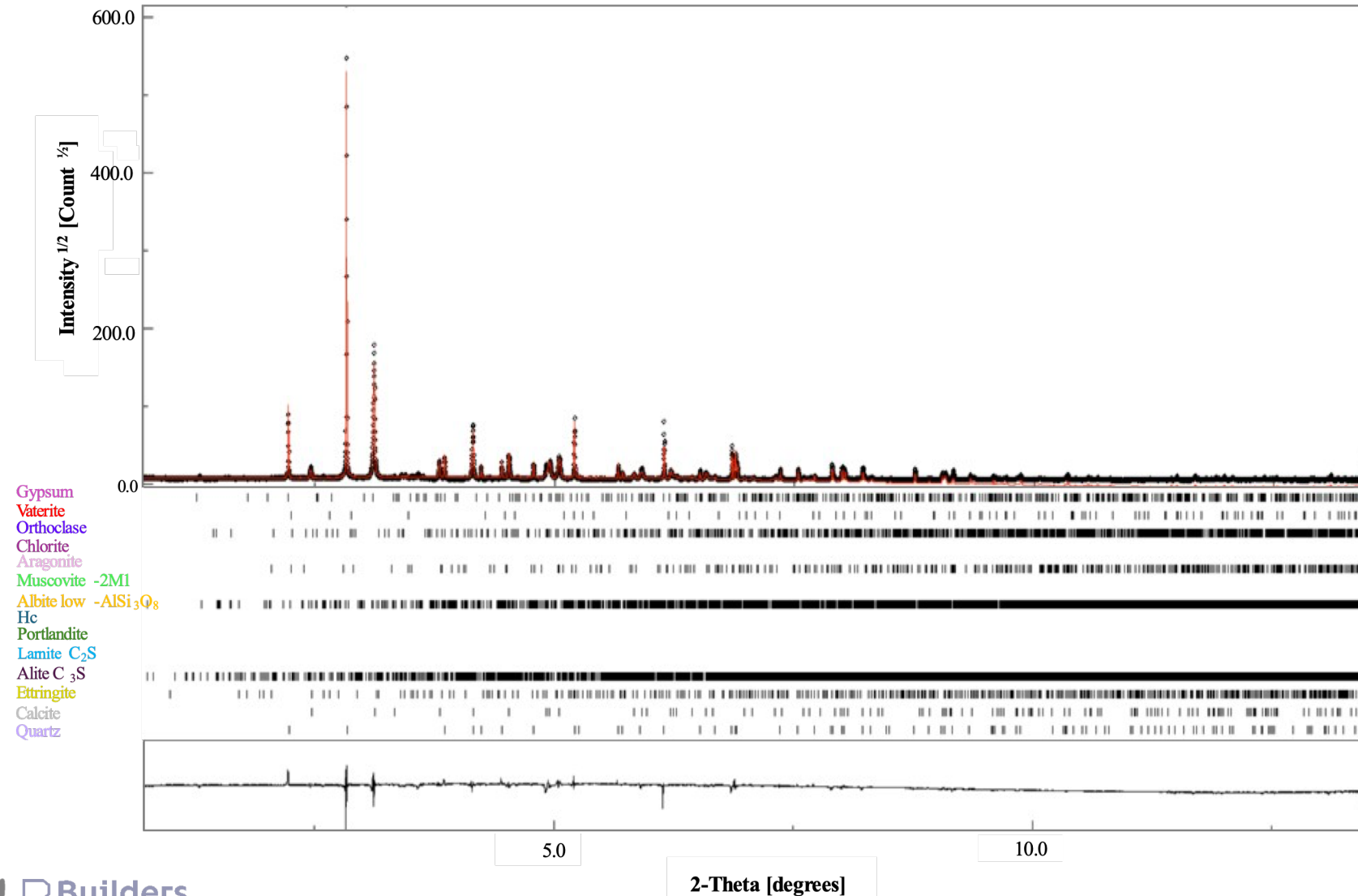
Durcissement sans carbonatation - 1 jour

cif	wt (%)			
	LS-NCA	LS-RCA	SSP-NCA	SSP-RCA
Quartz	27.08(1.2)	34.2(0.2)	14.26(0.1)	38.16(0.3)
Calcite	39(2)	36.9(0.2)	51.5(3)	34.84(0.3)
Portlandite	7.8(0.3)	3.4(0.05)	6.8(0.1)	2.60(0.06)
Ettringite	2.3(0.1)	2.02(0.1)	2.31(0.2)	1.41(0.1)
C ₃ S	2.8(0.2)	4.9(0.1)	4(0.1)	6.30(0.1)
C ₂ S	1.9(1)	16.11(0.3)	15.5(0.4)	14.06(0.4)
Hc	0.28(0.04)	0.26(0.4)	0.24(0.06)	0.2(0.05)
Aragonite	0.7(0.1)	0.7(0.1)	1.31(0.1)	1.09(0.014)
Vaterite	0.13(0.9)	0.25(0.1)	0.02(0.2)	0.27(0.1)
Gypsum	0.1(0.1)	0.1(0.1)	0.22(0.12)	0.03(0.09)

- Hydratation plus élevée dans les échantillons NCA
- Réactivité similaire de SSP et LS avec le ciment → stabilisation rapide de l'ettringite

Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

Durcissement par carbonatation - 1 jour



Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

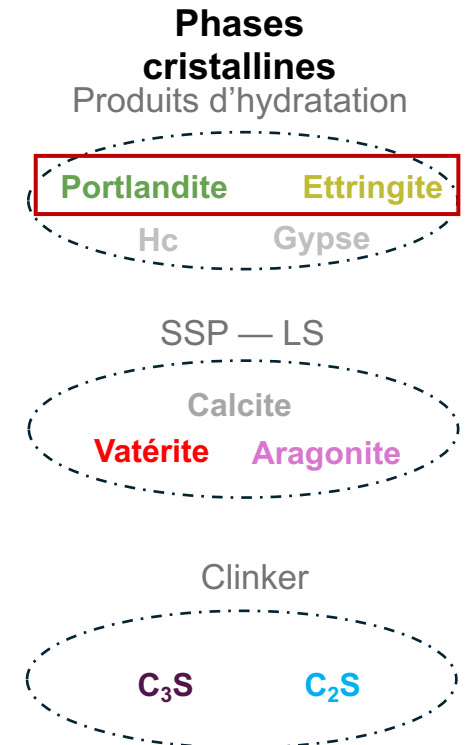
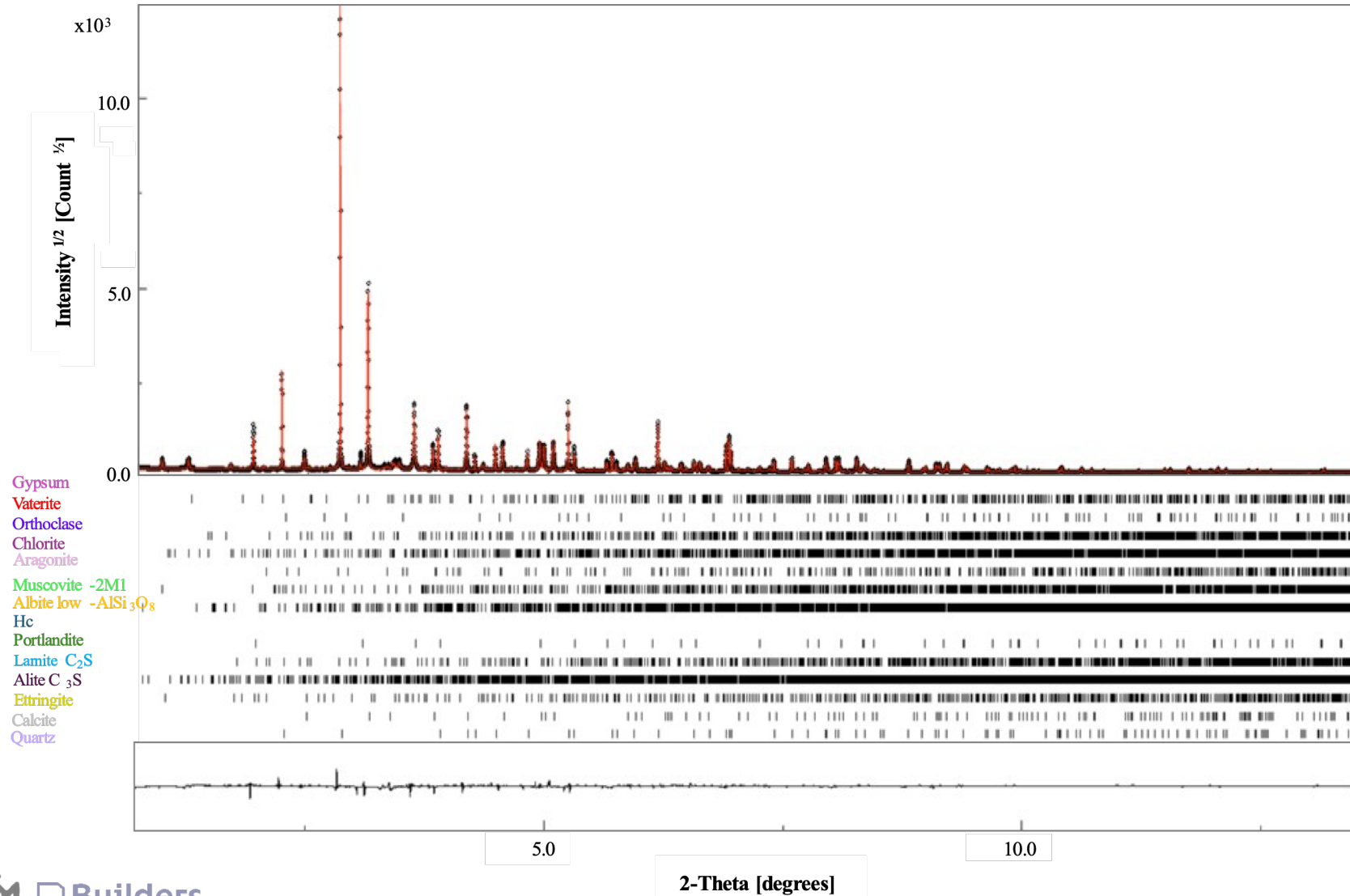
Durcissement par carbonatation - 1 jour

cif	wt (%)			
	LS-NCA	LS-RCA	SSP-NCA	SSP-RCA
Calcite	41(1)	52(0.4)	55(1)	54(1)
Aragonite	2.06	2.8(0.1)	1.33(0.2)	1.75(0.1)
Vaterite	0.96	1.3(0.1)	0.6(0.2)	0.78(0.07)
Portlandite	-	0.2(0.03)	-	0.15(0.03)
Ettringite	0.2(0.6)	0.2(0.1)	0.2(0.9)	0.2(0.1)
Hc	-	-	0.7(0.1)	-
C ₃ S	1.9(0.3)	1.5(0.1)	2.4(0.2)	2.5(0.1)
C ₂ S	-	2.7(0.1)	1.8(0.3)	2.58(0.1)
Gypsum	0.81	0.5(0.1)	0.1(0.2)	0.36(0.7)
Quartz	50(1)	37(0.3)	38(0.5)	34.7(0.2)

- Augmentation significative de la calcite
- Légère augmentation de l'aragonite et la vaterite
- Ca(OH)₂ insuffisant → baisse du pH → décalcification du C-S-H
- Carbonatation simultanée des hydrates

Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

Durcissement par carbonatation - 7 jours



Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

Durcissement par carbonatation - 7 jours

cif	wt (%)			
	LS-NCA	LS-RCA	SSP-NCA	SSP-RCA
Calcite	29.2(0.1)	65(0.4)	57.5(0.3)	65.6(0.2)
Aragonite	1.25(0.1)	3.1(0.1)	0.1(0.1)	1.9(0.2)
Vaterite	0.4(0.1)	2.5(0.1)	0.01(0.06)	1.1(0.1)
Portlandite	9.6(0.1)	0.17(0.03)	0.004 (0.03)	0.01(0.07)
Ettringite	4.1(0.1)	0.04(0.08)	0.003(0.064)	0.001(0.041)
Hc	-	-	0.4(0.1)	-
C ₃ S	1.6(0.1)	0.6(0.1)	0.02(0.08)	0.01(0.08)
C ₂ S	7.2(0.1)	1.4(0.1)	0.01(0.3)	0.6(0.2)
Gypsum	4.5(0.5)	0.1(0.1)	5.1(0.6)	0.9(0.2)
Quartz	39(0.2)	23.9(0.1)	35.7(0.2)	26.5(0.3)

- Précipitation continue de la calcite

LS-NCA

≈50% →
≈29%

Dissolution de la calcite

Re-précipitation

Hydratation

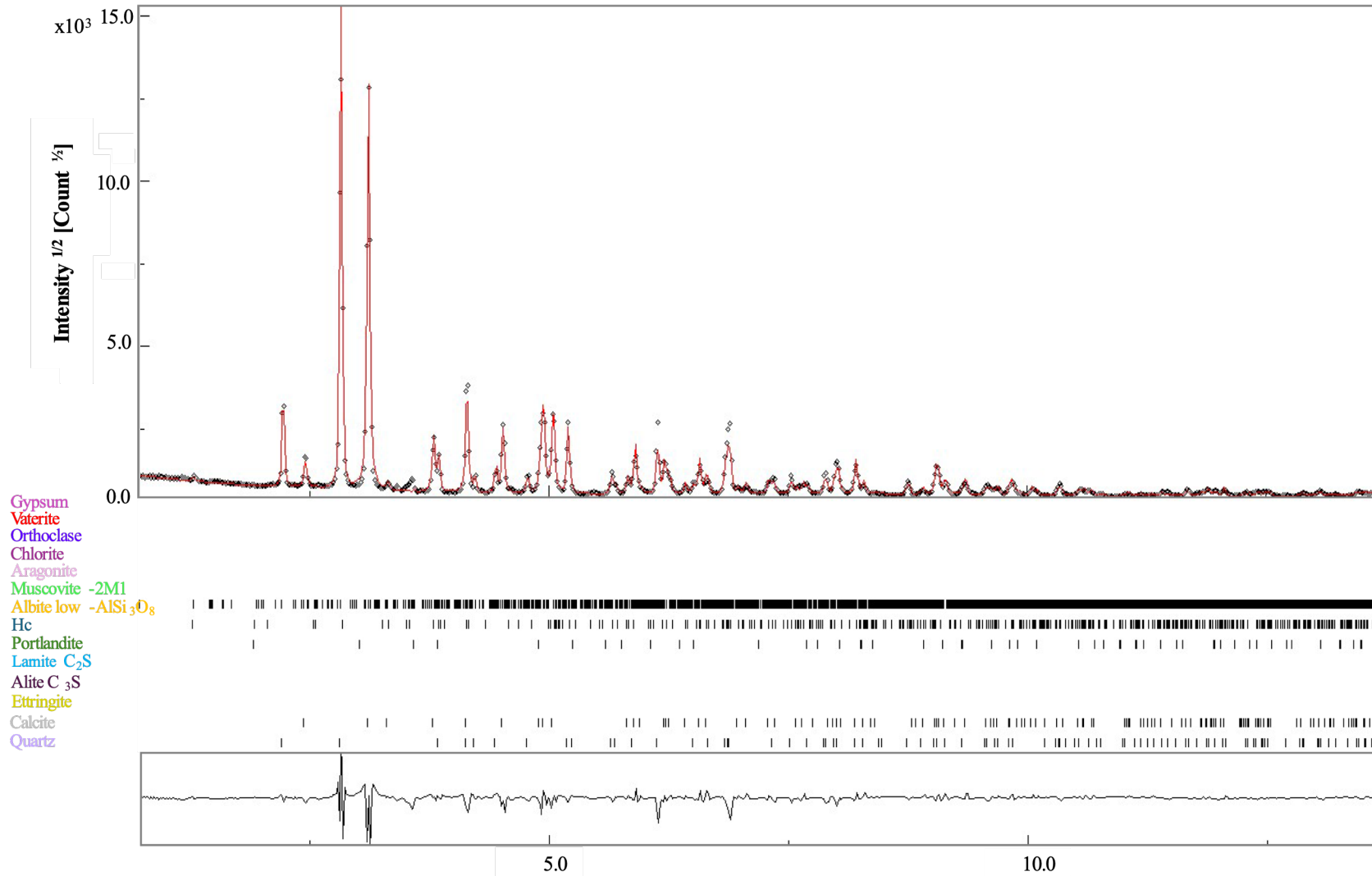


- Conversion de l'aragonite et la vaterite en calcite dans

SSP-NCA

Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

Durcissement par carbonatation - 28 jours



Phases

cristallines

Produits d'hydratation

Portlandite

Hc

Ettringite

Gypse

SSP — LS

Calcite

Vatérite

Aragonite

Clinker

C₃S

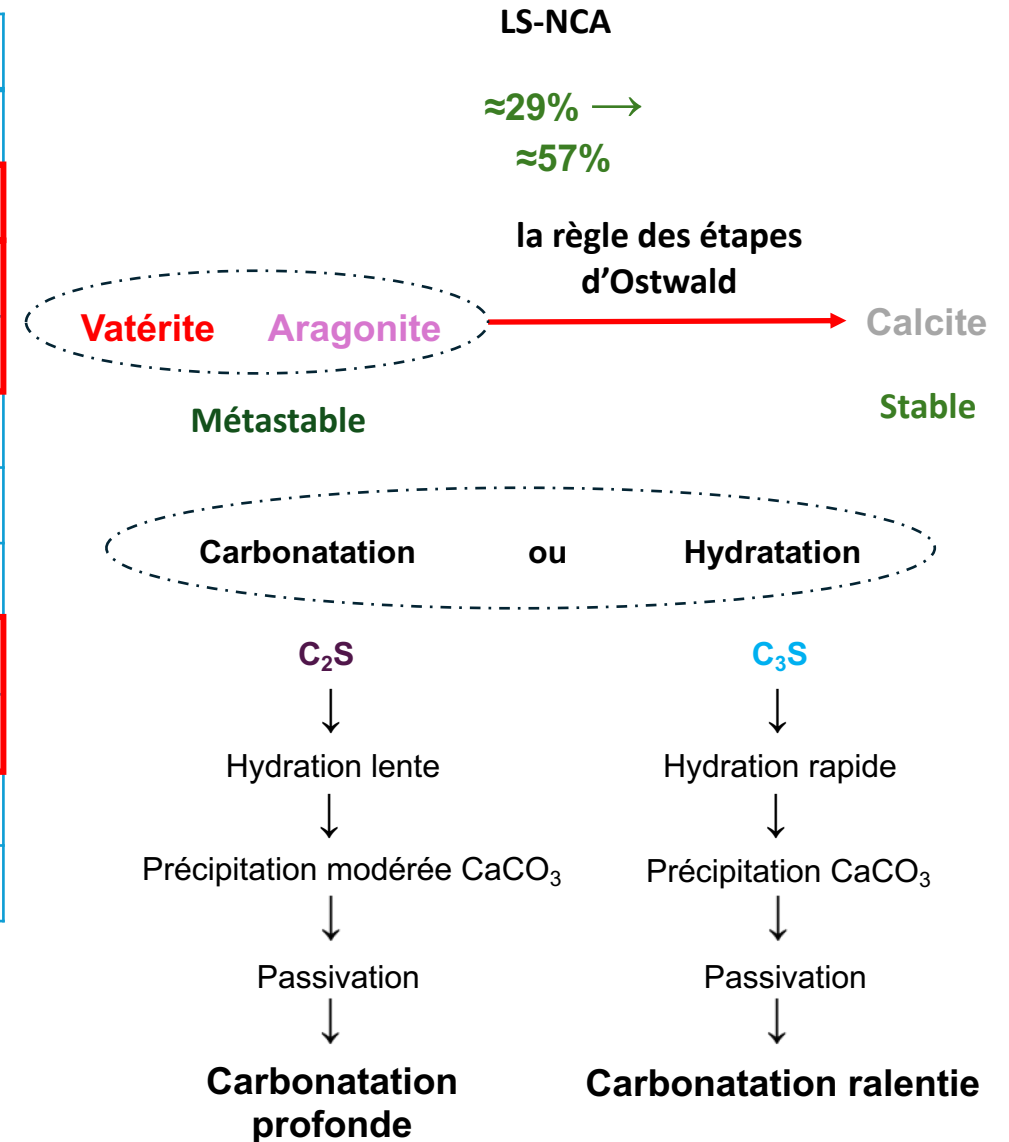
C₂S

Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

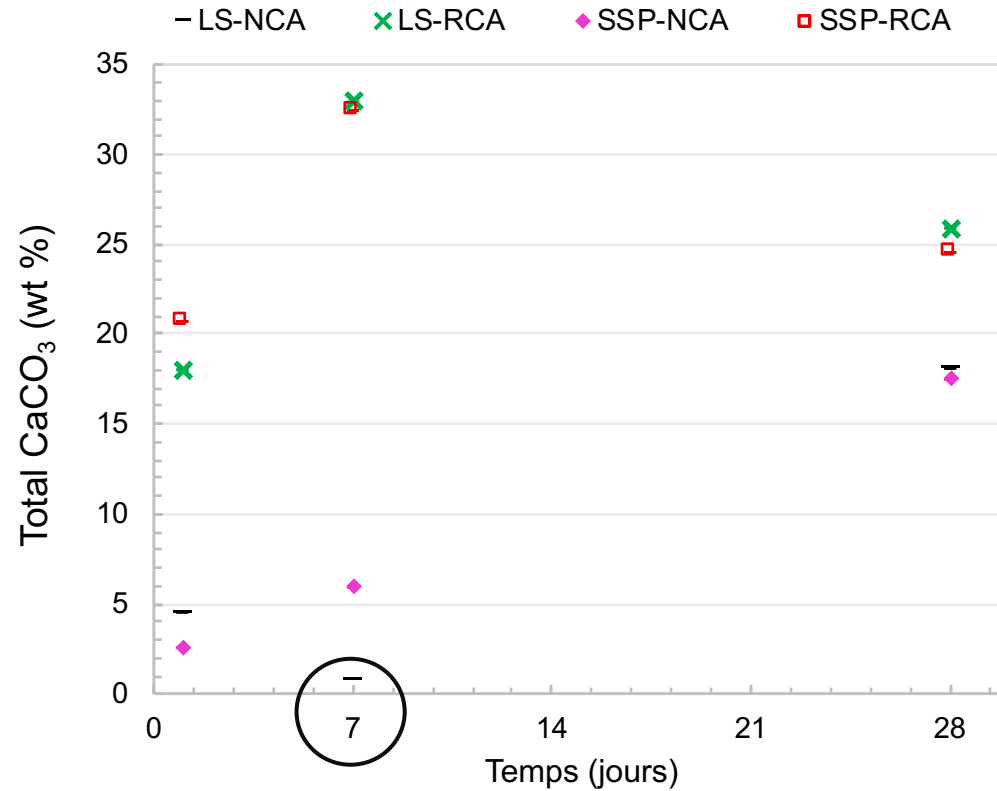
Durcissement par carbonatation - 28 jour

cif	wt (%)			
	LS-NCA	LS-RCA	SSP-NCA	SSP-RCA
Calcite	57(1)	62.7(0.6)	69(1.6)	59.3(0.4)
Aragonite	-	0.005(0.194)	-	0.6(0.2)
Vaterite	-	0.3(0.2)	-	0.3(0.2)
Portlandite		0.1(0.1)	-	0.27(0.06)
Ettringite	-	-	-	-
Hc	0.7(22)	-	-	-
C ₃ S	-	-	-	-
C ₂ S	-	-	-	-
Gypsum	-	-	-	0.2(0.2)
Quartz	42(1)	37(1)	31(2)	39(0.5)

