

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

02. Problématique et Objectifs

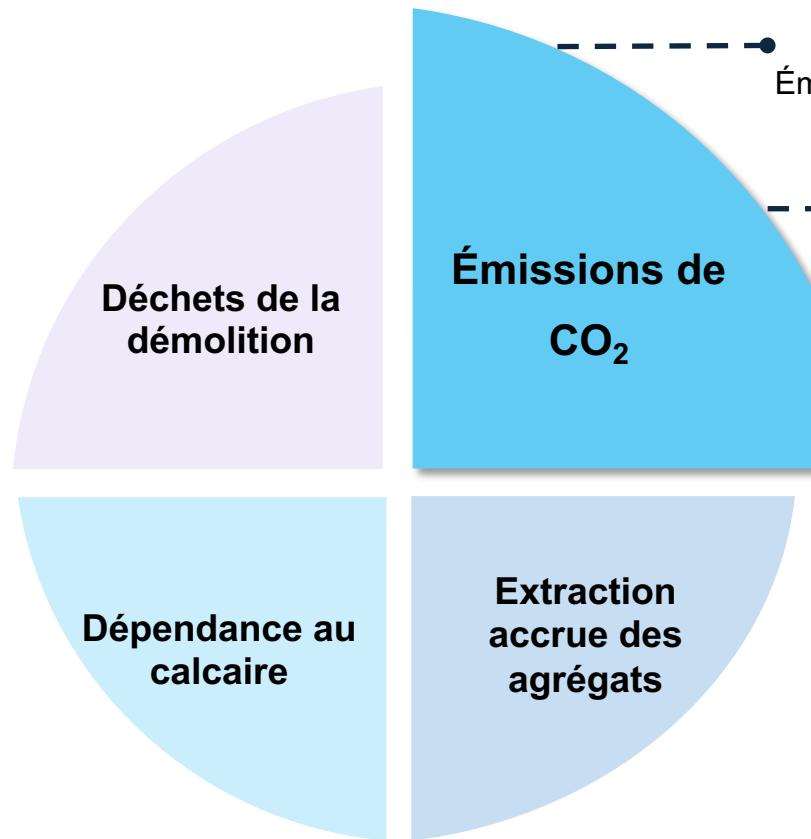
03. Méthodologie

04. Analyse des résultats

05. Conclusions et perspectives

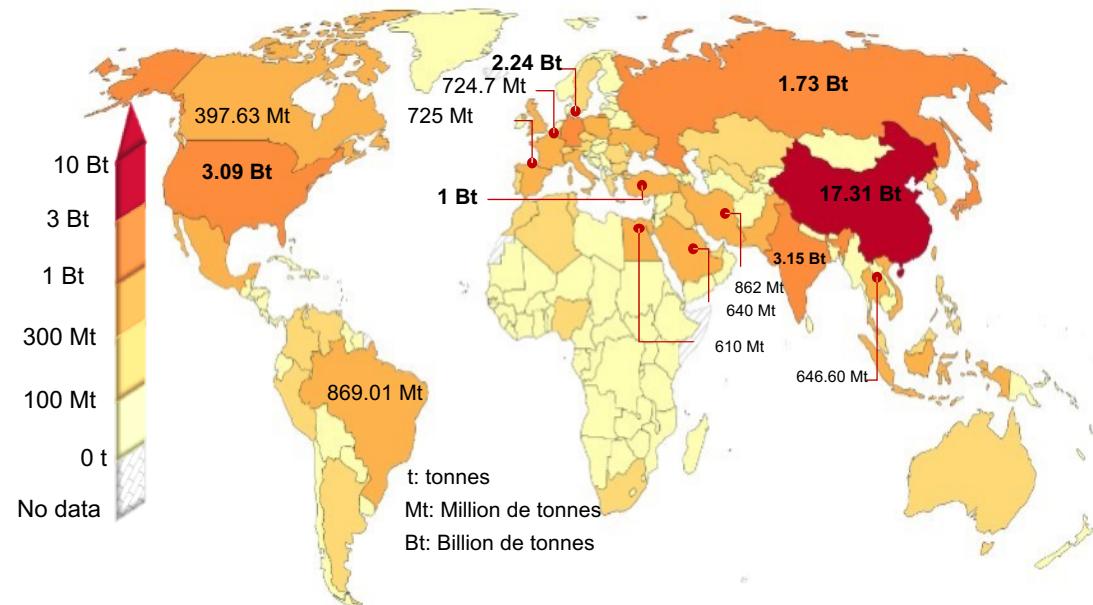
Introduction

Les quatre enjeux environnementaux majeurs du secteur du bâtiment

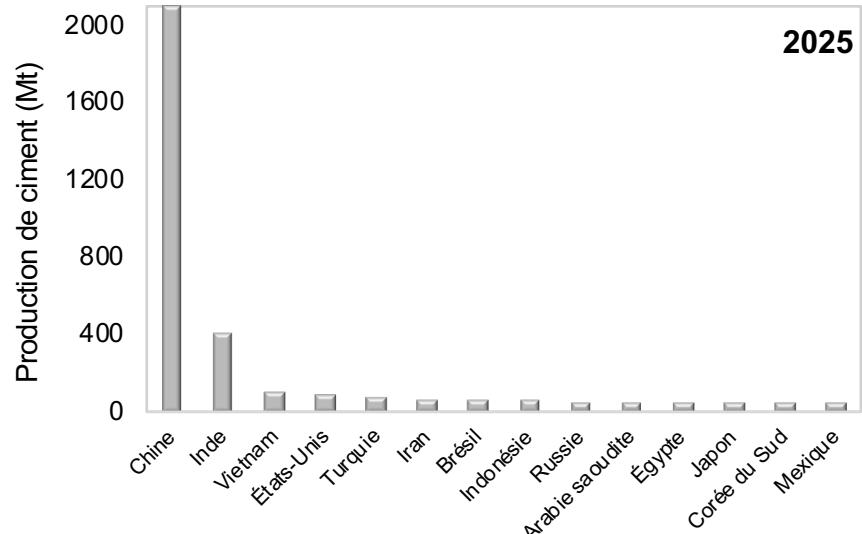
Cumulative CO₂ emissions from cement, 2024

Cement Production by Country 2025

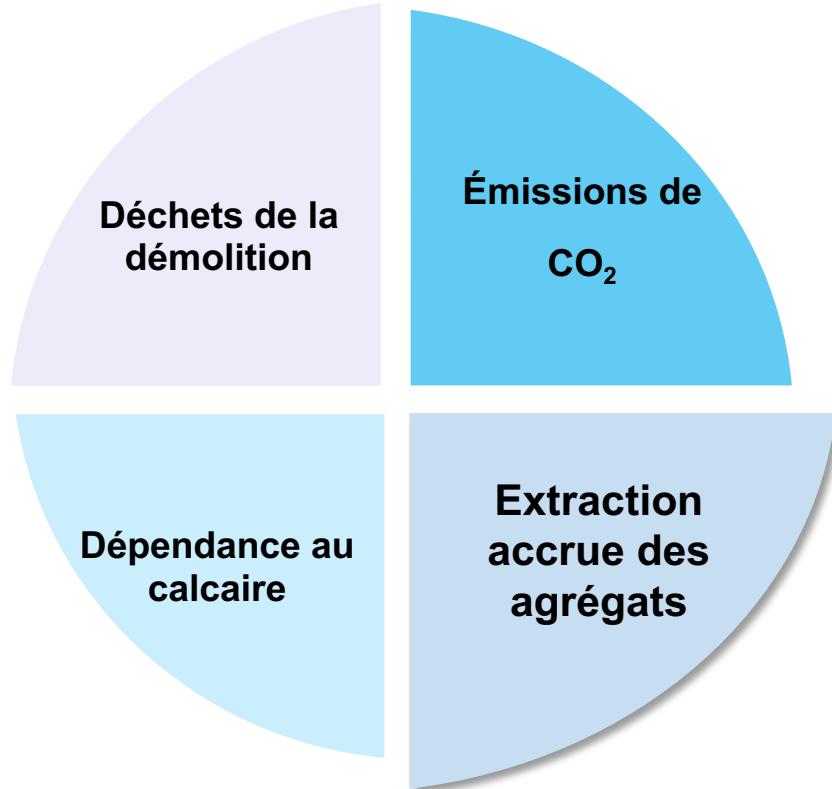
2024, Cumulative CO₂ from cement production



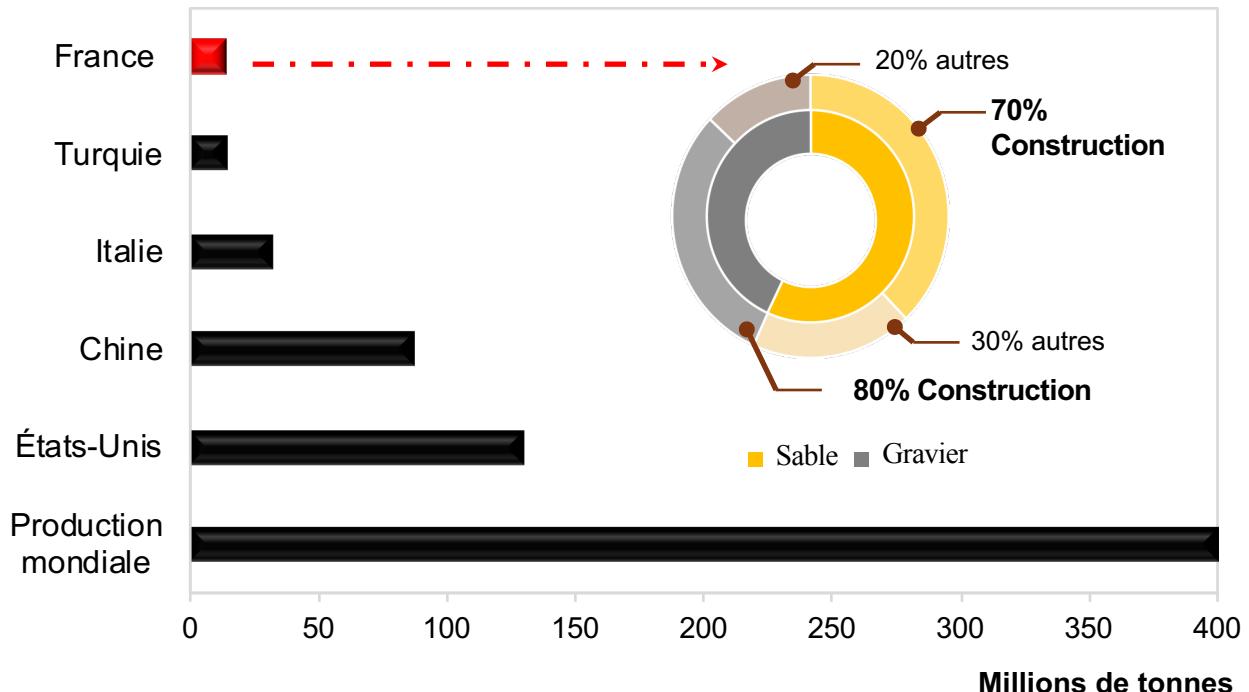
Principaux pays producteurs de ciment dans le monde



Les quatre enjeux environnementaux majeurs du secteur du bâtiment

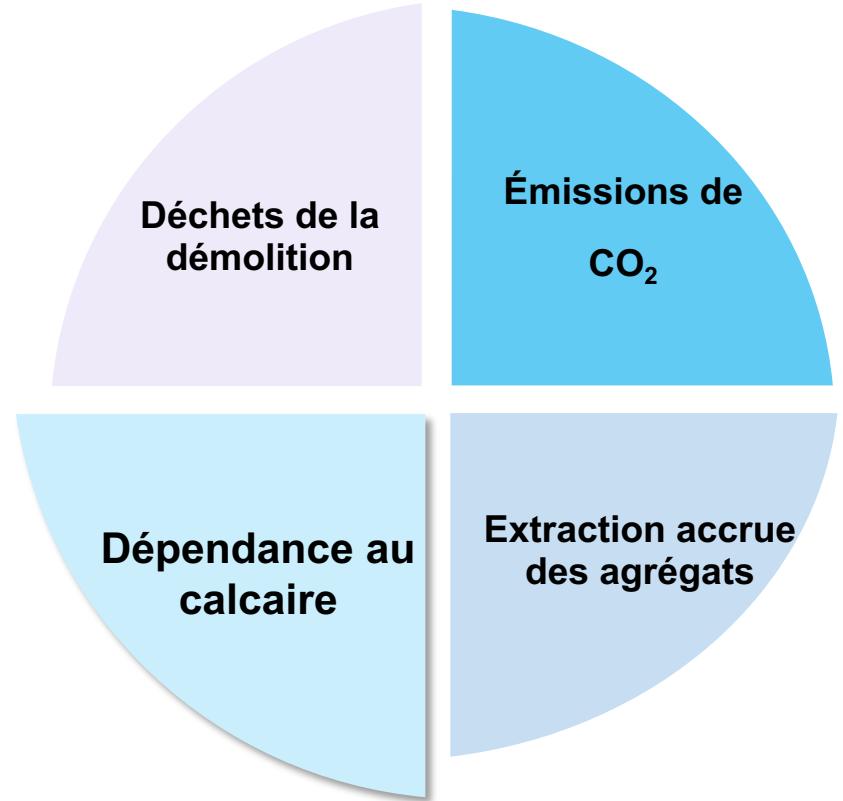


Production mondiale de sable et de gravier industriels (2023)