○ Précipitation continue de la calcite



Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

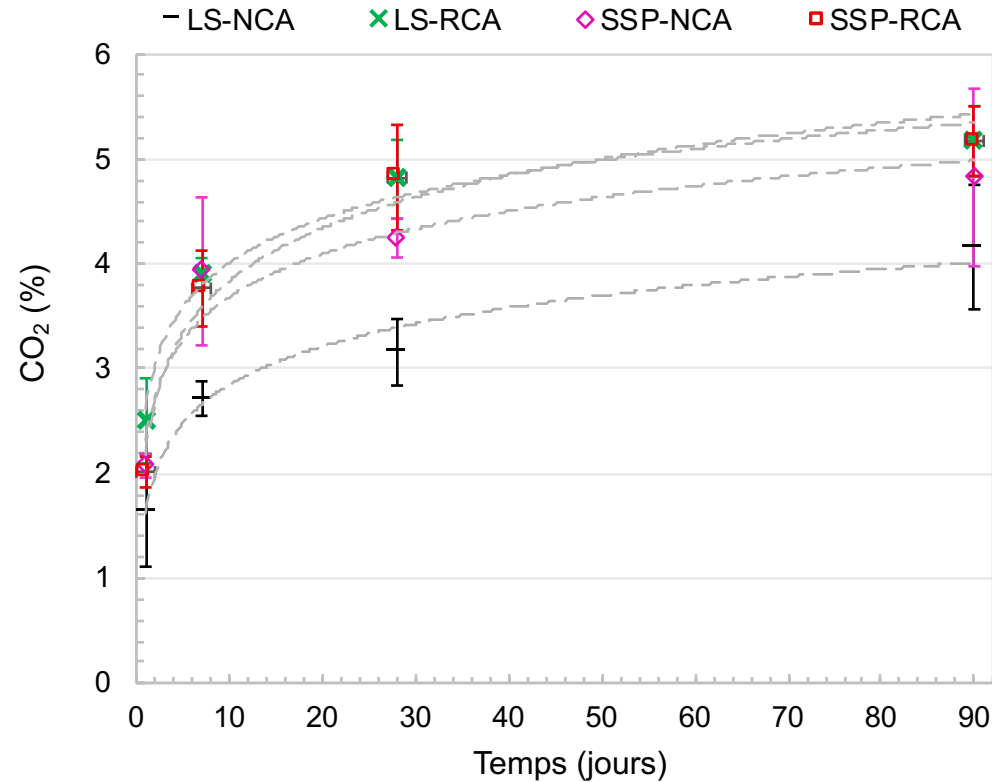


○ RCA > NCA pour l'absorption de CO₂ à tous les âges

Max absorption ≈ 32–33 wt% à 7 jours → ≈ 25–26 wt% à 28 jours

Hydratation dominant dans LS-NCA au jeune âge

Quantité du CO₂ stockée estimée par méthode perte de masse



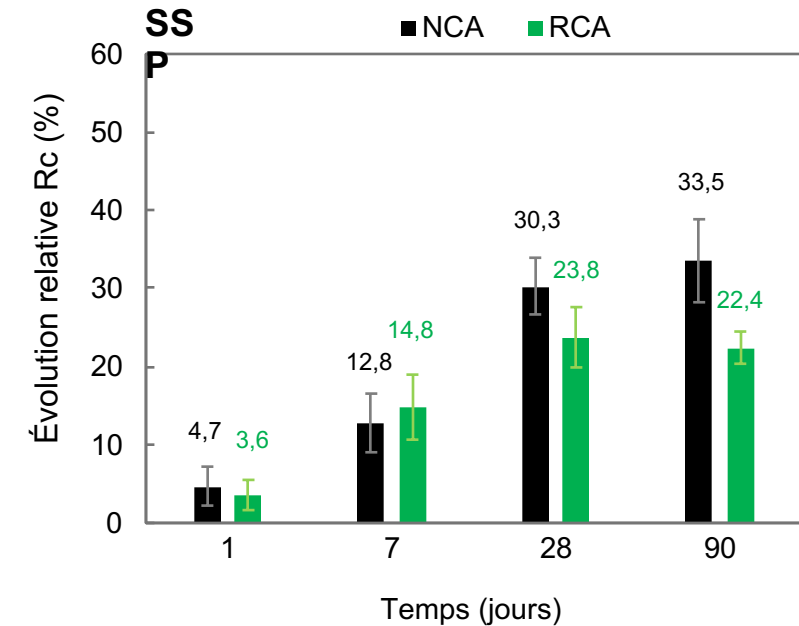
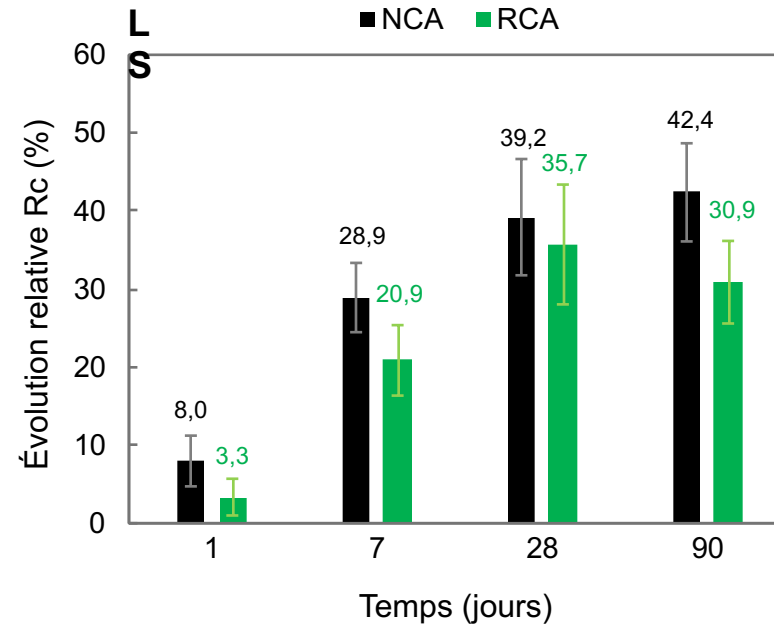
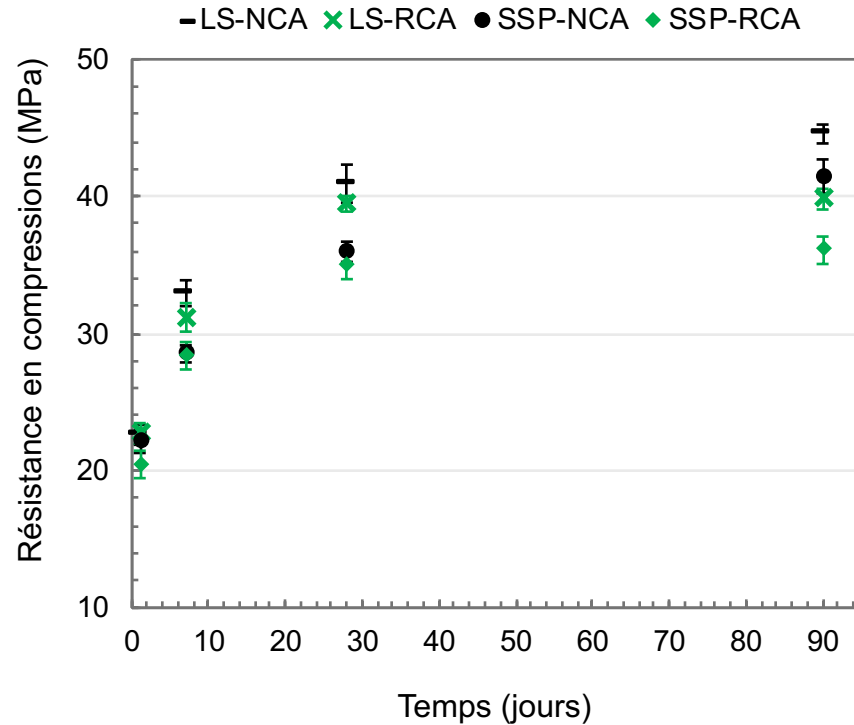
Min absorption $\approx 2\%$ par LS-NCA
24h

Max absorption $\approx 5\%$ par SSP-
RCA
90 jours

RCA > NCA
SSP > LS

Effet du durcissement par carbonatation sur les propriétés des BAPs

Résistance en compression

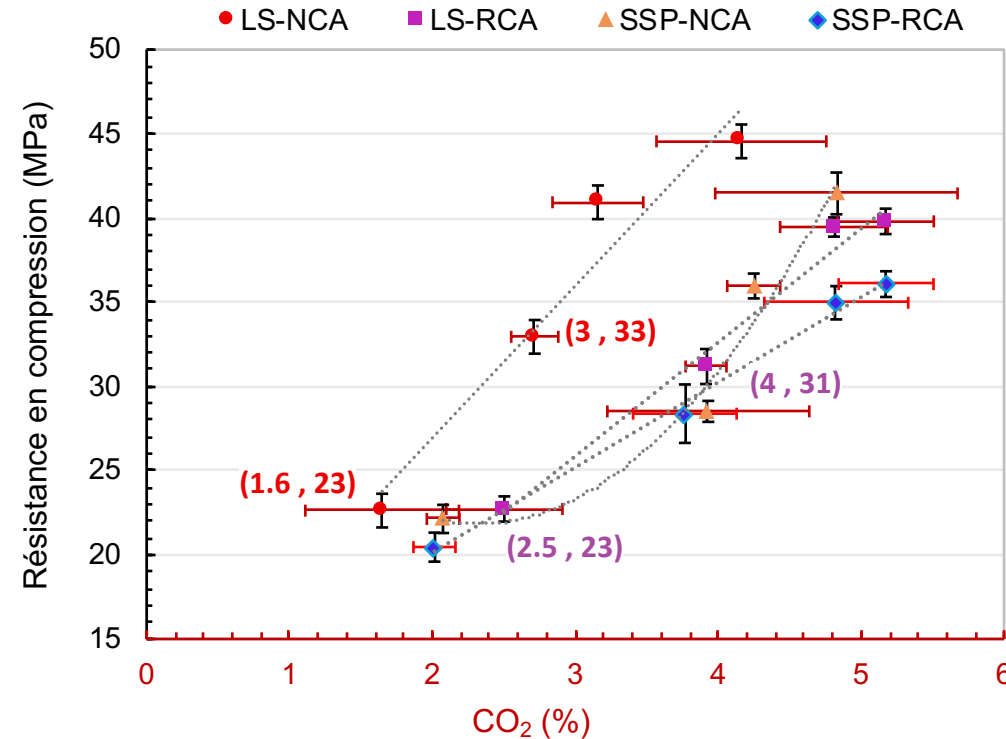


Le durcissement par carbonatation
augmente la résistance en compression
sans effet négatif à long terme

LS-NCA → ↑ résistance mécanique | ↓ absorption de CO₂

La carbonatation est-elle le seul facteur ?