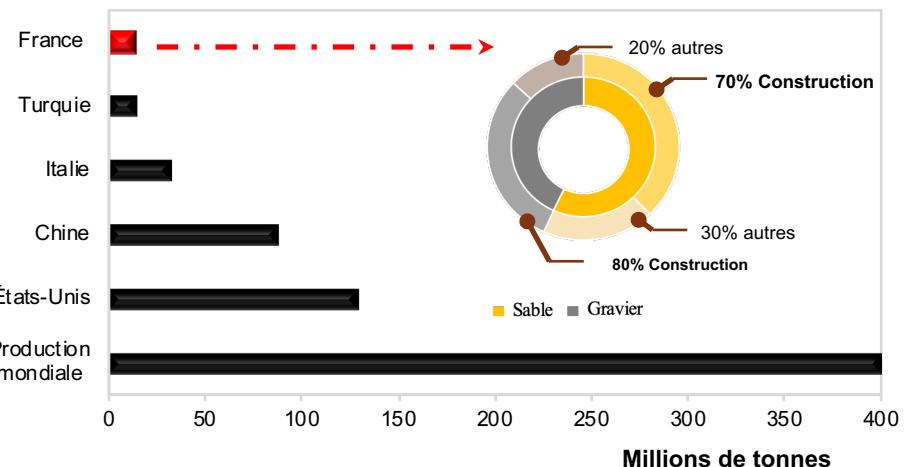


[Sand and gravel production global by country 2024 | Statista](#)

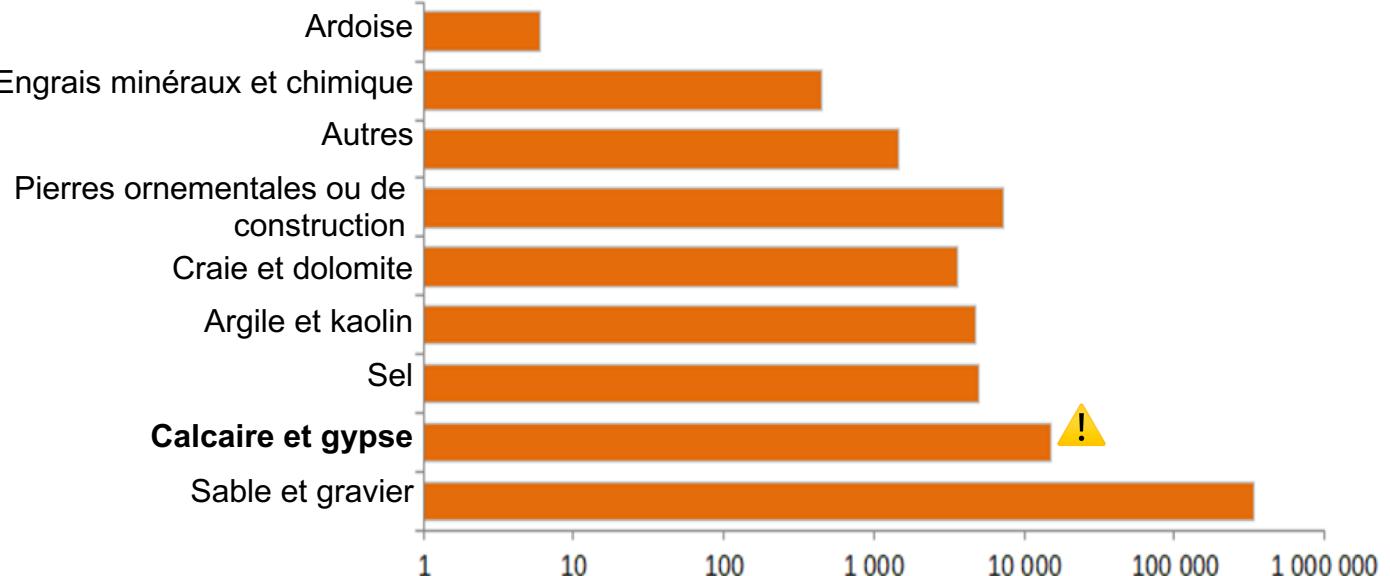
Les quatre enjeux environnementaux majeurs du secteur du bâtiment



Production mondiale de sable et de gravier industriels (2023)



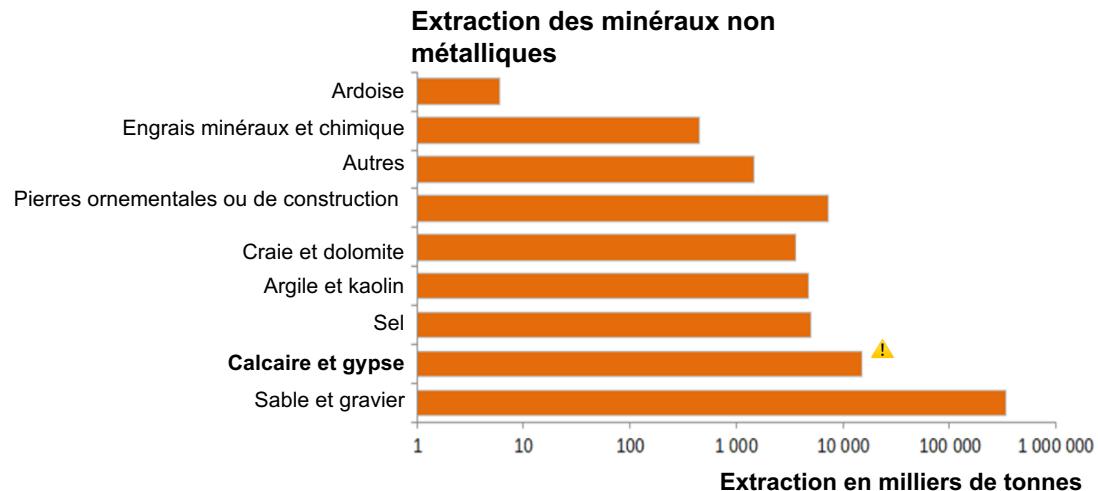
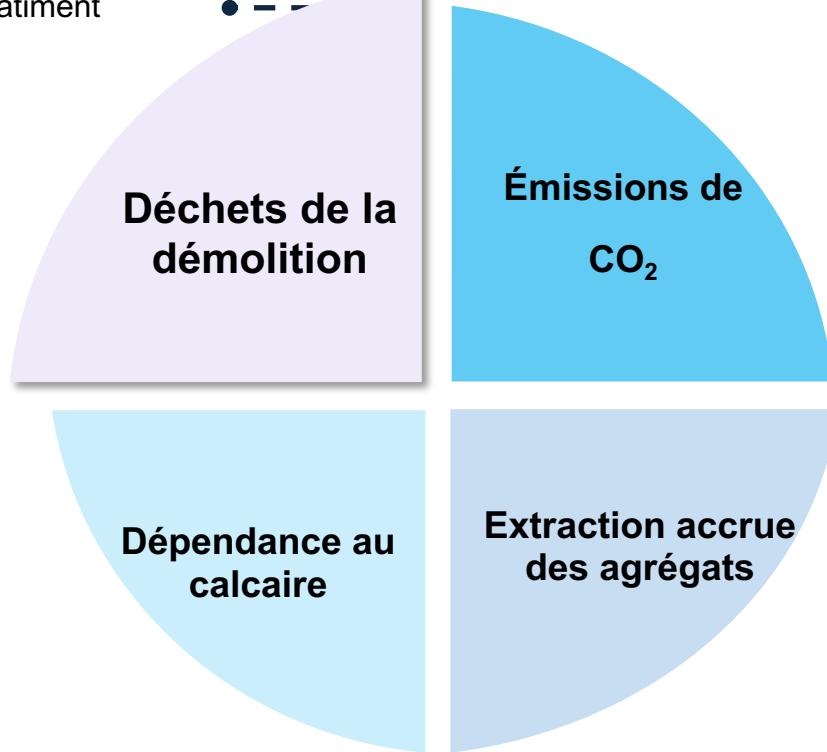
Extraction des minéraux non métalliques



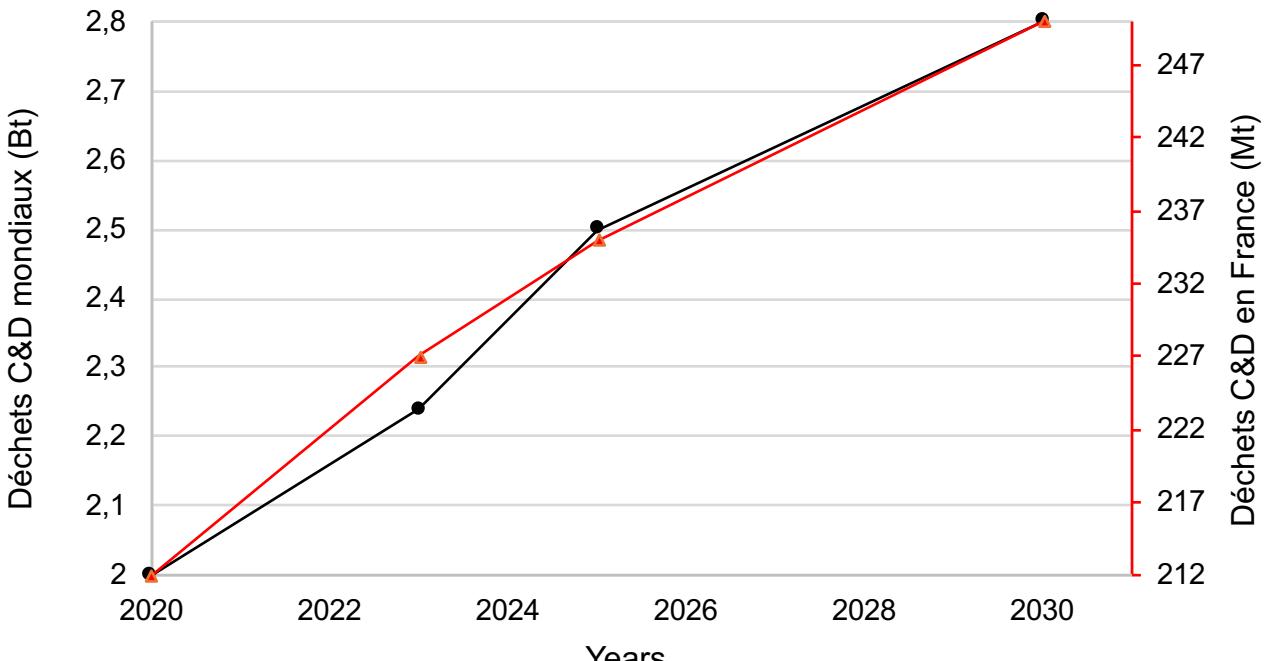
Les quatre enjeux environnementaux majeurs du secteur du bâtiment



49 % des déchets du bâtiment



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

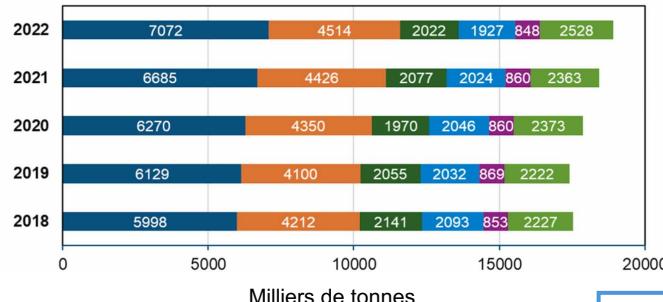
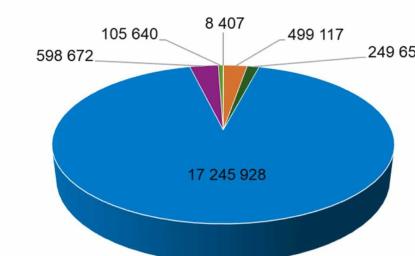


Pacte vert pour l'Europe

Objectif: Atteindre la neutralité climatique d'ici 2050

Valorisation des déchets coquillers

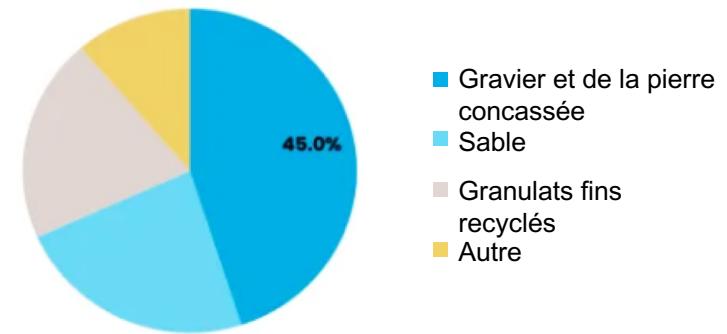
Production mondiale de mollusques



(Zelloufi et al., 2025)