Résistance en compression: Relation avec le CO₂ stocké (méthode perte de masse)

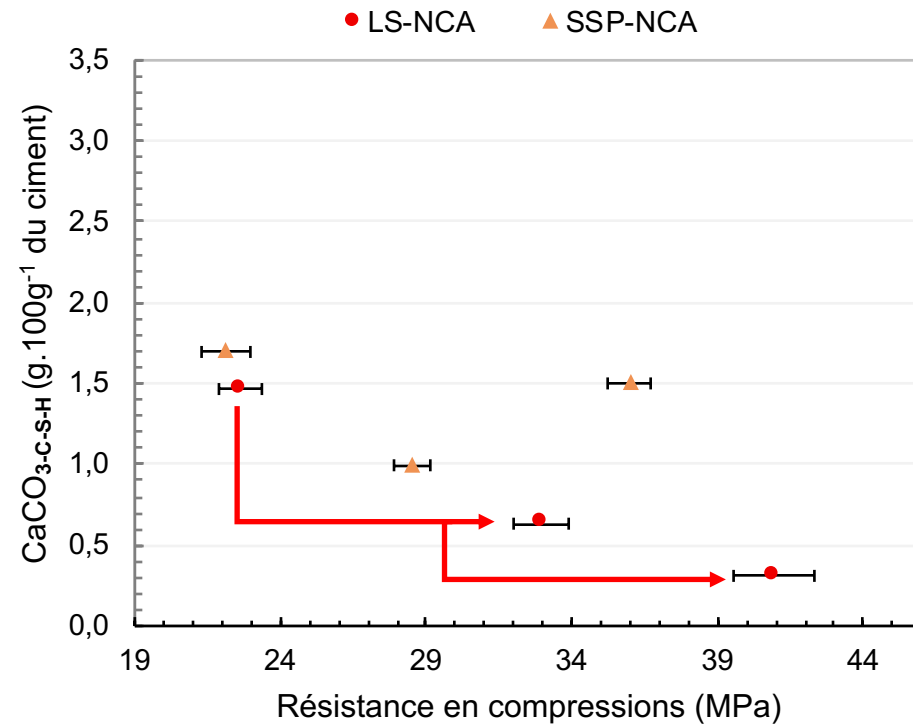


CO₂ n'est pas le seul facteur

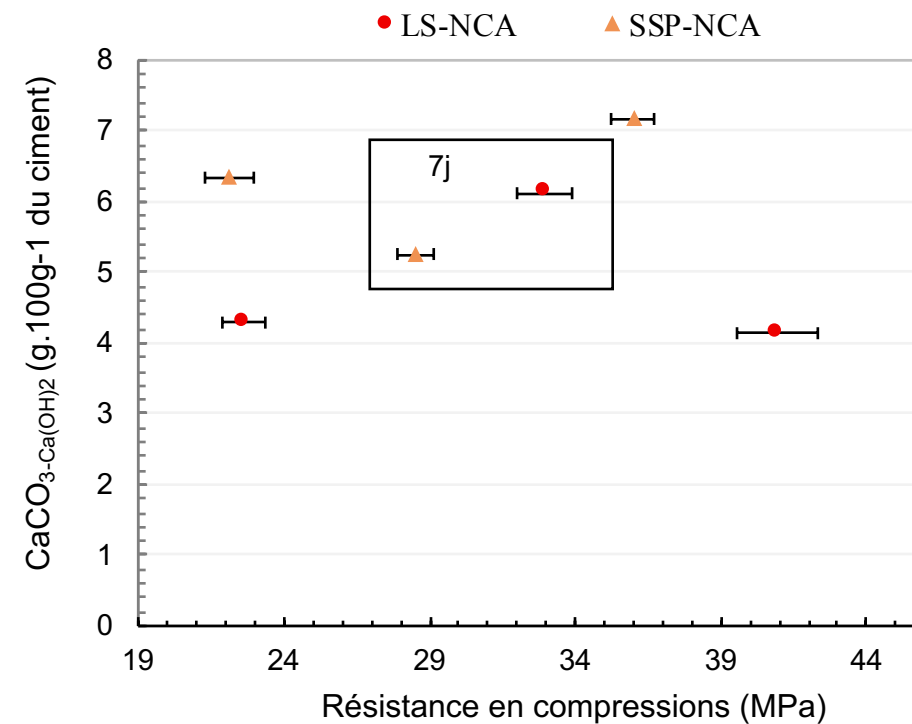
Quels autres mécanismes contrôlent réellement l'évolution de la résistance ?

Résistance en compression: Paramètres influençant son évolution

C-S-H



Ca(OH)₂



Moins de CaCO₃ issu du C-S-H → Décalcification limitée → Meilleure Rc

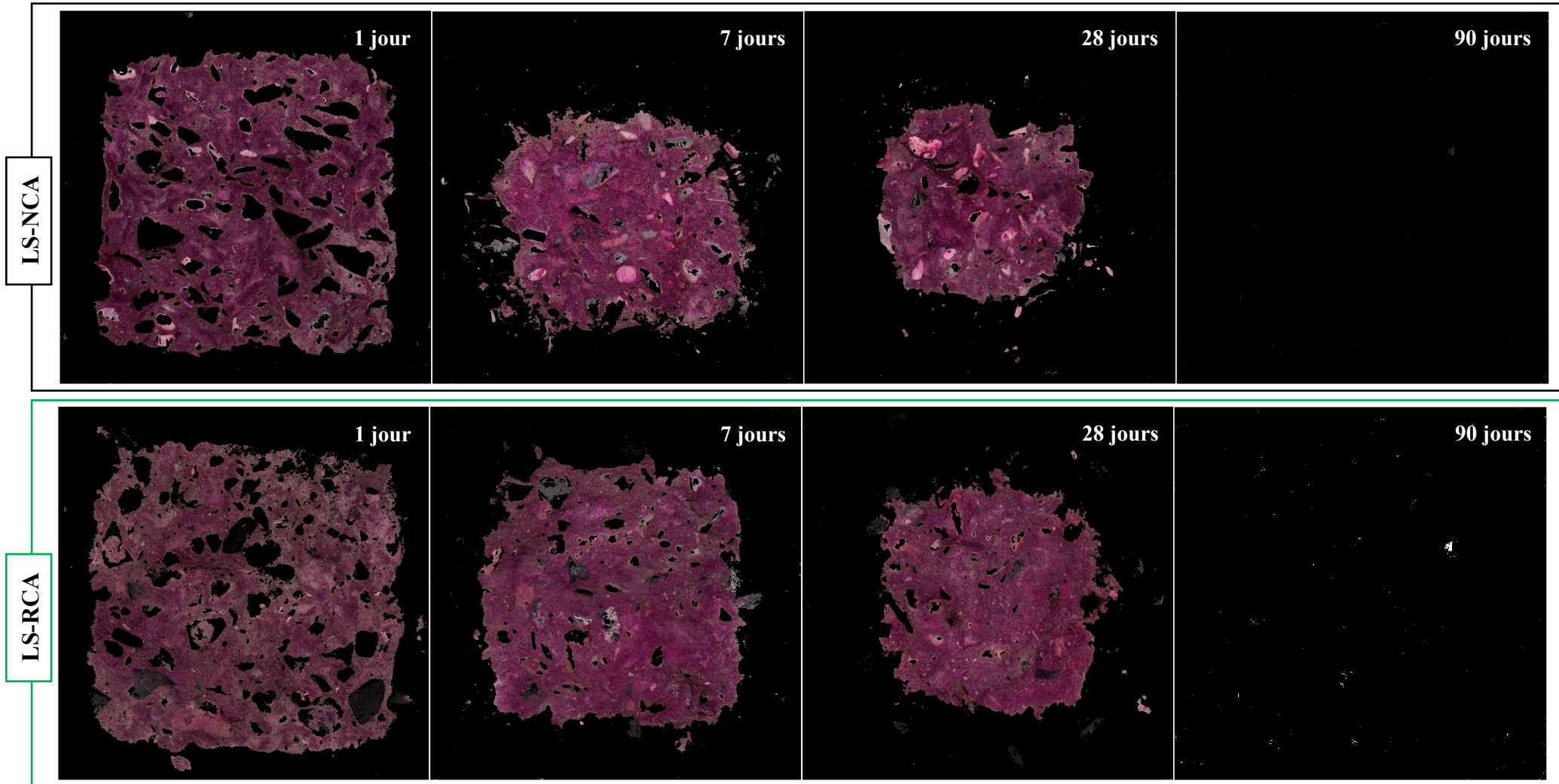
Formation de Ca(OH)₂ > consommation par la carbonatation