Valorisation des granulats de béton recyclé

Marché des granulats de béton recyclé

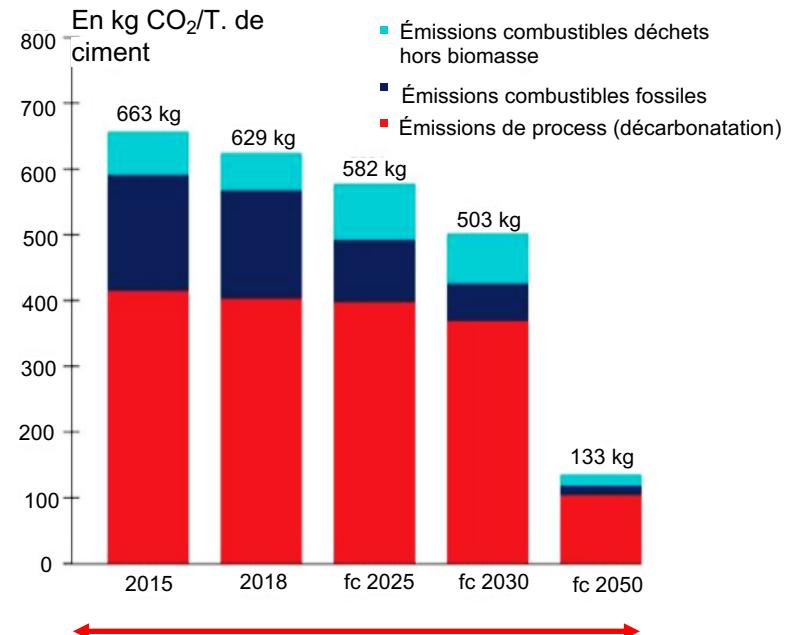


Le segment du gravier et de la pierre concassée domine le marché

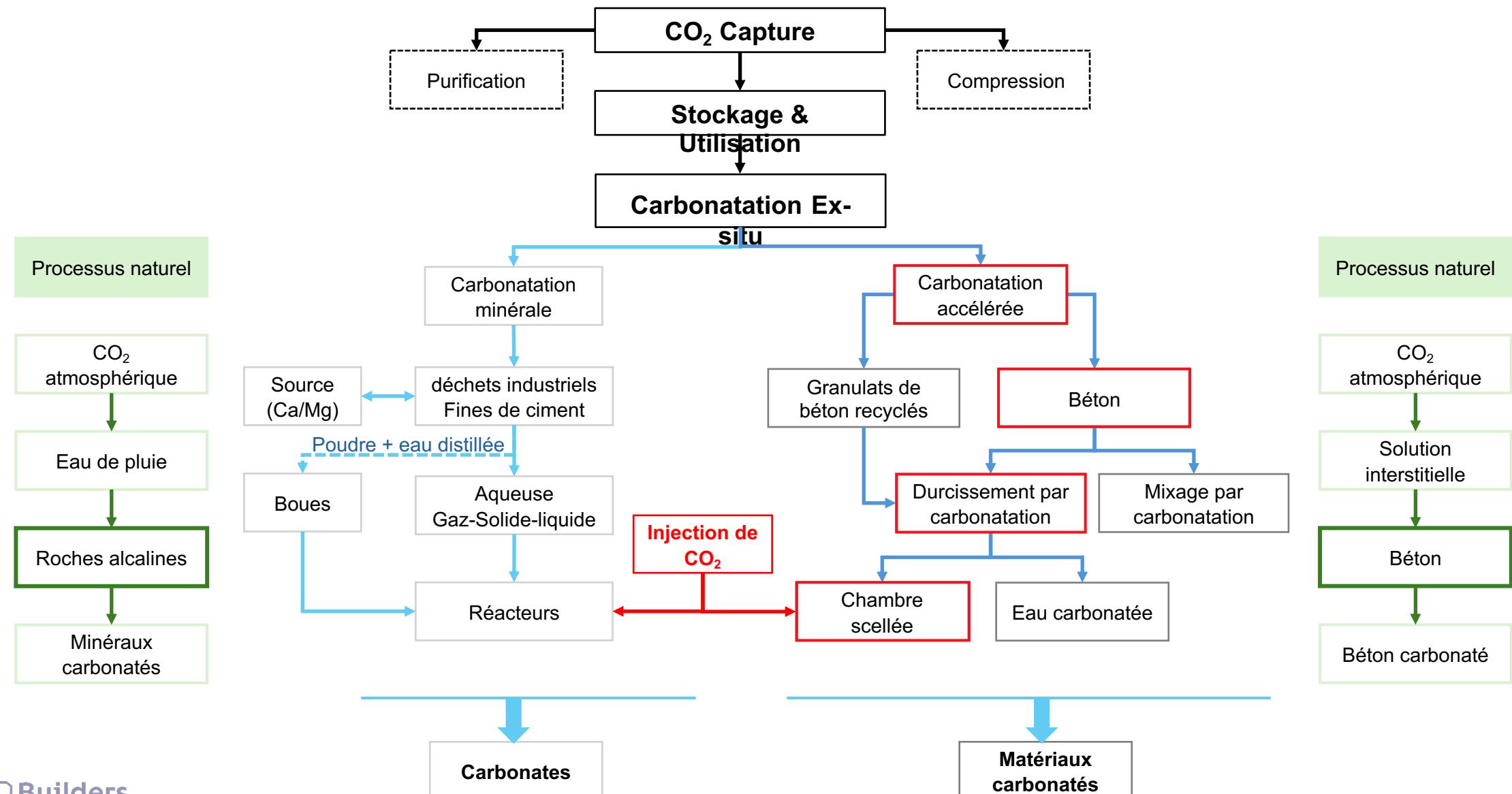
- Matériaux à faible empreinte carbone
- Similarités avec le gravier naturel et le calcaire

Carbone Capture et Stockage/Utilisation CCSU

Évolution des émissions de CO₂ du secteur cimentier

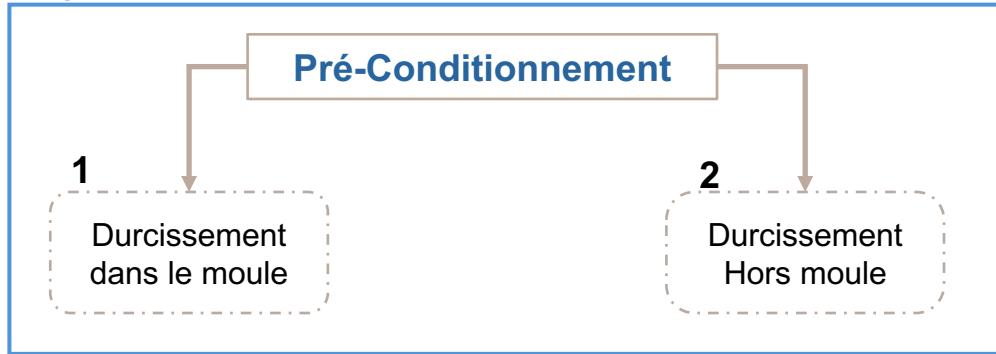


Carbone Capture et Stockage/Utilisation CCSU



Durcissement par carbonatation

Etape 1



Pratiques rapportées dans la littérature

Durcissement dans le moule

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

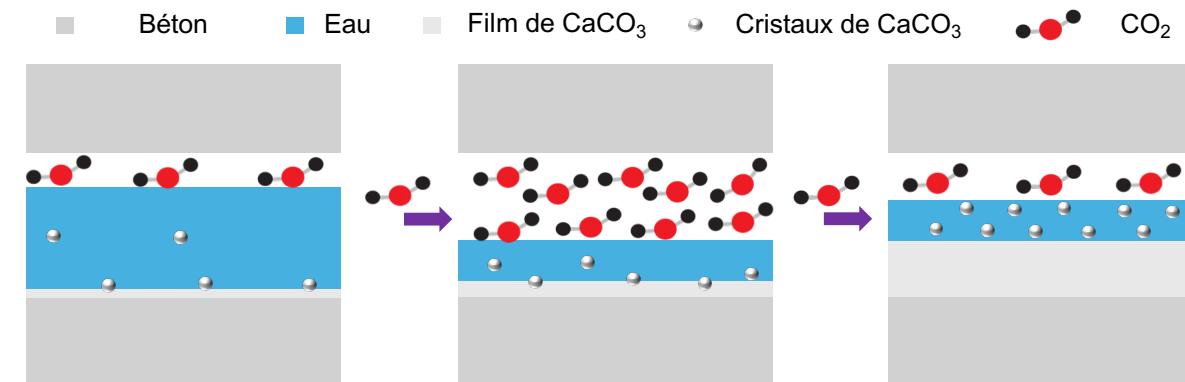
Démoulage immédiat après le moulage
(produits à mélange sec)

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

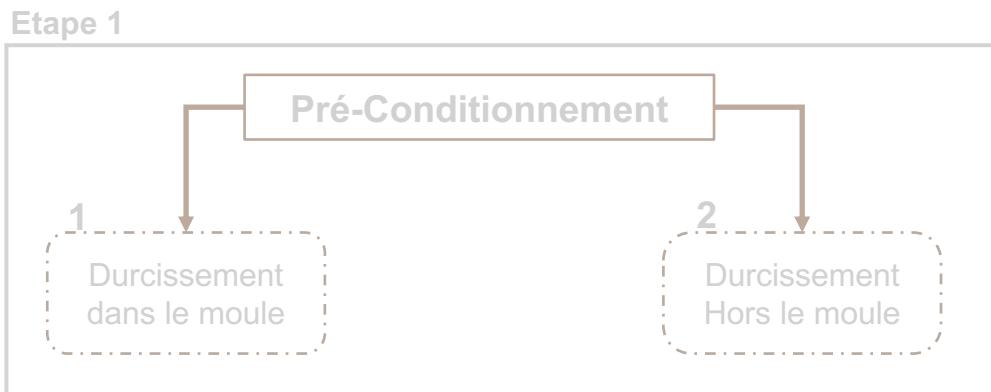
État gazeux



- 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

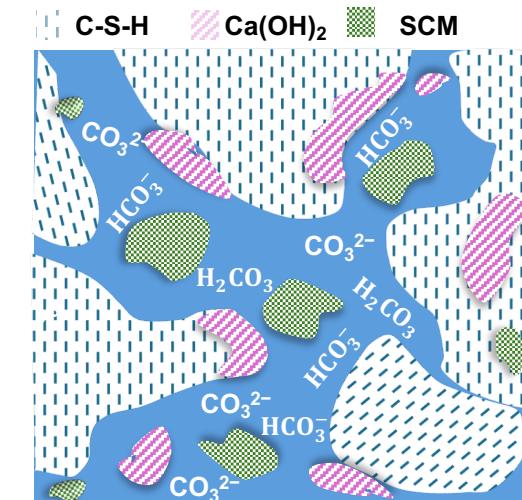


Paramètres recommandés

- 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)

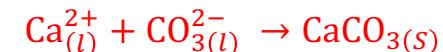
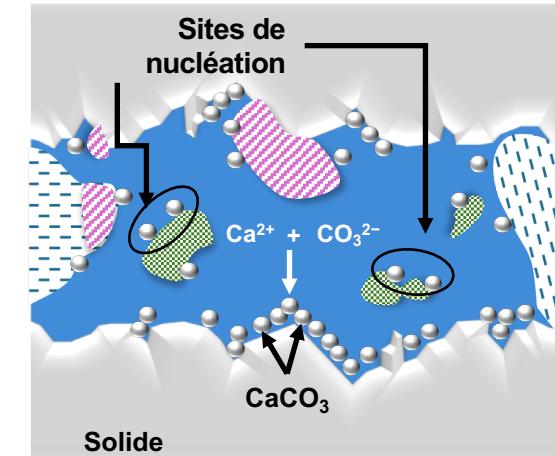
Hydratation / dissolution du CO₂