pH

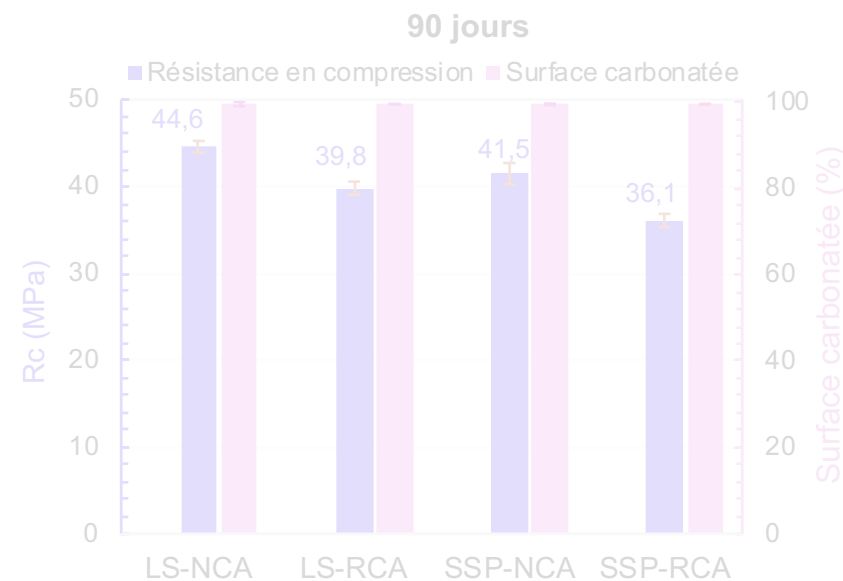
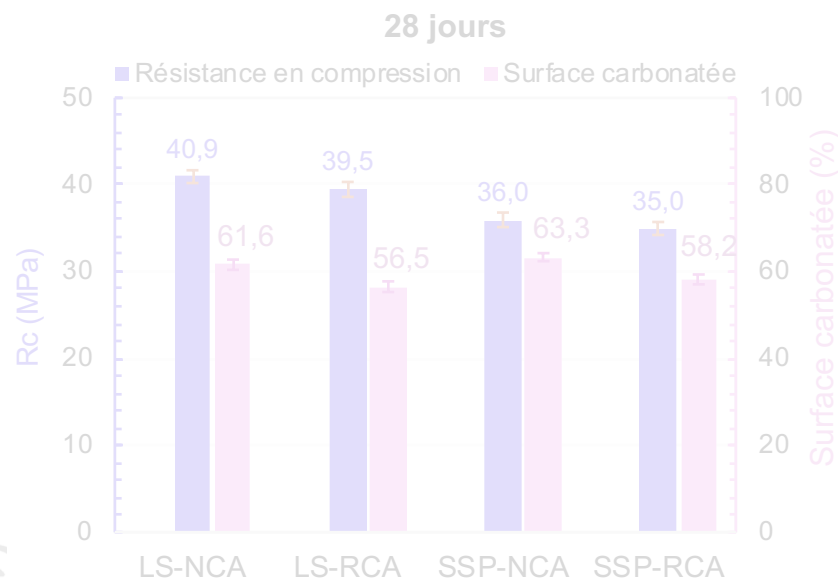
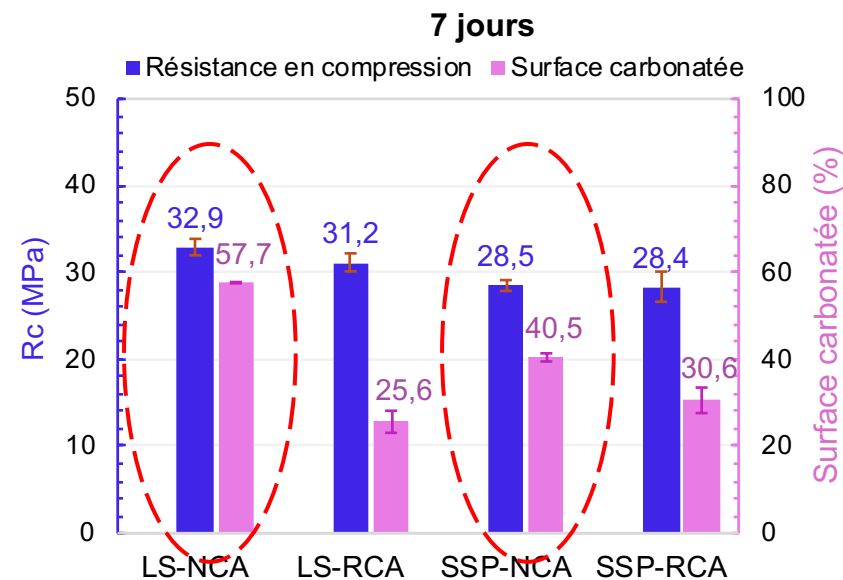
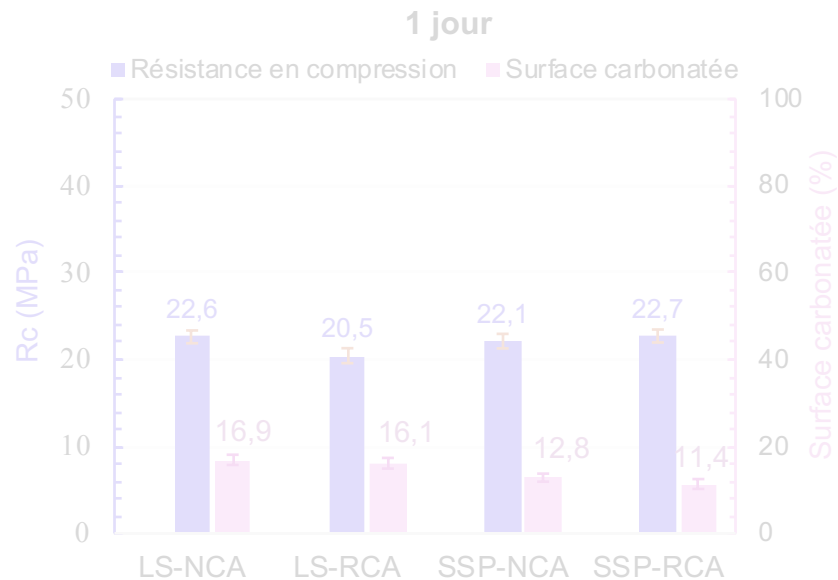


Équilibre entre carbonatation
et hydratation

Résistance en compression: Paramètres influençant son évolution



Résistance en compression: Paramètres influençant son évolution



LS-NCA / SSP-NCA

↑ Surface carbonatée → ↑ résistance en compression

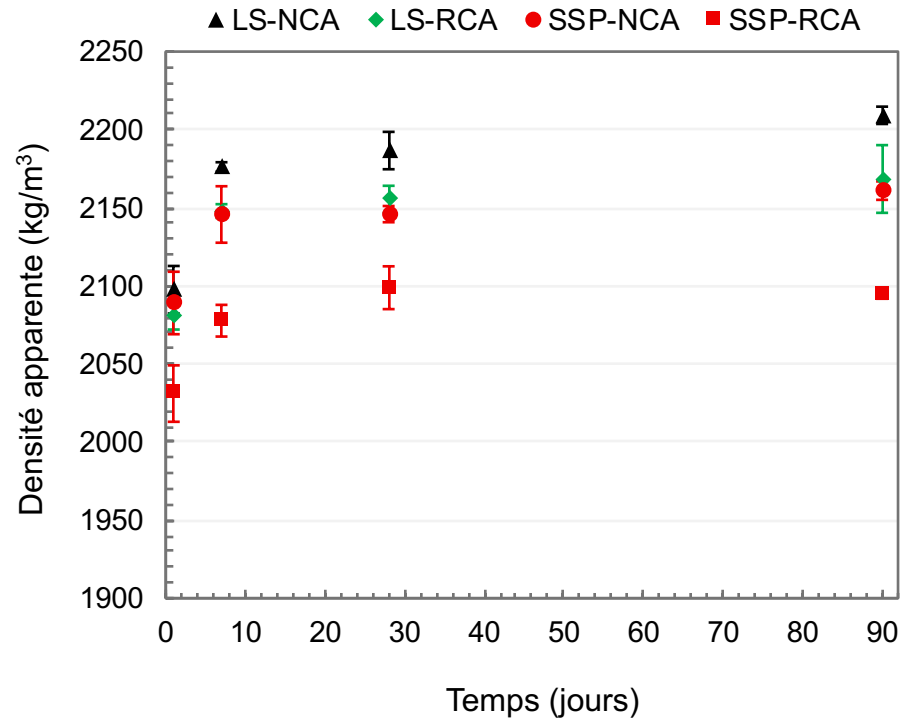


CaCO₃ réparti dans un volume

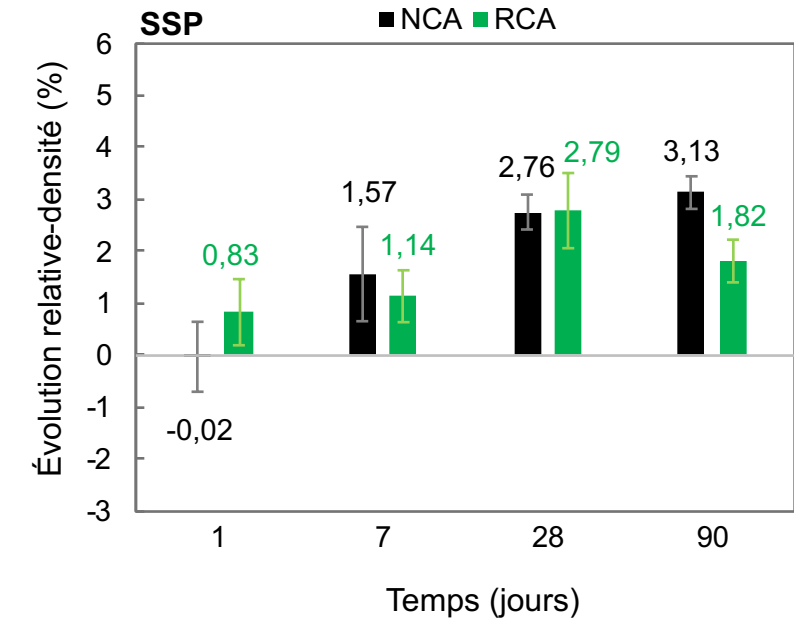
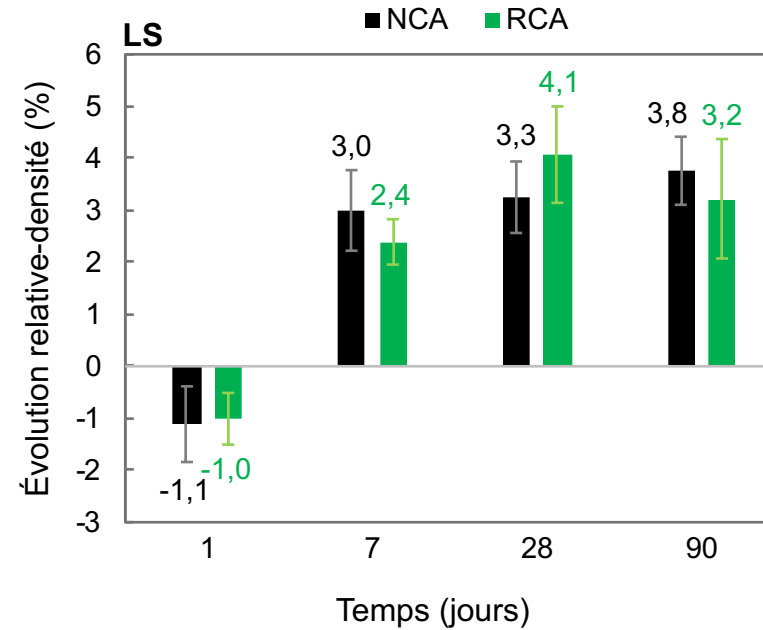


Effet plus bénéfique

Densité apparente



De l'état initial **scellé** au durcissement par carbonatation



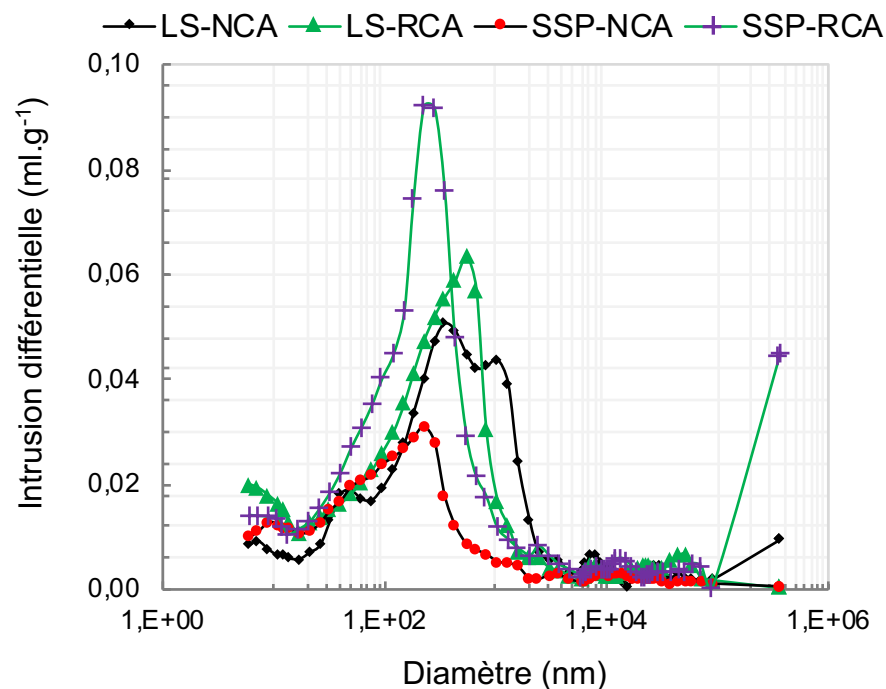
Durcissement par carbonatation non encore optimal à 1 jour



Augmentation de la densité à partir de
7 jours

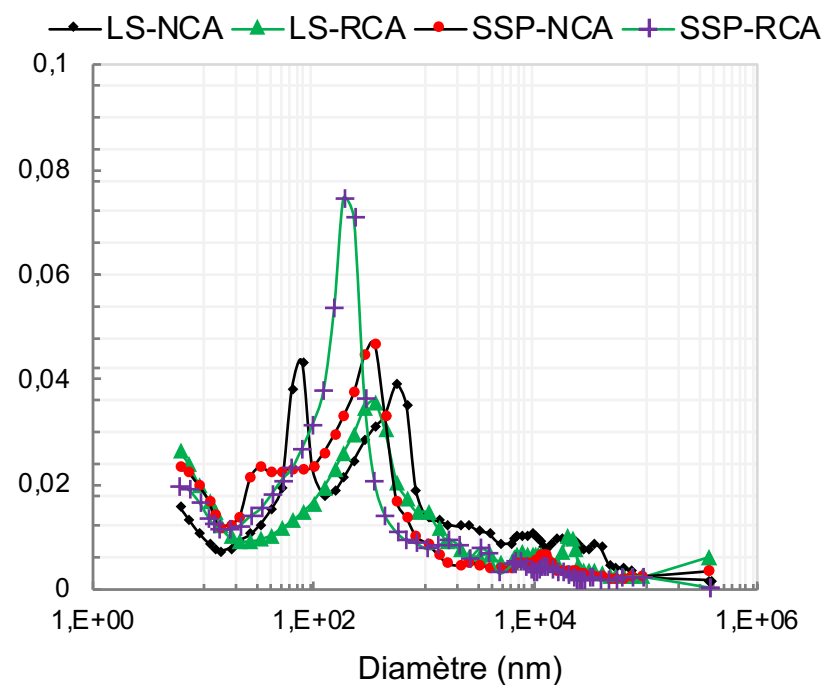
Porosité

1 jour



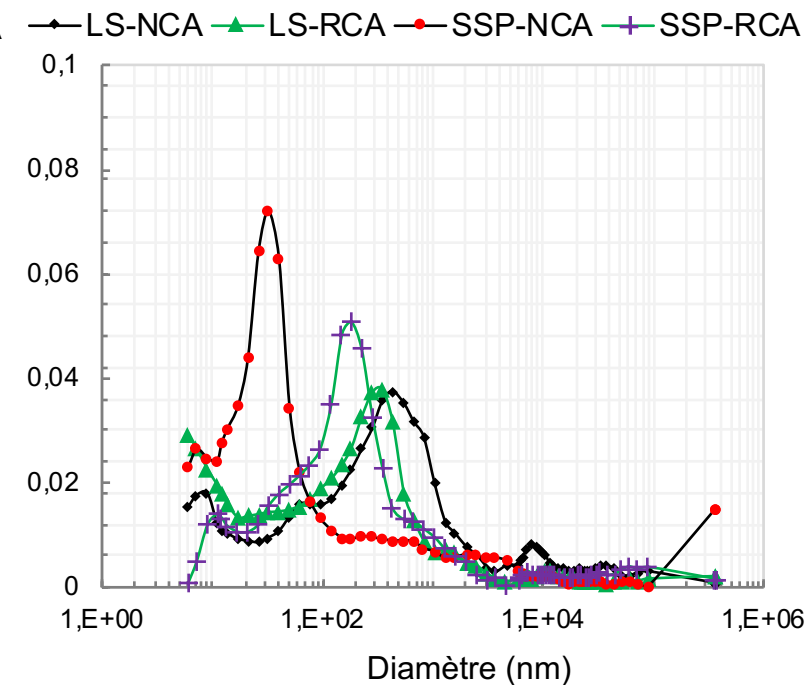
1 jours	Porosité totale (%)
LS-NCA	15.8
LS-RCA	16.4
SSP-NCA	10.1
SSP-RCA	18.8

7 jours



7 jours	Porosité totale (%)
LS-NCA	14.2
LS-RCA	12.1
SSP-NCA	13.5
SSP-RCA	14.1

28 jours



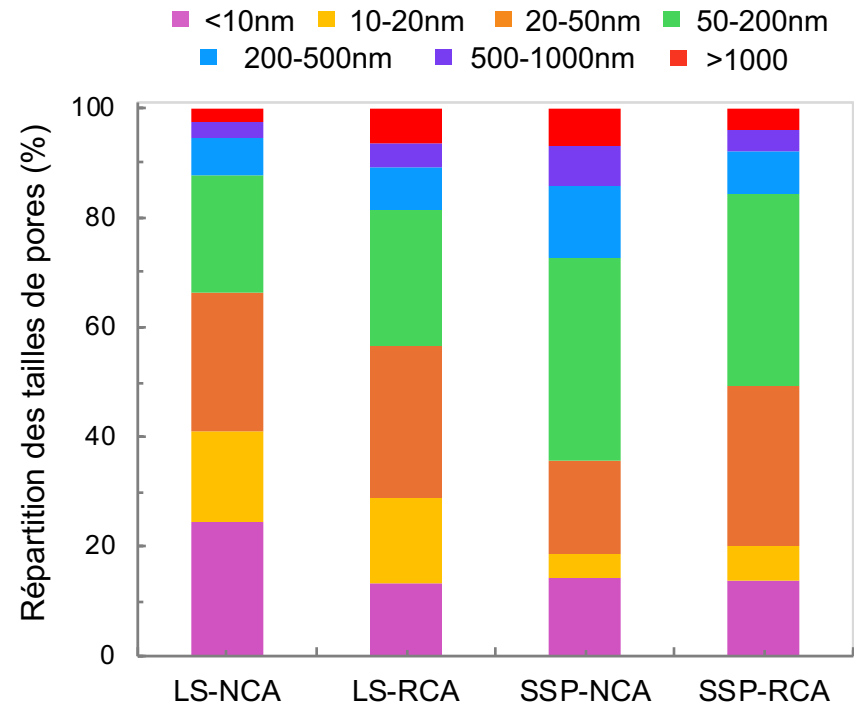
28 jours	Porosité totale (%)
LS-NCA	12.5
LS-RCA	11.3
SSP-NCA	13.3
SSP-RCA	12.7

Affinement de la porosité dans les systèmes

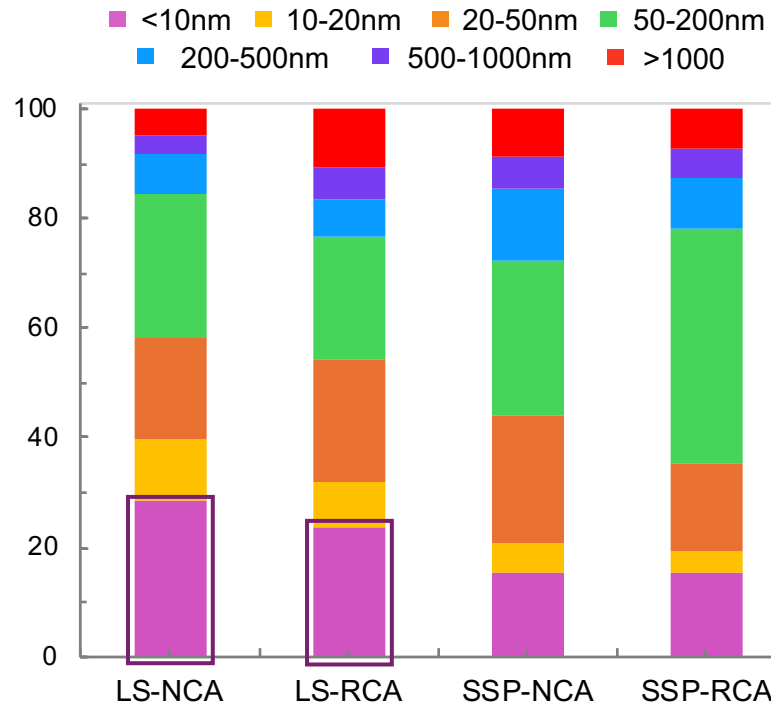
SSP → sur-carbonatation → augmentation de porosité

Porosité

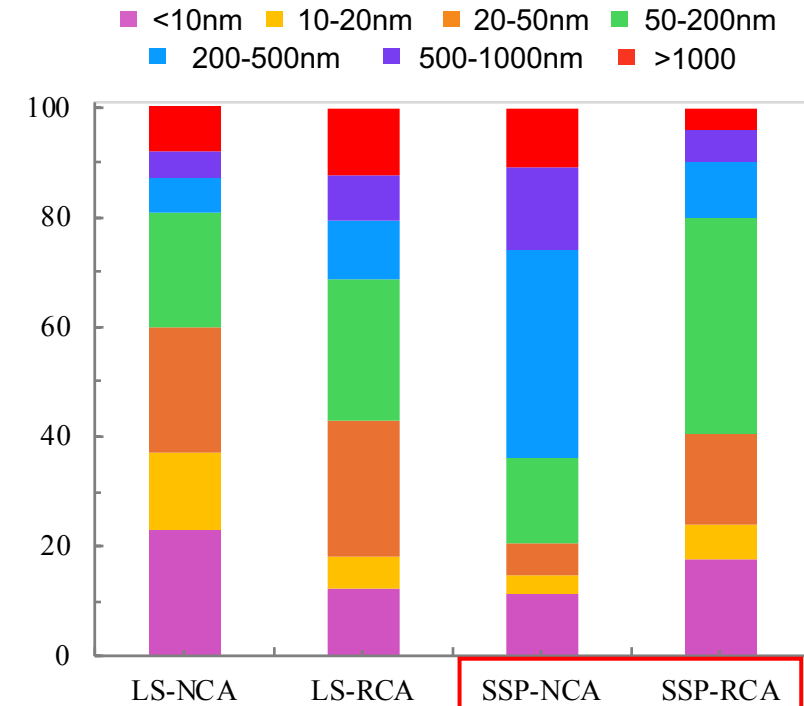
1 jour



7 jours



28 jours



Précipitation des $\text{CaCO}_3 \rightarrow \uparrow$ pores <200 nm \rightarrow microstructure plus dense