État aqueux

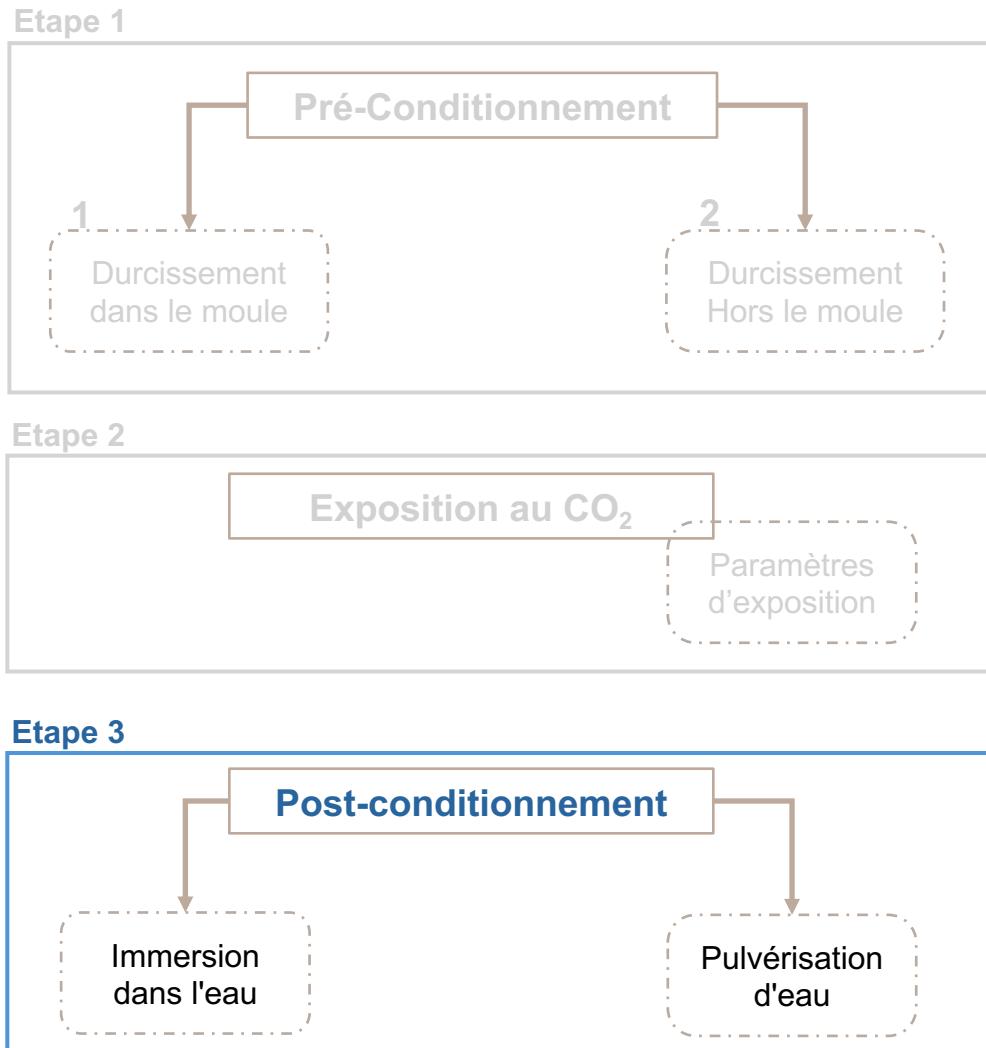


Dissolution-hydrates / précipitation-CaCO₃

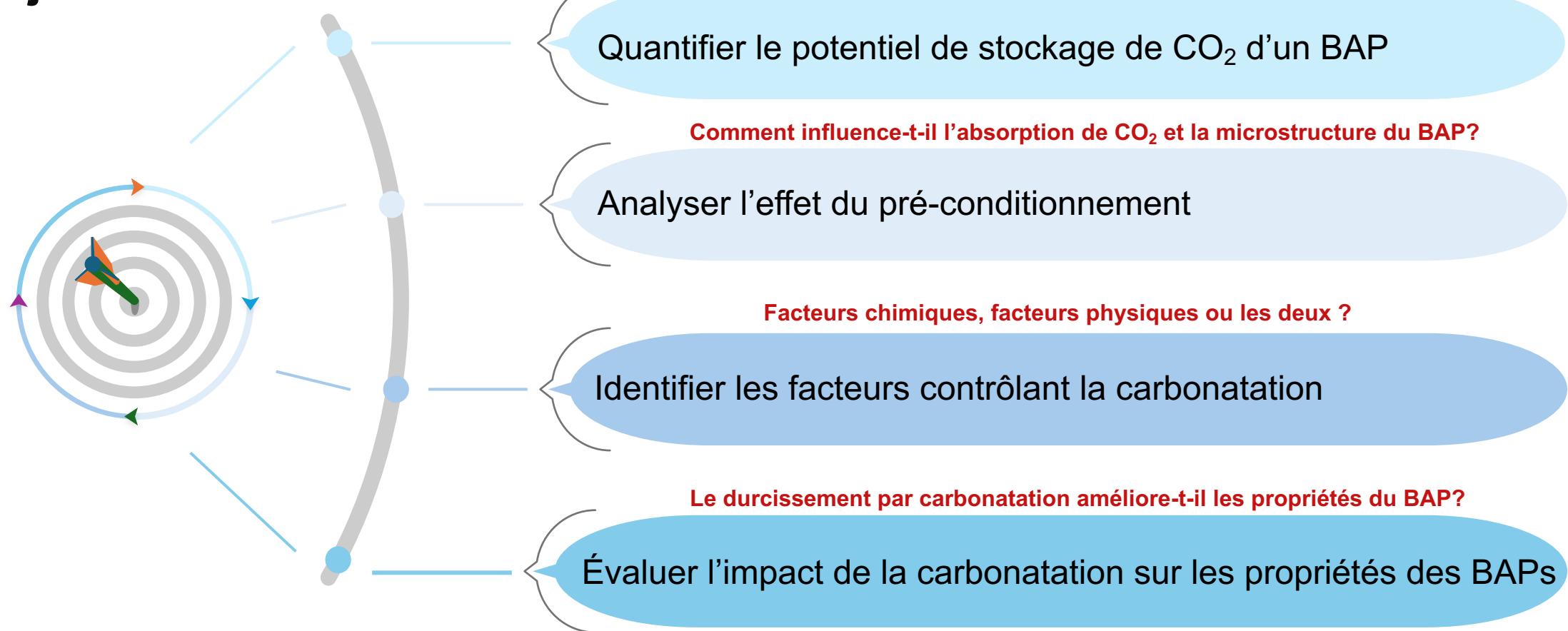
État solide



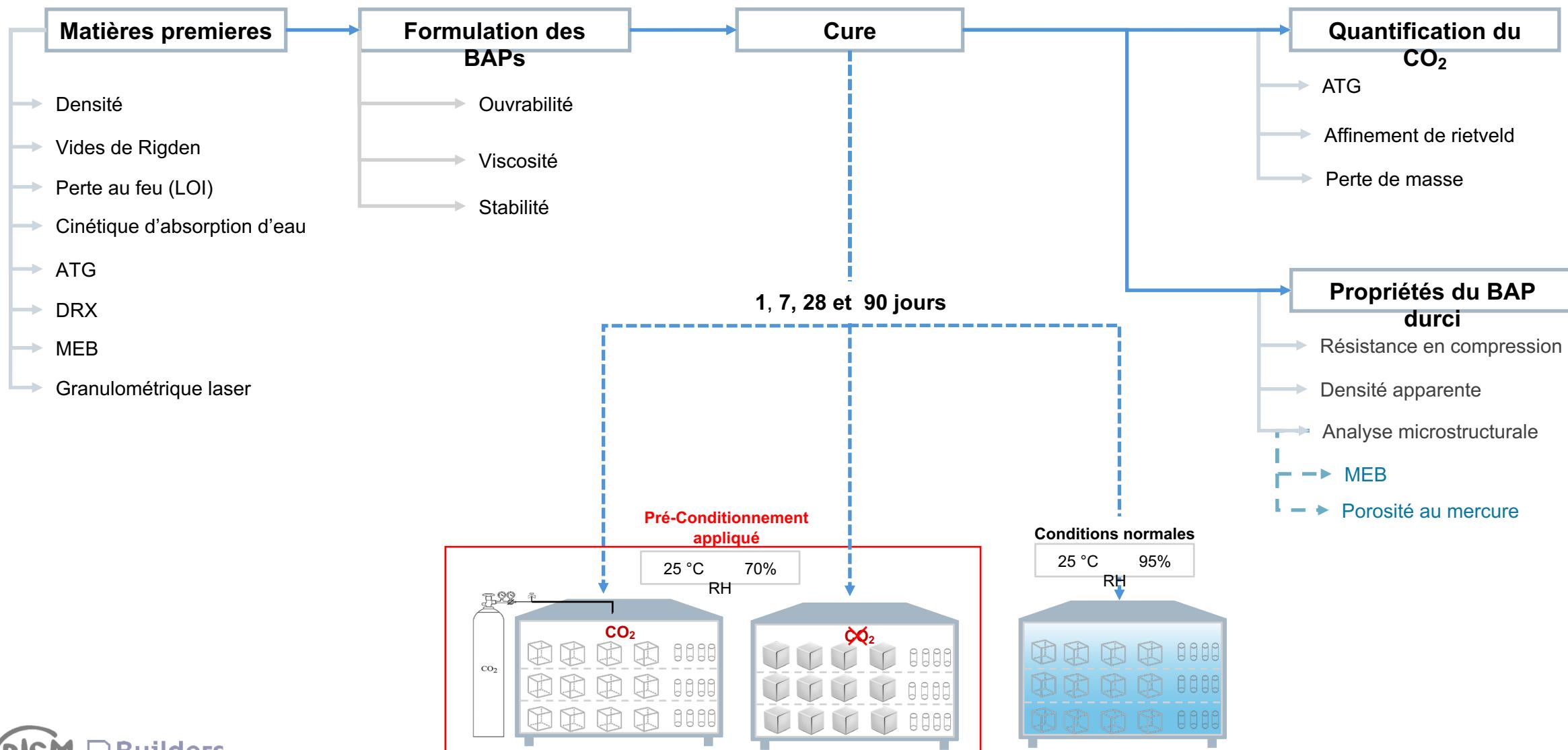
Durcissement par carbonatation



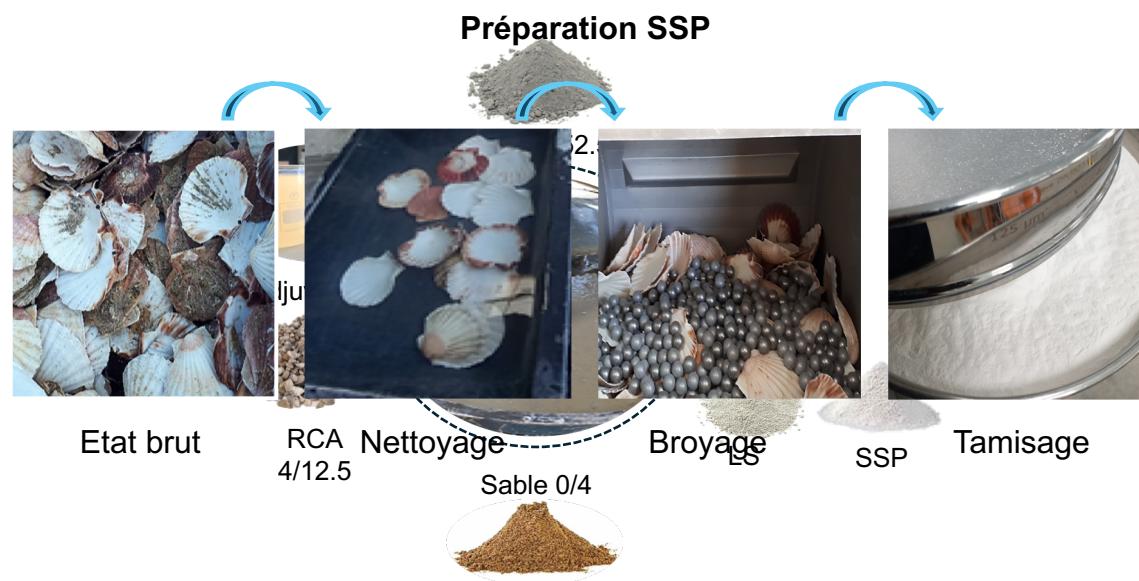
Problématiques et objectifs



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
Eau _{tot}			219.6	
Superplastifiant			4.58	
Accélérateur de prise			3.66	

NCA → RCA

LS → SSP

(30% en masse du ciment)

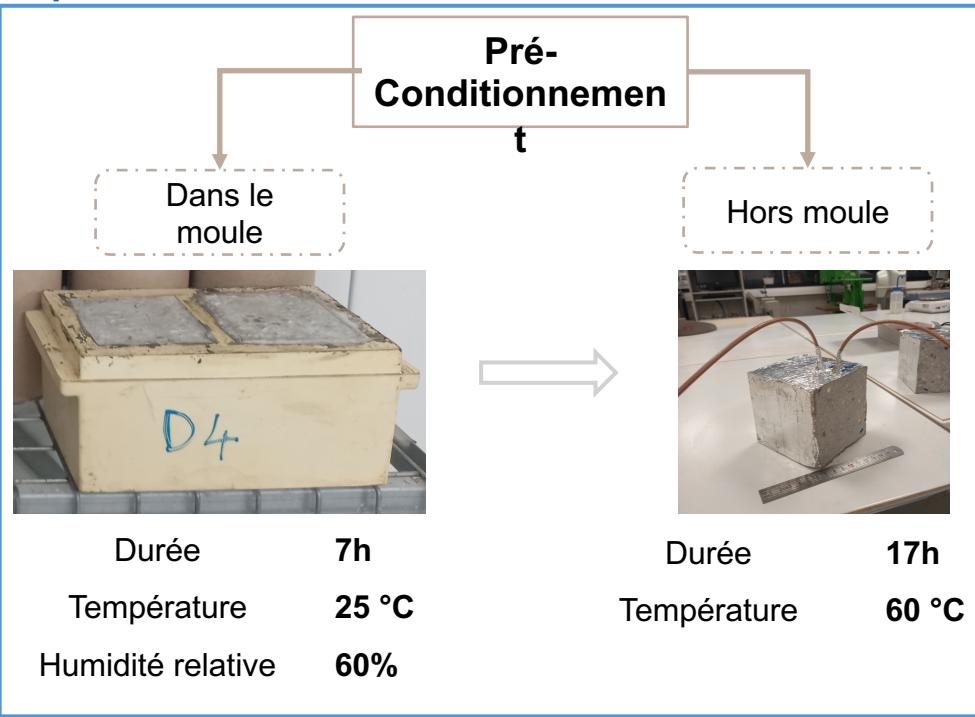
SSP: Poudre de coquille Saint-Jacques
LS: Poudre de calcaire

RCA: Gravier recyclé

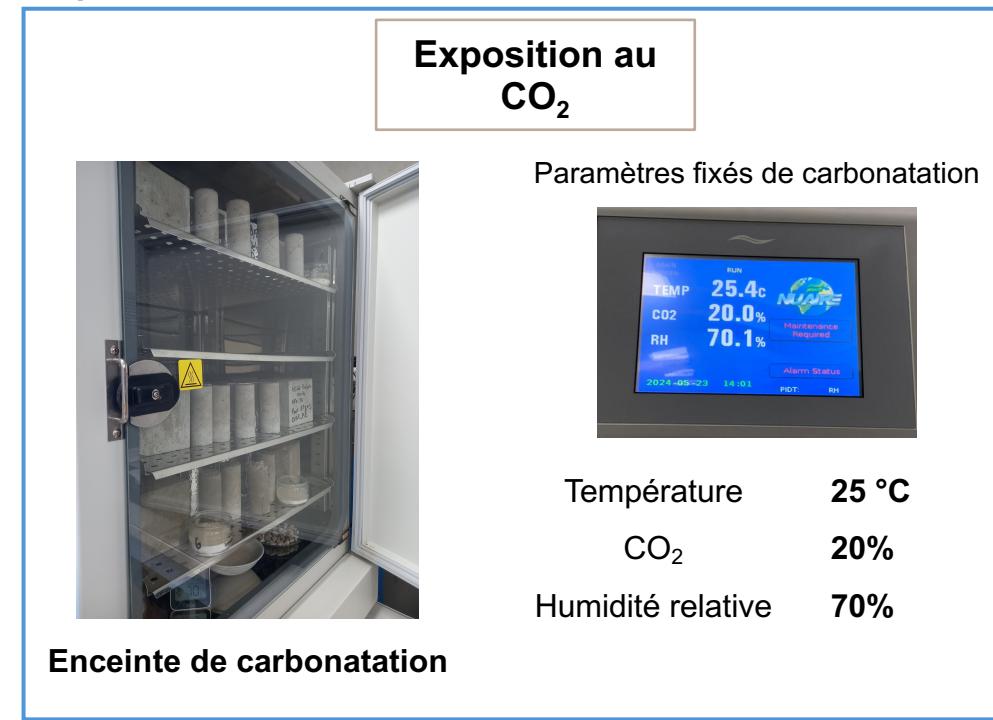
NCA: Gravier naturel

Adaptation du protocole de stockage du carbone

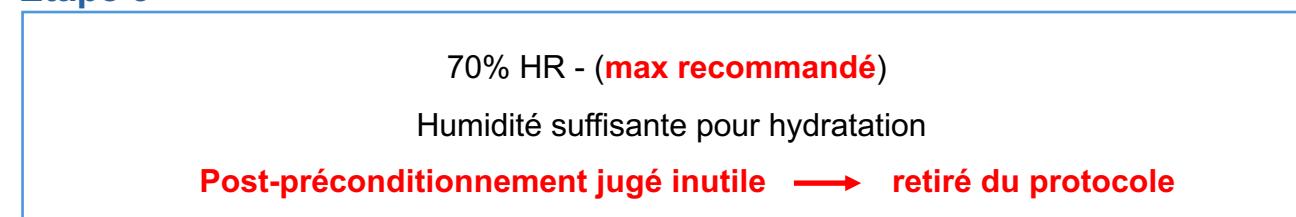
Etape 1



Etape 2



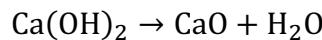
Etape 3



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

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

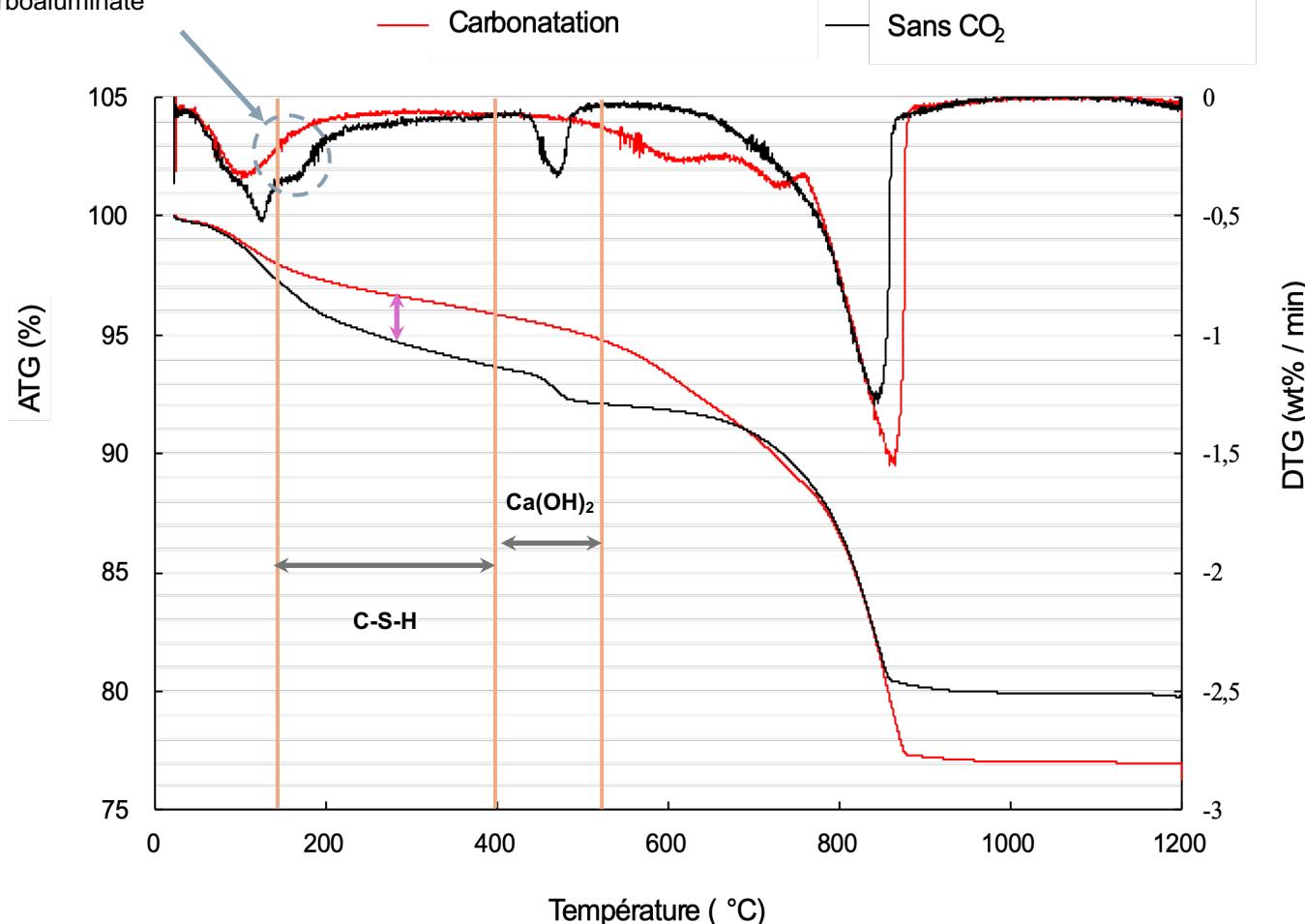
$$m_{\text{CaCO}_3\text{Ca(OH)}_2} = n_{\text{Ca(OH)}_2}$$

3.