LS-BAPs: porosité gel <10 nm \rightarrow hydratation efficace

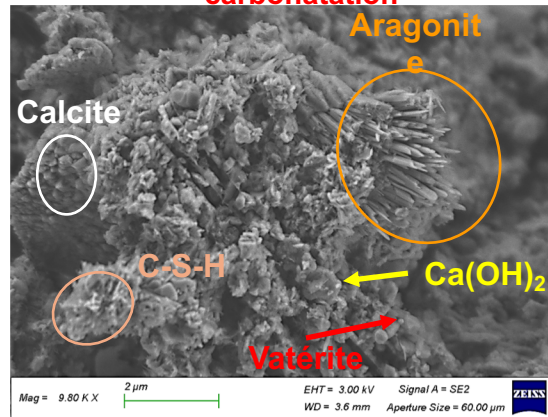
SSP-BAPs: \uparrow 50–200 nm et >200 nm \rightarrow microstructure poreuse plus grossière

Analyse de la microstructure: Observations MEB

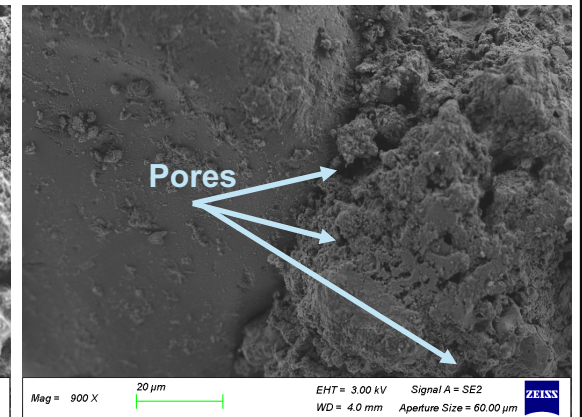
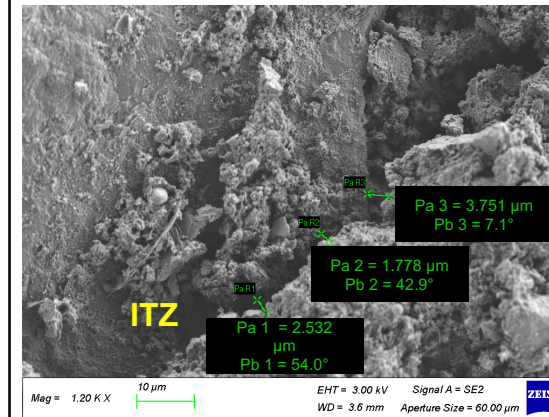
1j de durcissement sans CO₂



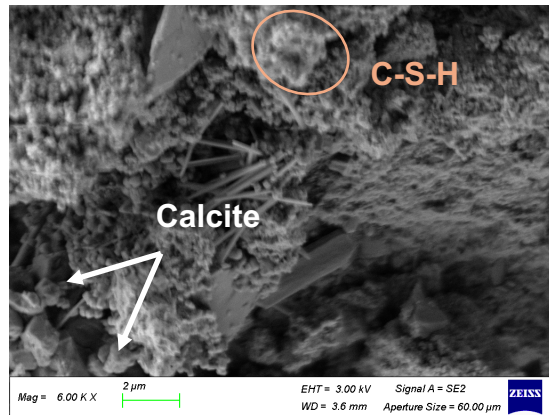
7jrs de durcissement par carbonatation



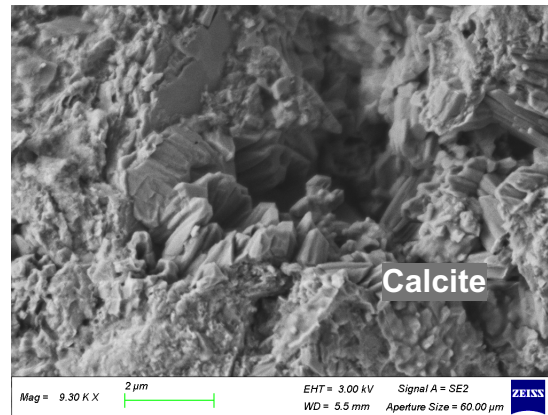
28 jrs de durcissement sans CO₂



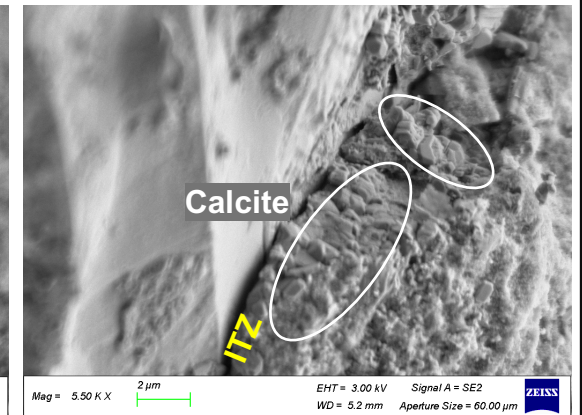
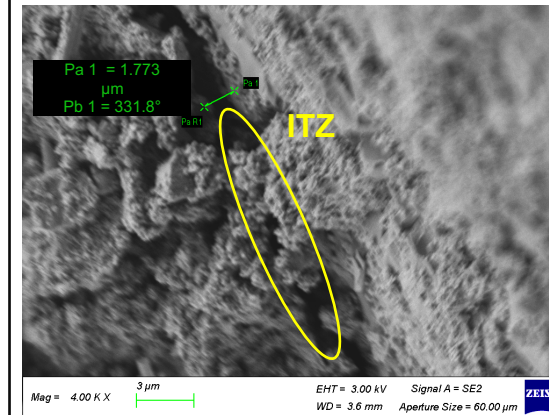
(c) 28 jrs



90 jrs



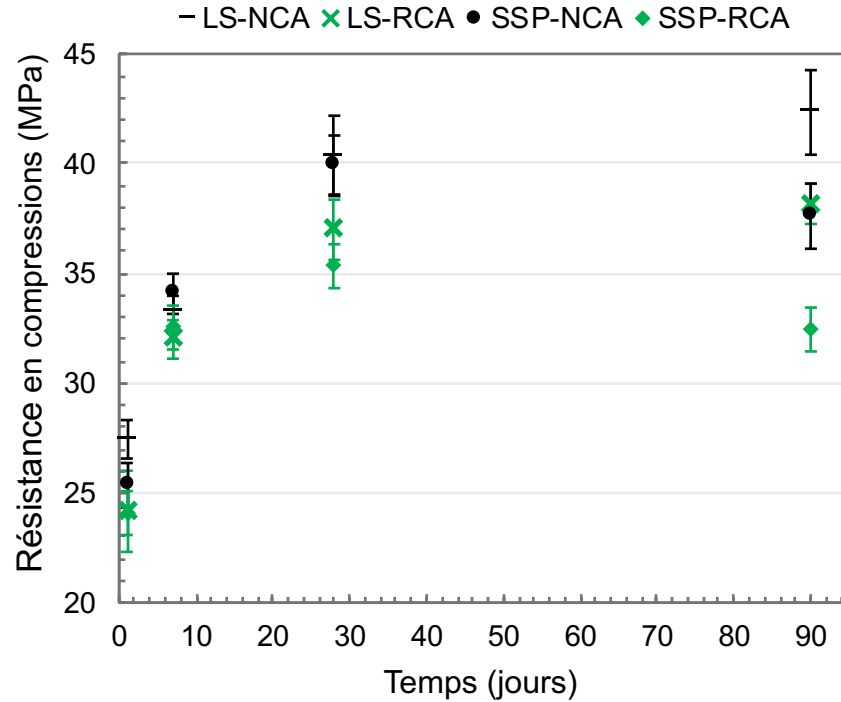
28 jrs de durcissement par carbonatation



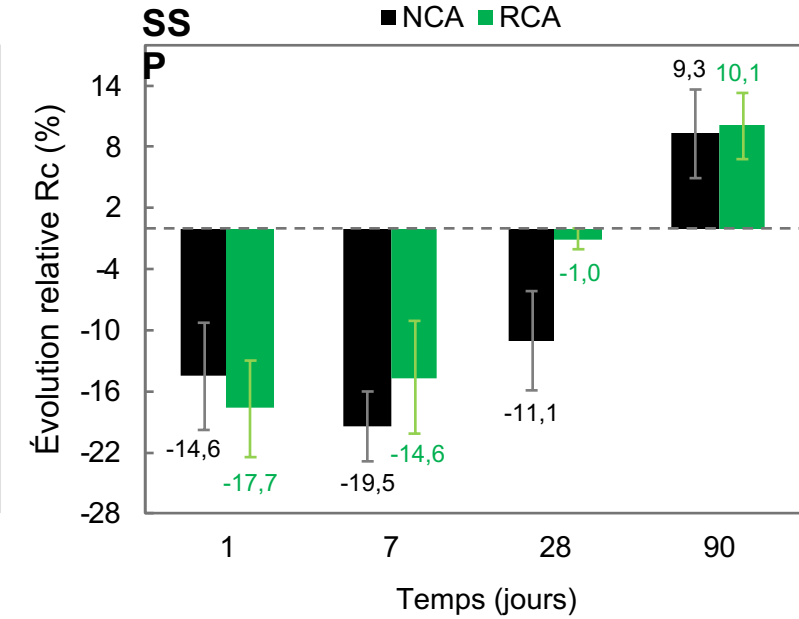
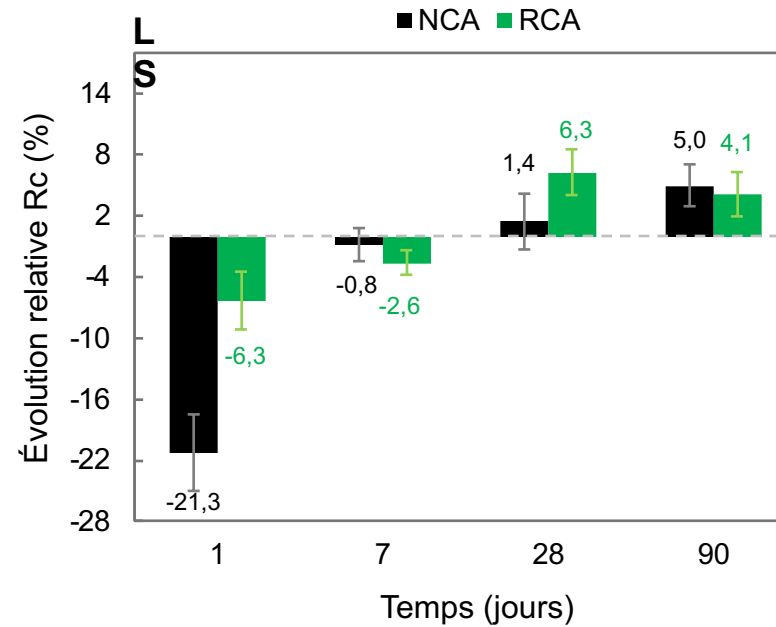
Carbonatation ou durcissement standard ?