CO₂ stocké

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

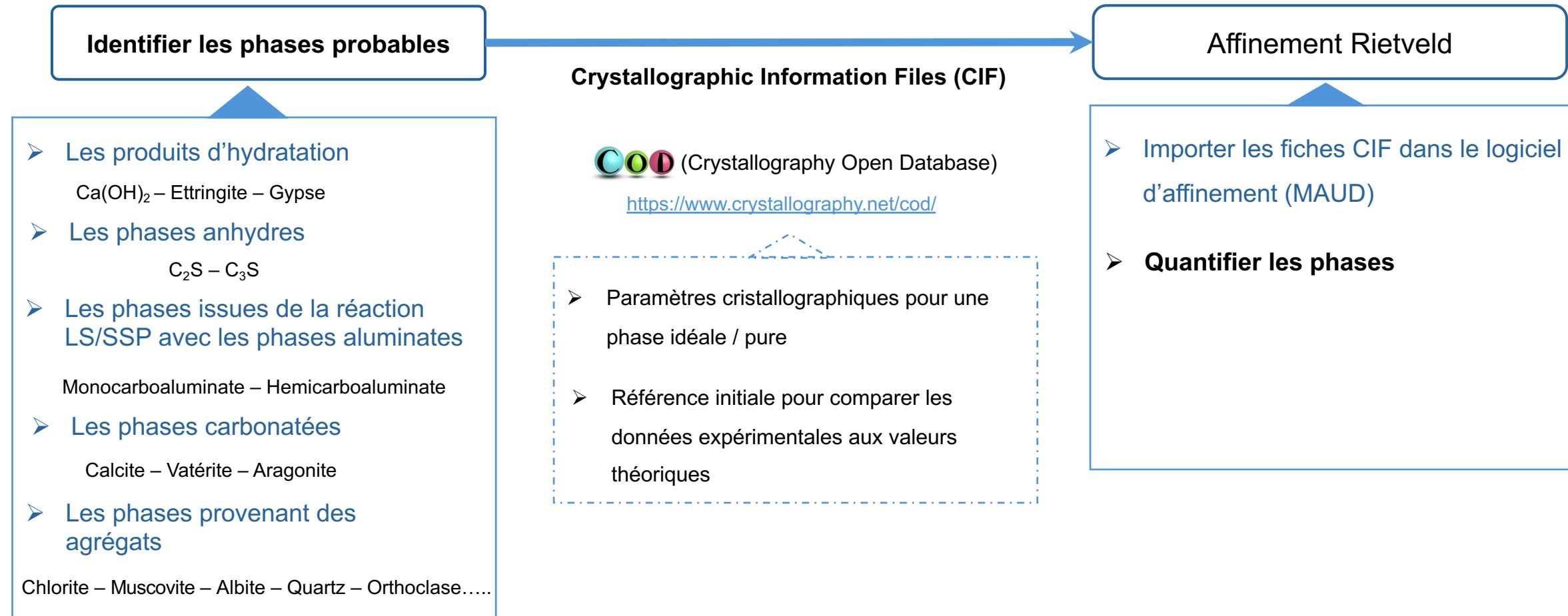
Gypse, ettringite, et carboaluminat



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

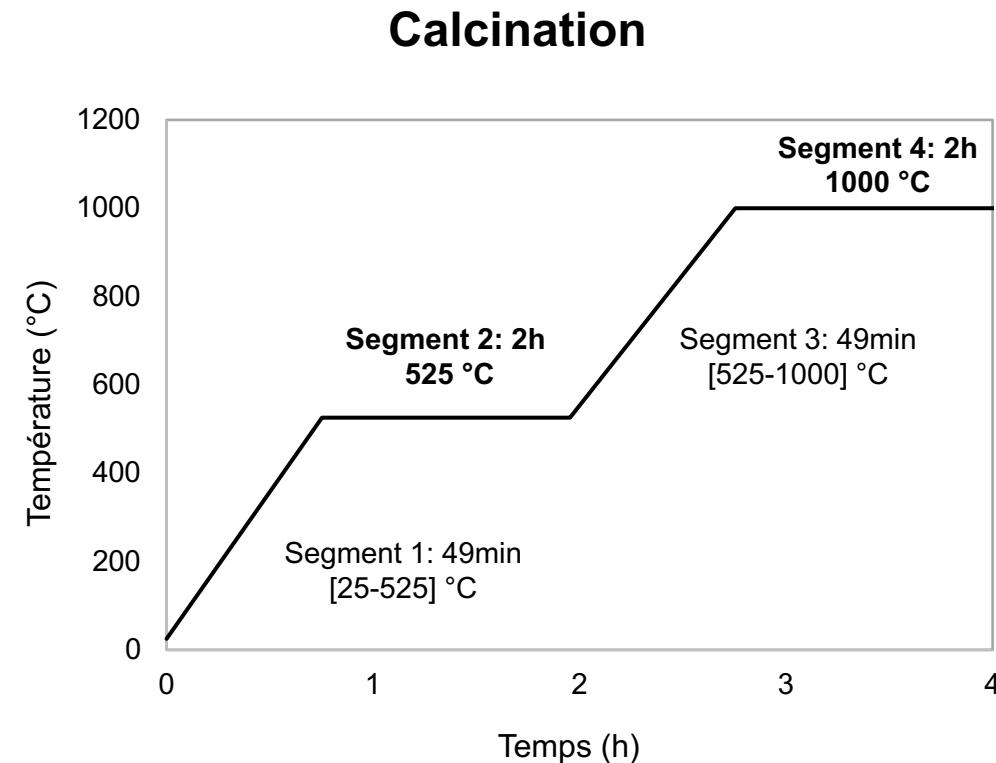


Quantification du CO₂ stocké: Perte de masse

Séchage initial

Température: 105°C
Durée: 24h

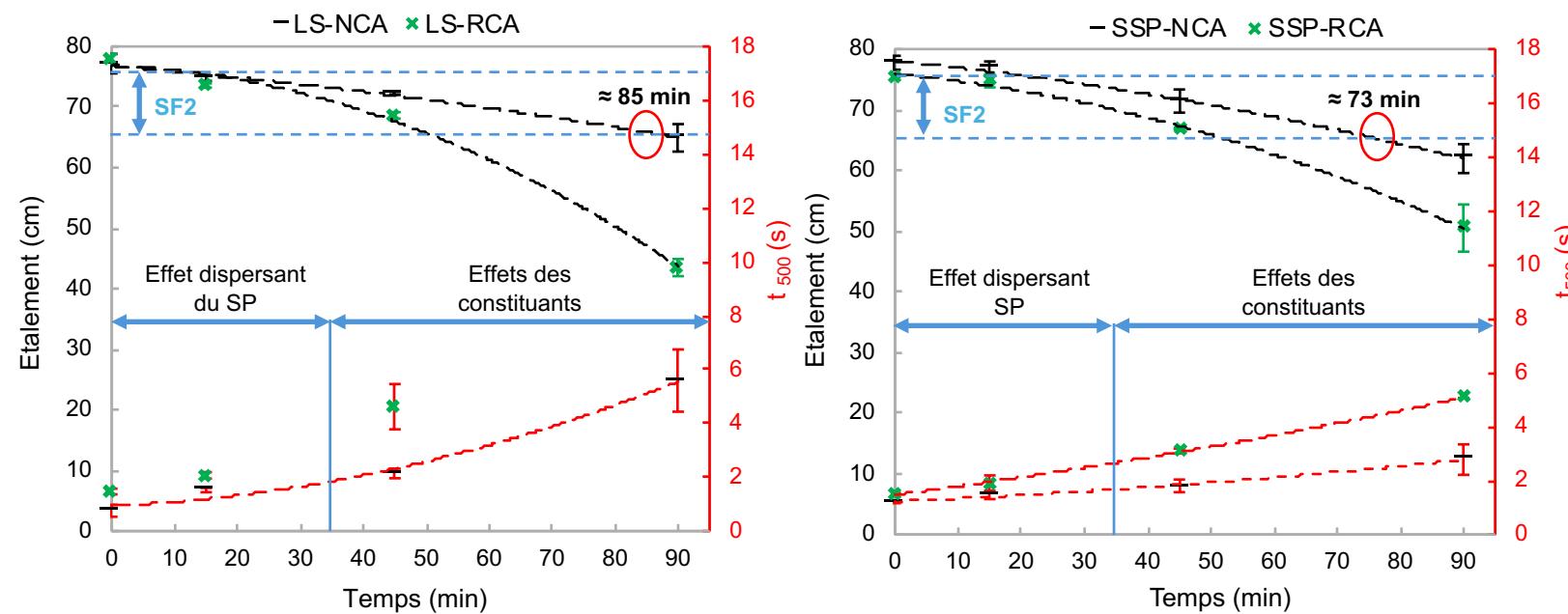
CO₂ stocké



Rhéologie des BAPs

1- Rhéologie

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



▪ Effet du précurseur-
Liant

➤ Ouvrabilité

LS-NCA → maintien prolongé SF2

➤ Viscosité

SSP-NCA → Viscosité initiale élevée

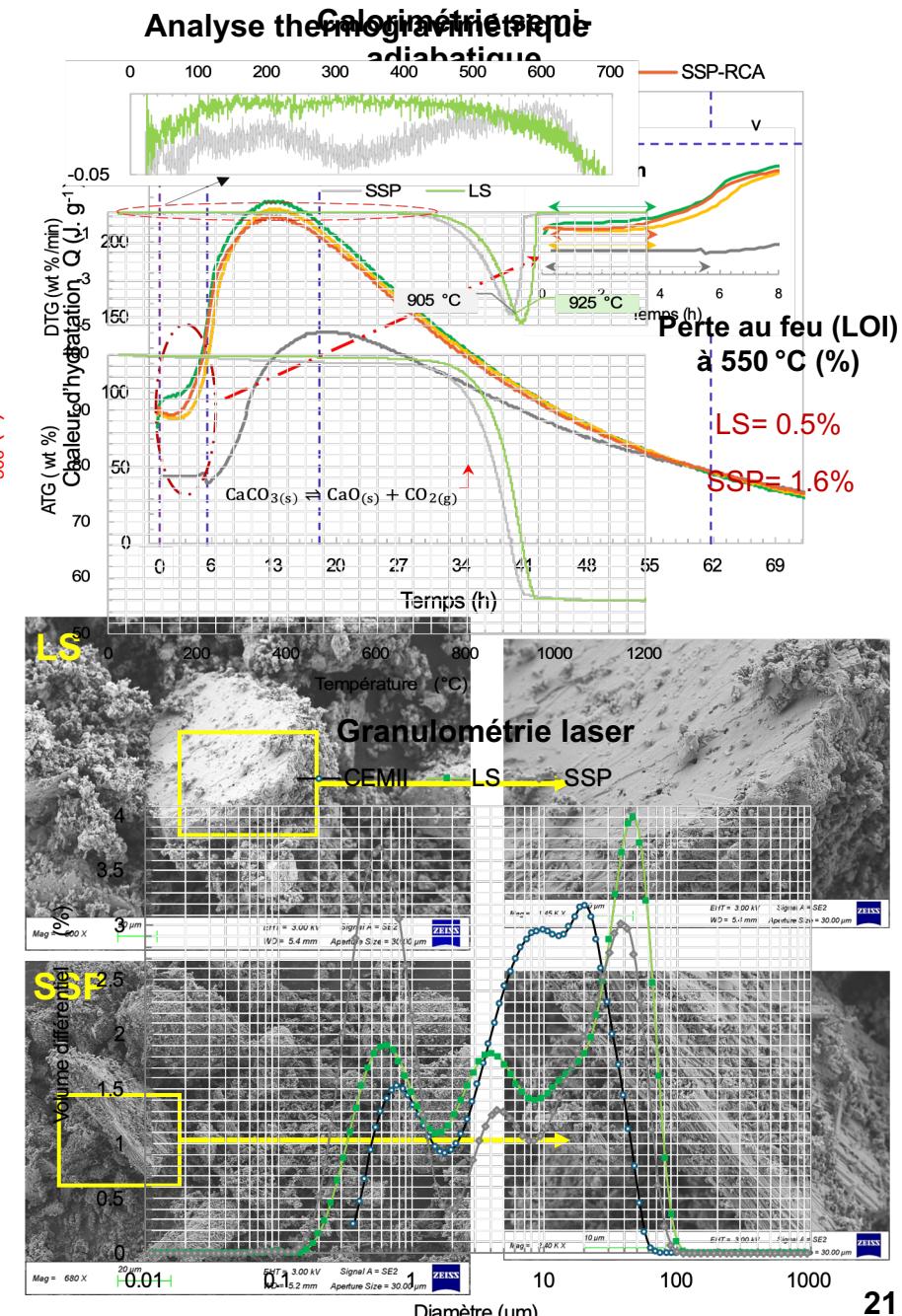
▪ Facteurs clés

Caractéristiques du SSP

Porosité

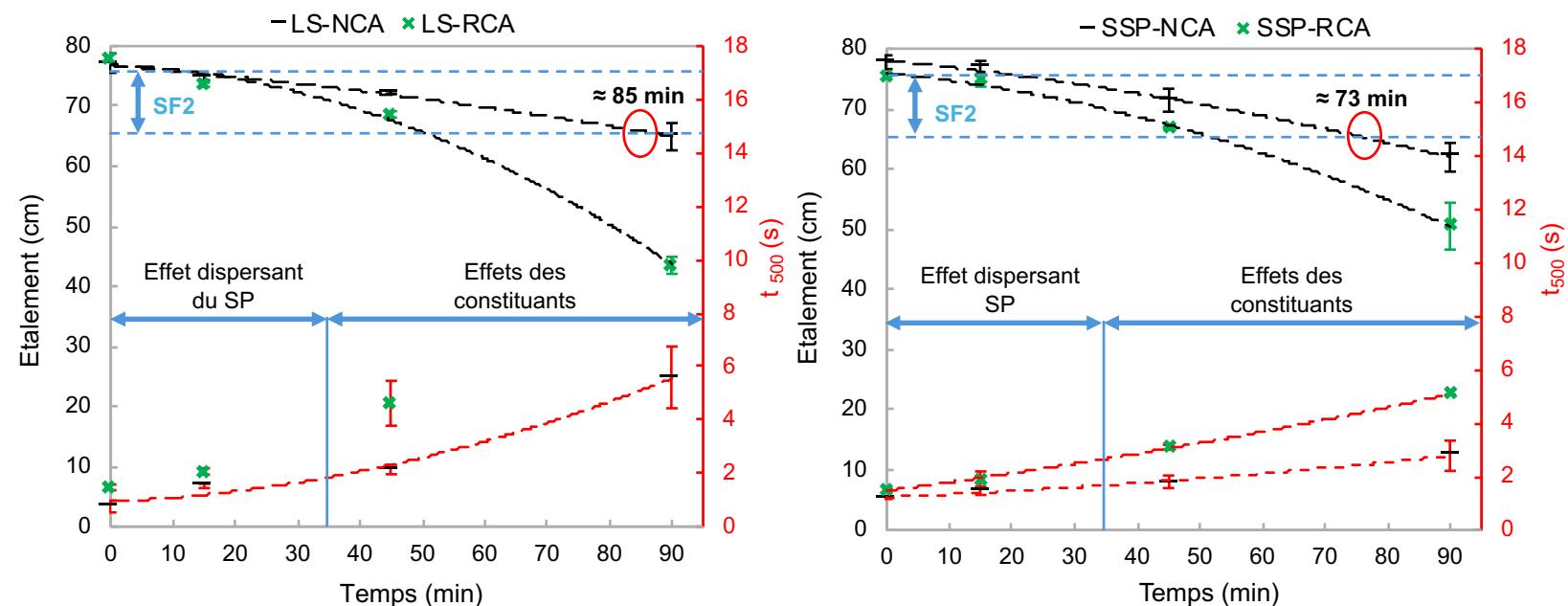
Matière organique

Particules ultra fines



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**

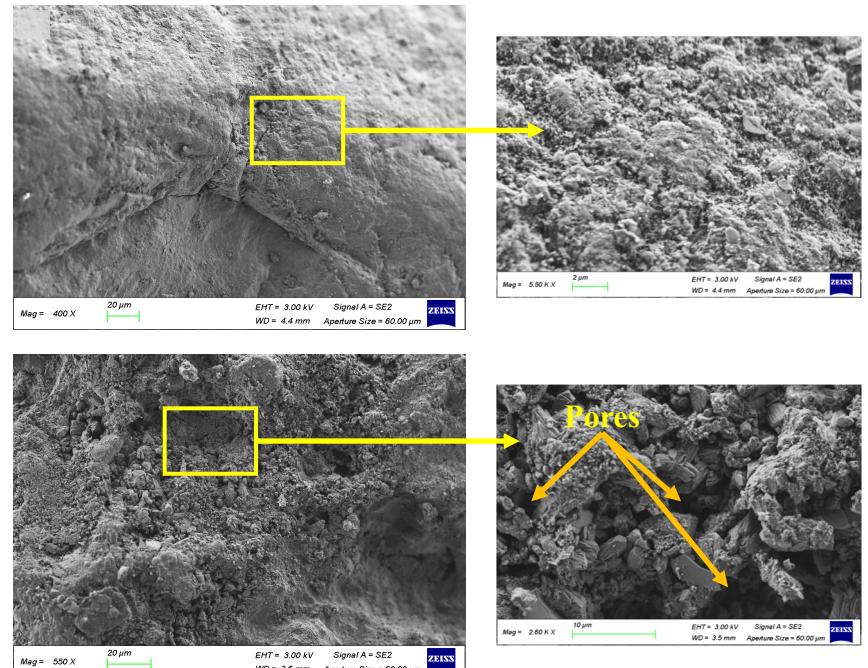
VS1 ~45 min → VS2

- **Facteurs clés**

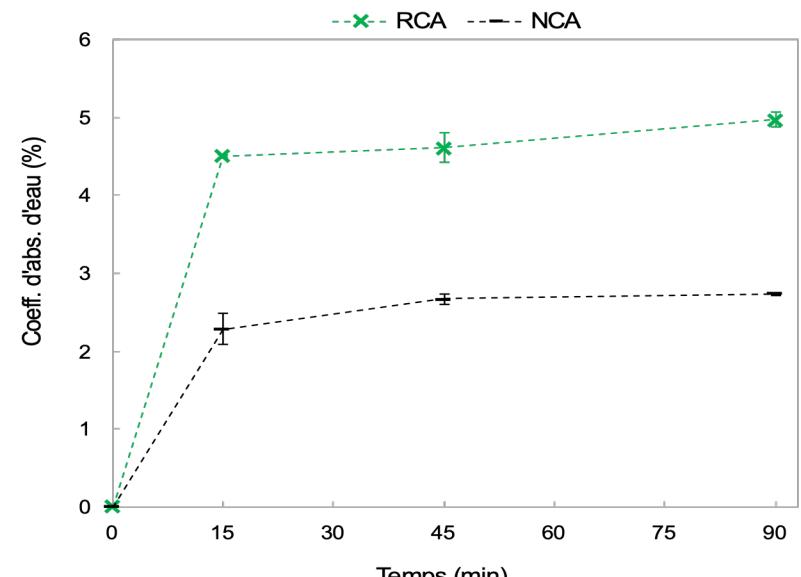
Caractéristiques RCA

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

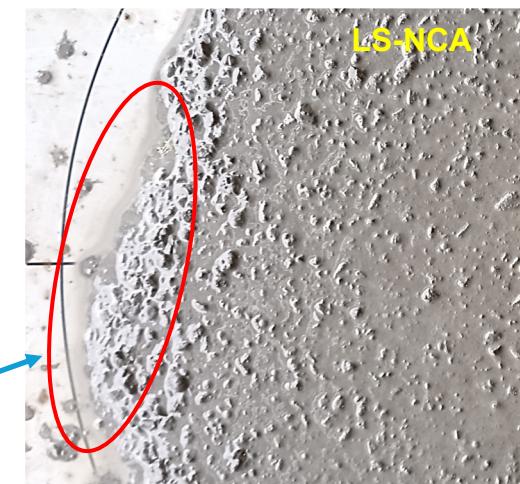
LS-NCA et LS-RCA

Halo de mortier

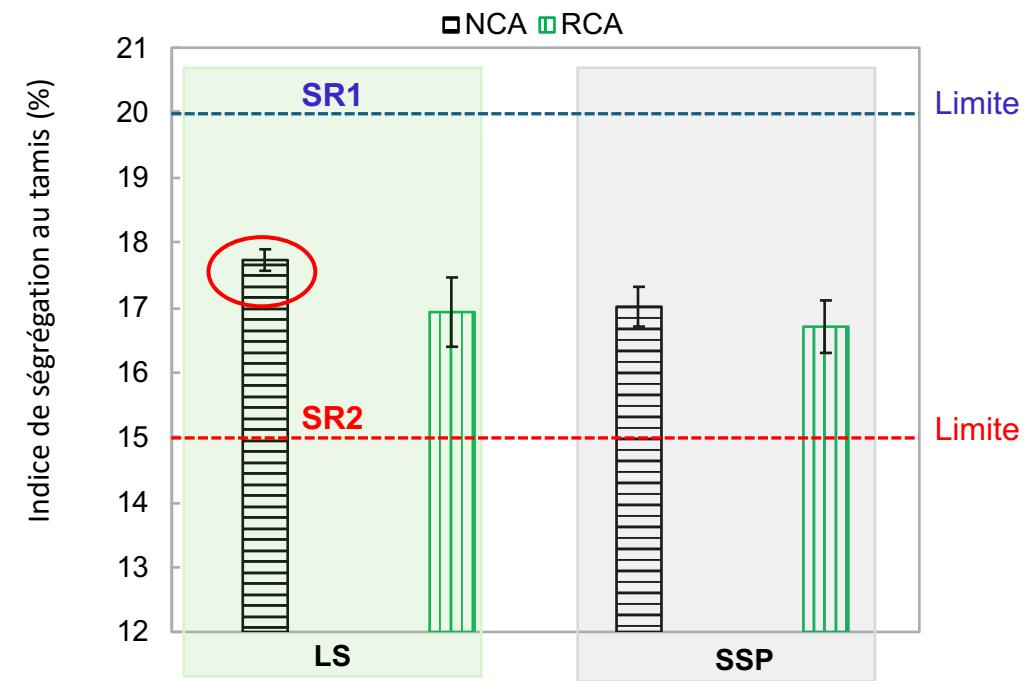
Thixotropie

Ségrégation visible

Ressuage



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



LS-NCA → plus faible résistance à la ségrégation

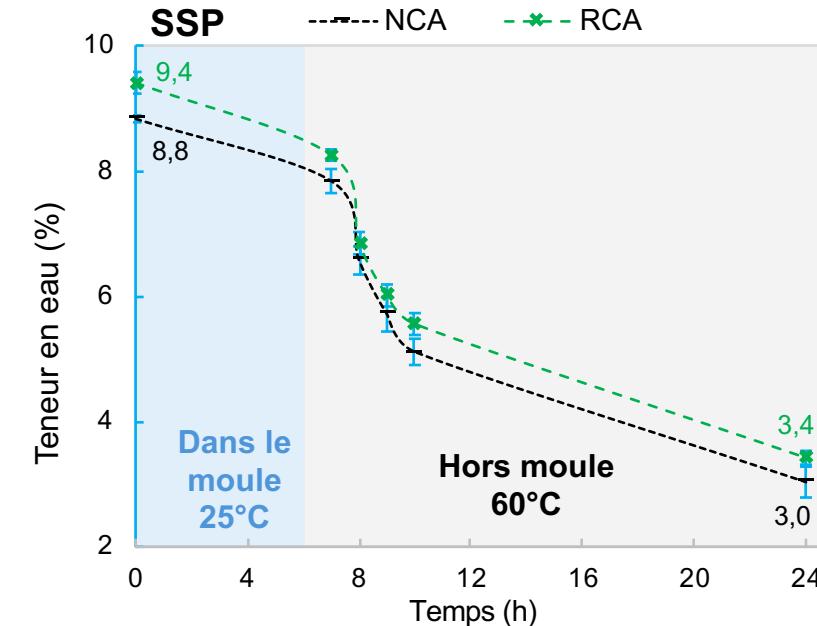
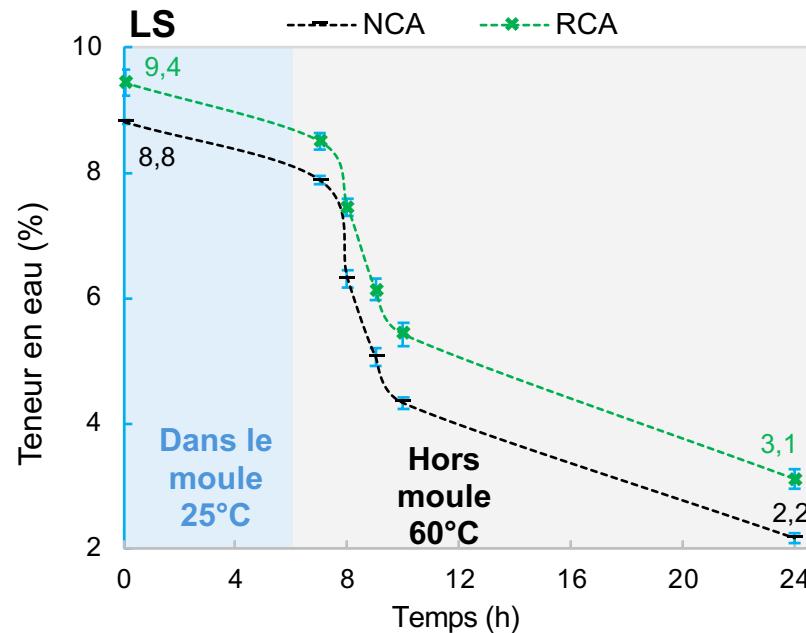
Meilleure Stabilité
SSP ; RCA

Durcissement par carbonatation

CO₂ stocké

▪ Pré-conditionnement

Teneur en eau



LS-NCA ($2.2 \pm 0.1\%$) < SSP-NCA ($3.0 \pm 0.2\%$) <

Instable

VSI \uparrow

Indice de ségrégation \uparrow

SSP-RCA ($3.11 \pm 0.02\%$)

SSP

Porosité \uparrow

Particules fines \uparrow

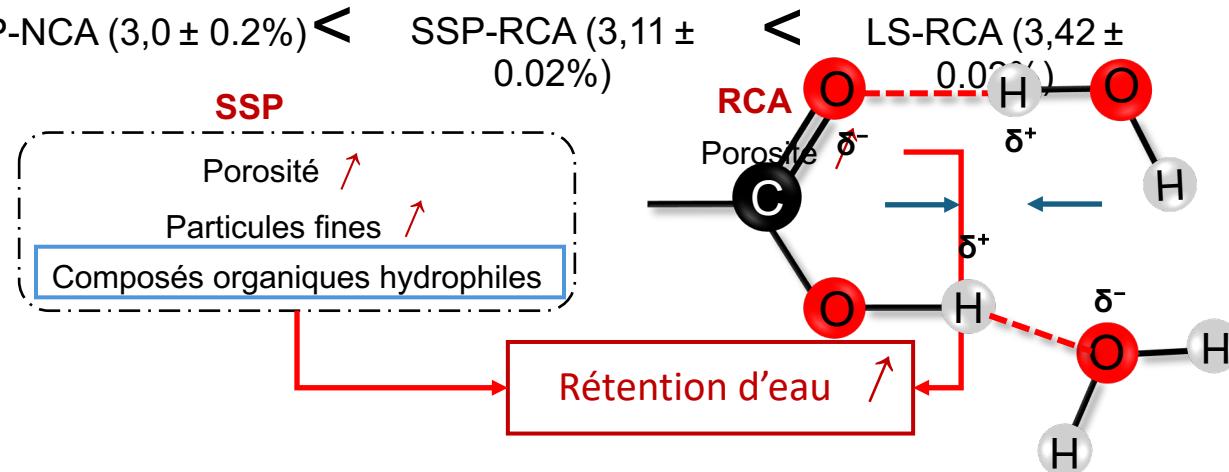
Composés organiques hydrophiles

LS-RCA ($3.42 \pm 0.02\%$)

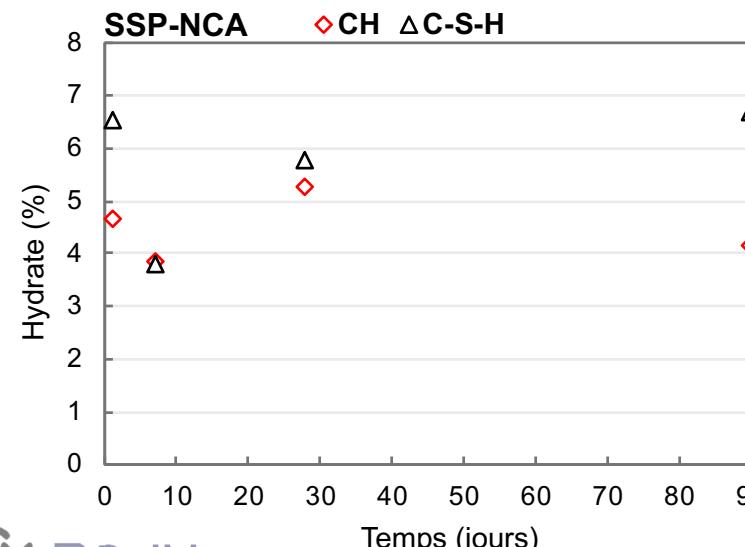
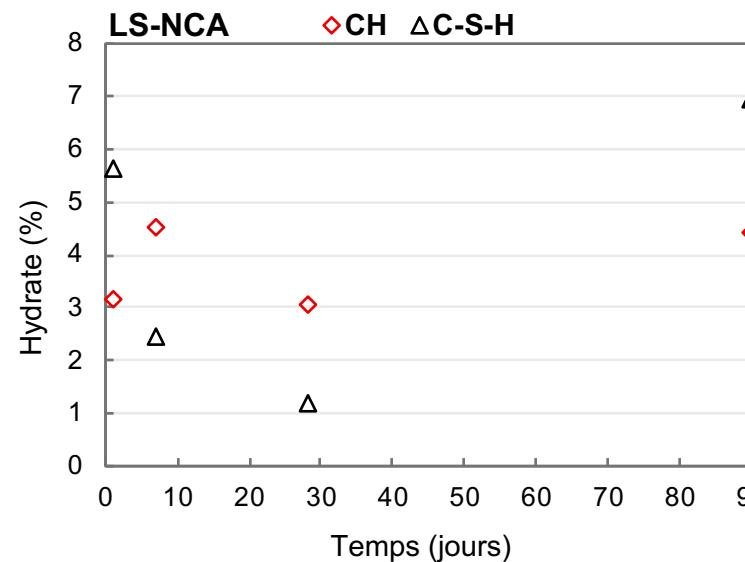
RCA