Résistance en compression

Durcissement standard



De l'état initial **standard** au durcissement par carbonatation



résistance initiale < durcissement standard

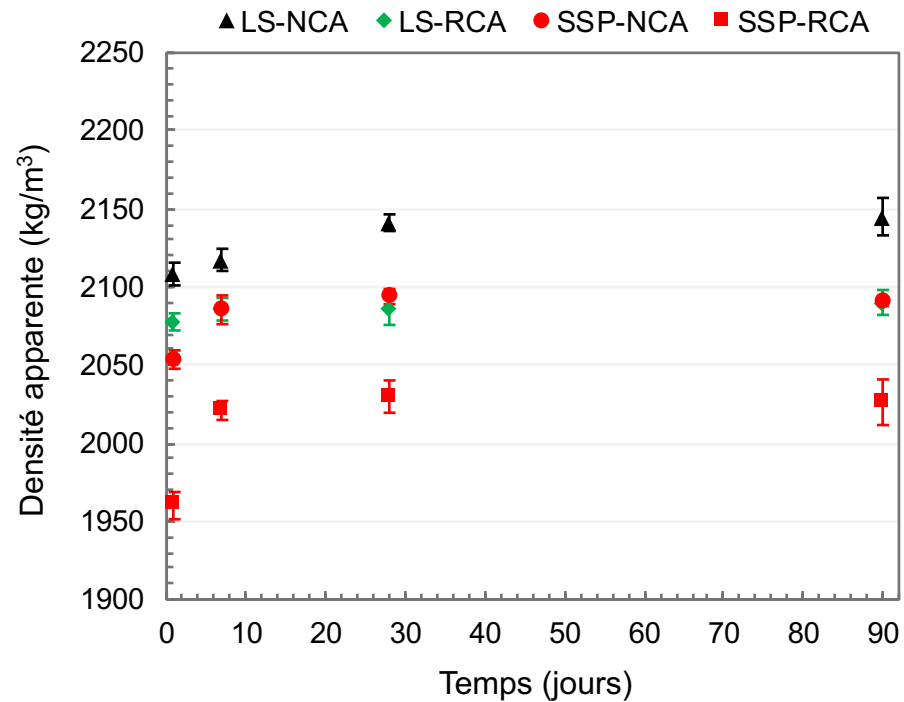


Long terme résistance en compression

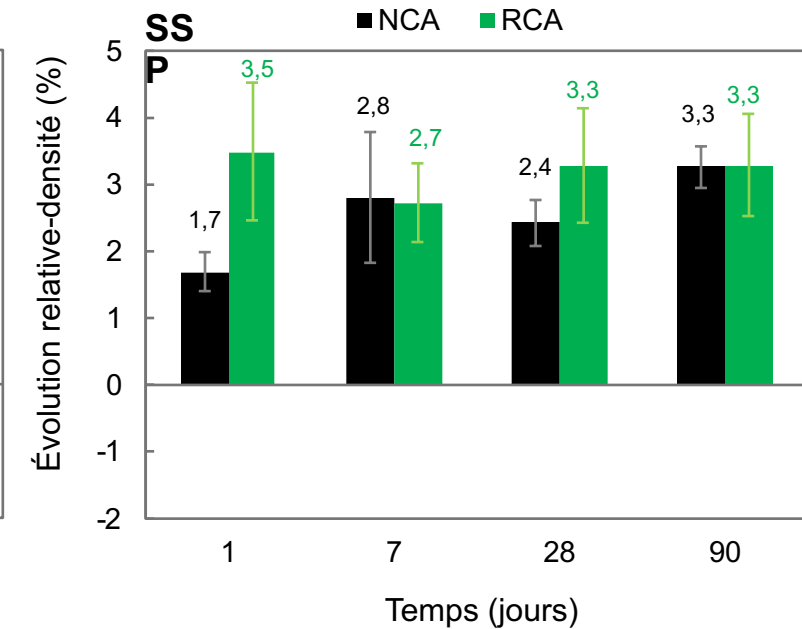
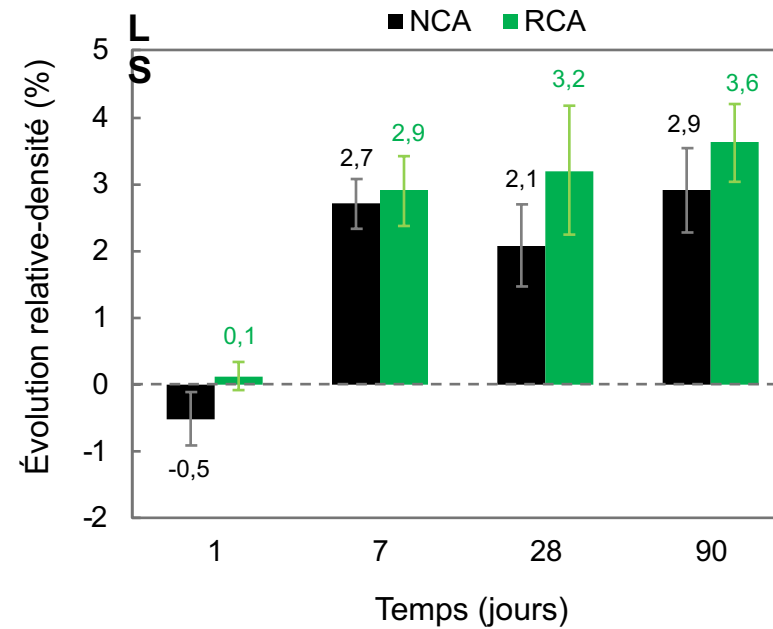
Carbonatation ou durcissement standard ?

Densité apparente

Durcissement standard



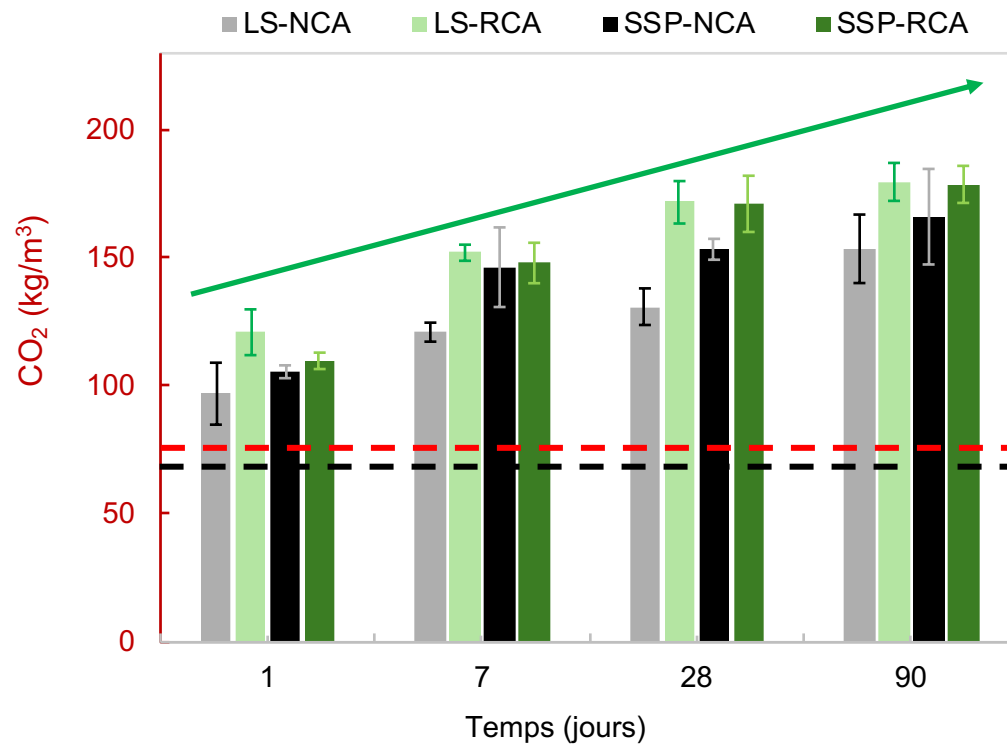
De l'état initial **standard** au durcissement par carbonatation



Le durcissement par carbonatation
améliore la densité apparente

Carbonatation ou durcissement standard

Méthode: Perte de masse



CO₂ séquestré par les précurseurs

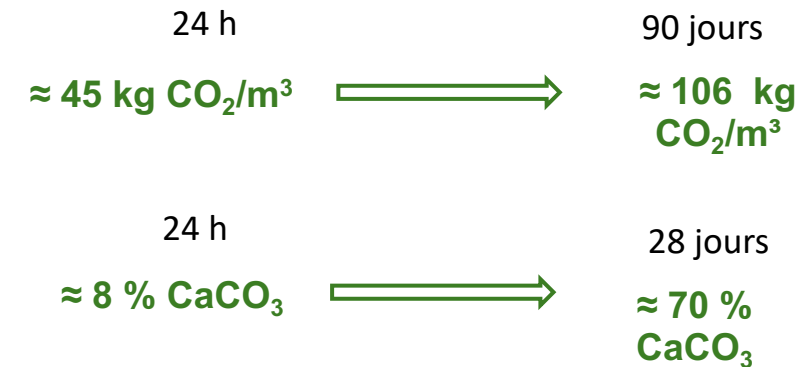
60 kg CO₂/m³

SSP et LS

6 kg CO₂/m³

RCA

CO₂ stocké par le durcissement par carbonatation



Conclusions et perspectives

Conclusions

Réduction de l'empreinte carbone

→ Le durcissement par carbonatation, combiné à l'utilisation de **SSP** et de **RCA**, offre un potentiel de **stockage de CO₂**

Matériaux alternatifs efficaces

→ **SSP** et les **RCA** permettent un stockage de CO₂ plus élevé tout en conservant des **propriétés physico-mécaniques** comparables aux LS et NCA

Amélioration microstructurale

→ La précipitation de la calcite augmente la résistance mécanique, la densité apparente et affine le système poreux

L'efficacité de ces améliorations dépend de **l'équilibre entre hydratation-carbonatation**, de la **composition du mélange** et du **volume carbonaté**

Facteurs contrôlant la carbonatation

Teneur en eau

Diffusion de CO₂

Interaction entre carbonatation et hydratation

Perspectives

Points à approfondir

- La perte de résistance à long terme des BAPs-SSP en cure standard
- Résultats divergents du CO₂ stocké selon les techniques utilisées
 - Absence d'analyse du cycle de vie

Carbonatation et stockage de CO₂

Développer des techniques
analytiques

Modélisation
multi-échelle

Développer un protocole
standardisé de carbonatation

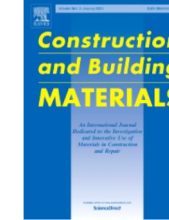
Nouveaux matériaux
biosourcés

Publications et communications

Meriem GUESSOUM, Fouzia KHADRAOUI-MEHIR, Daniel CHATEIGNER. " *Étude expérimentale d'un béton autoplaçant incorporant des déchets recyclés: Rhéologie et performances mécaniques* "

Meriem Guessoum, Bouha El Moustapha, Walid Maherzi, Fouzia Khadraoui, Daniel Chateigner, Stéphanie Gascoin, Walid Maherzi. " *Effect of scallop shell powder addition on fresh and hardened properties of self-compacting concrete (SCC) based on recycled aggregates* "

Meriem Guessoum, Bouha El Moustapha, Walid Maherzi, Fouzia Khadraoui, Daniel Chateigner. " *Carbon storage potential of self-compacting concretes: Quantitative evaluation under controlled carbonation curing.* " (En cours)



RUGC2024
Le Havre-Normandie

Remerciements

▪ Joel Breard



▪ Ferhat Benmahiddine



▪ Fouad BOUKHELF



▪ Maxwell Terban



▪ Stephanie Gascoin



▪ Walid Maherzi



- Unité de recherche
- Mohammed Zelloufi
- Marion Verlomme