Porosité \uparrow

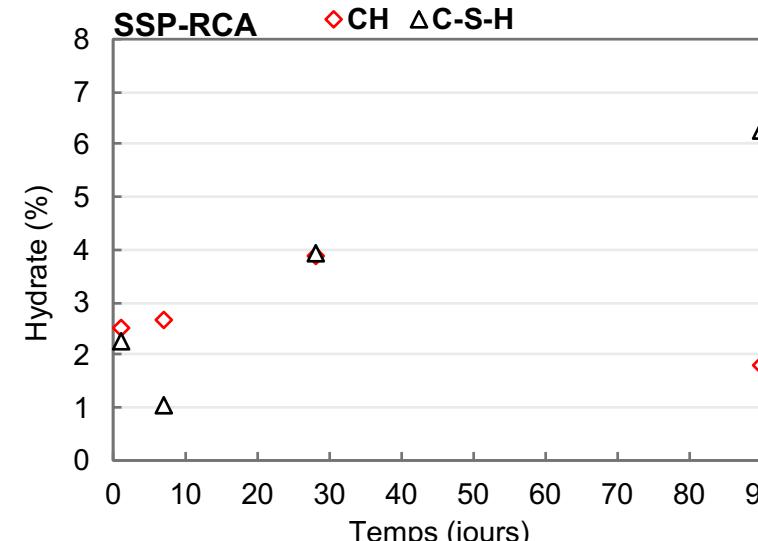
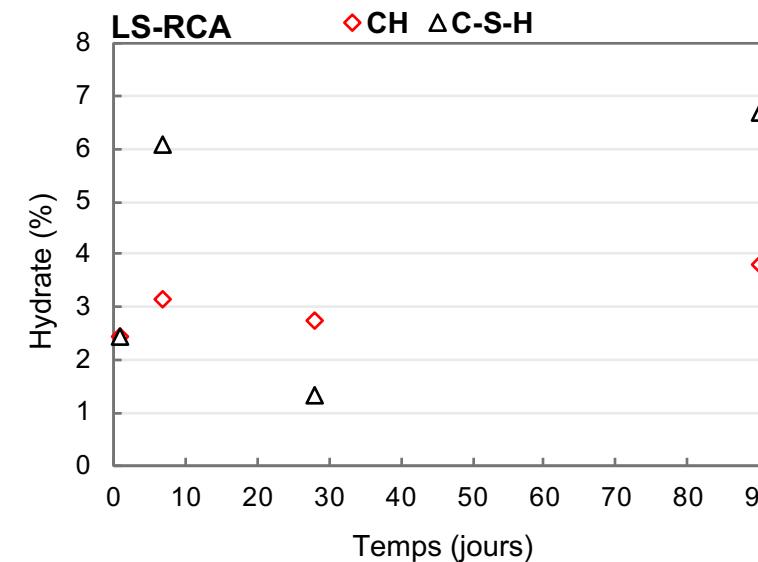
Rétenzione d'eau \uparrow



CO₂ stocké: ATG



Teneur en hydrates participant à la carbonatation



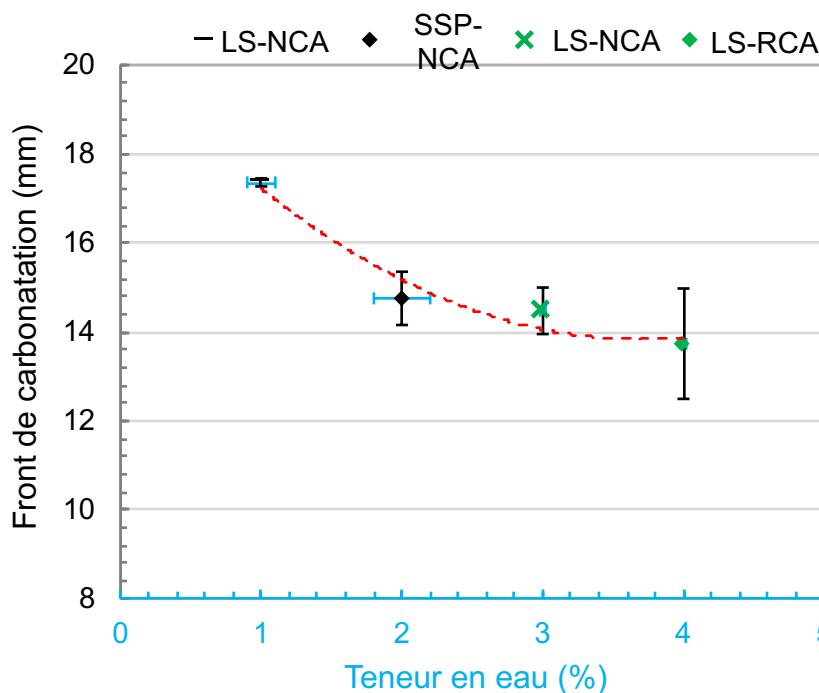
Carbonatation précoce (1 jour)

Quantité d'hydrates formés

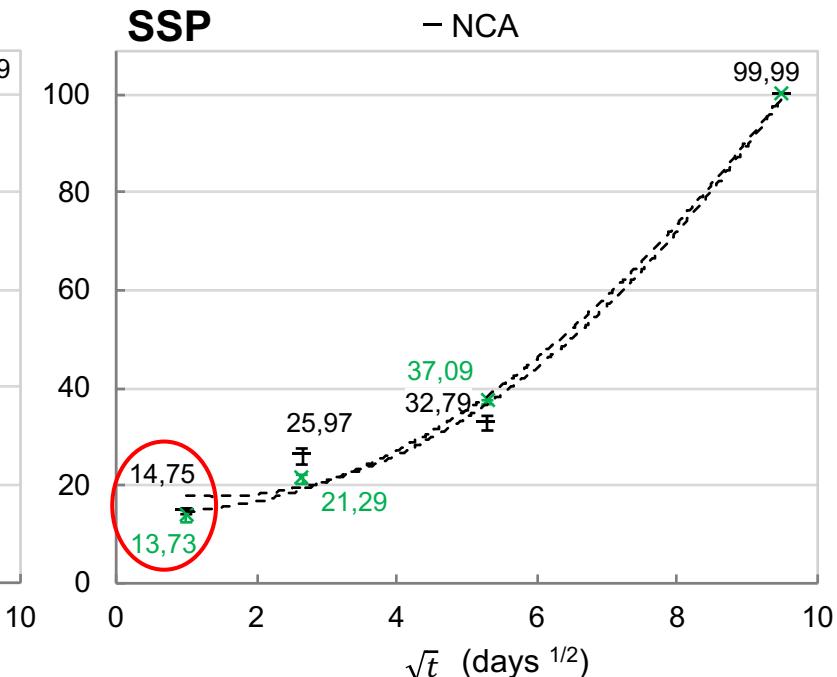
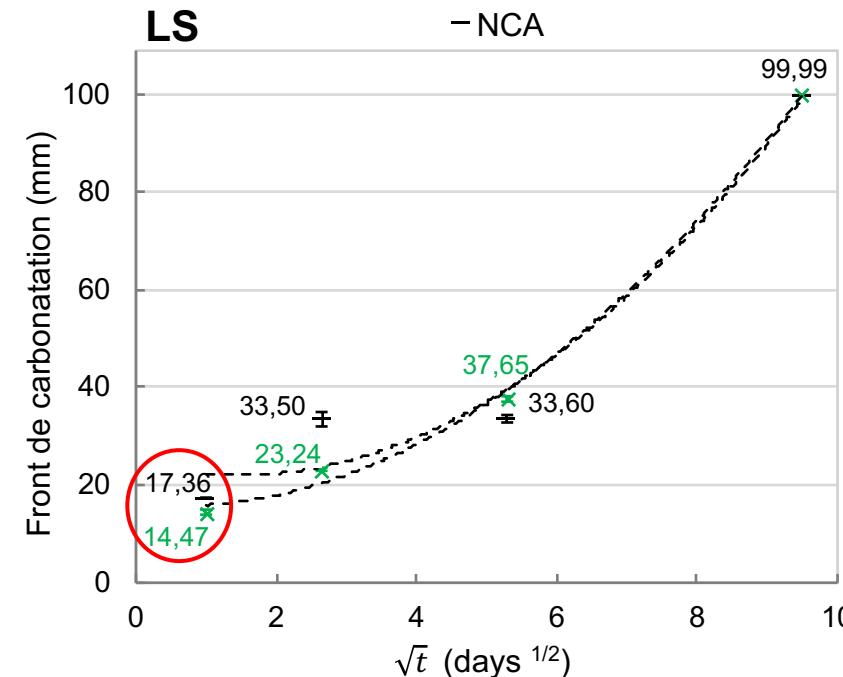
Quantité de Ca(OH)₂

Diffusion de CO₂

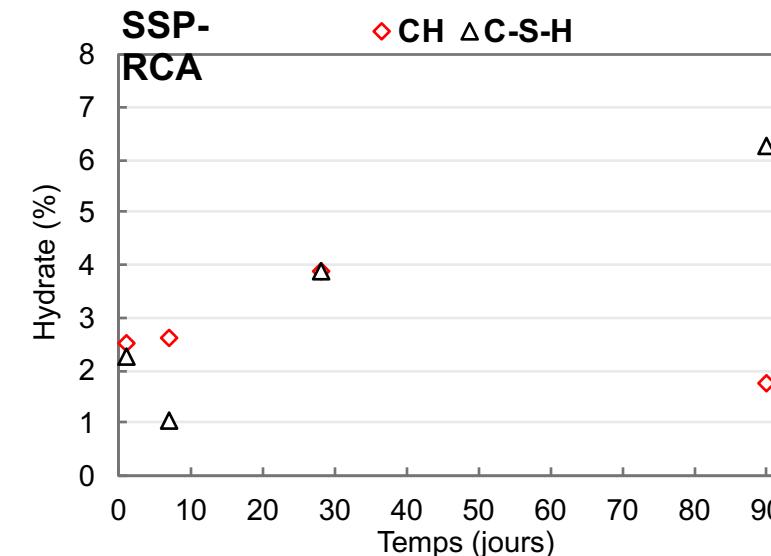
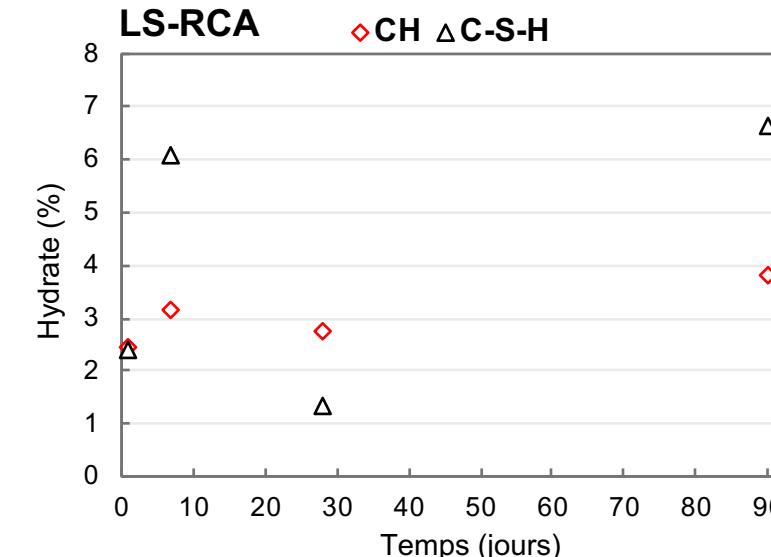
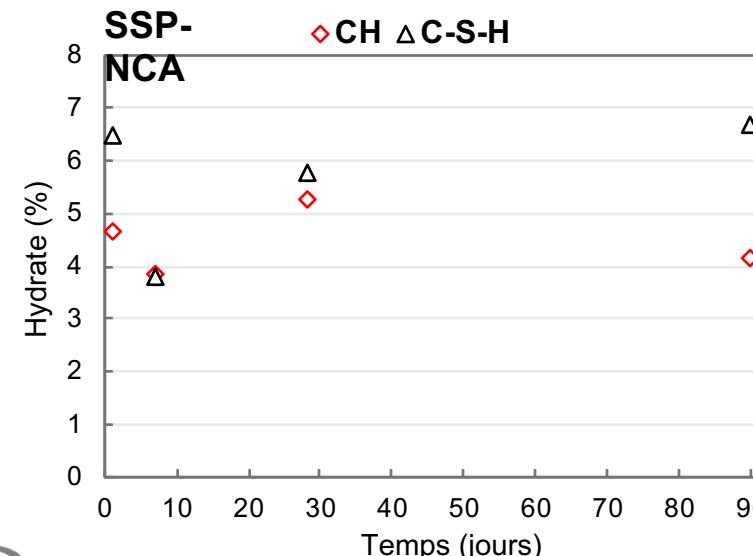
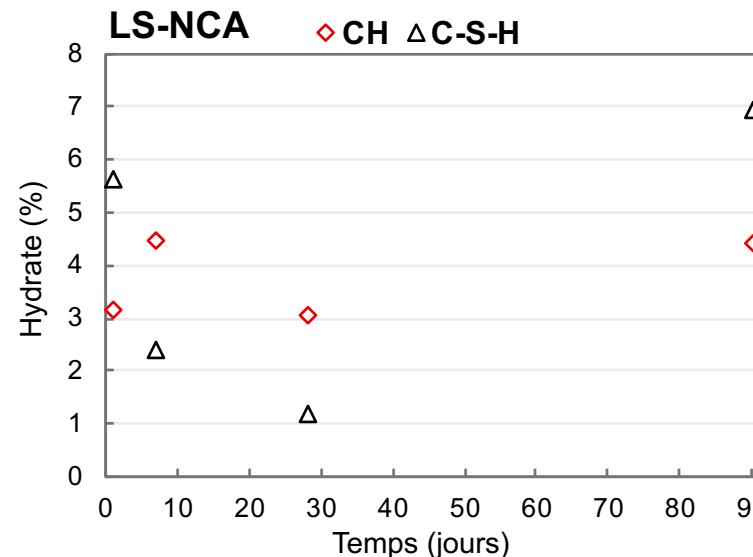
Front de carbonatation: Phénolphtaléine



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

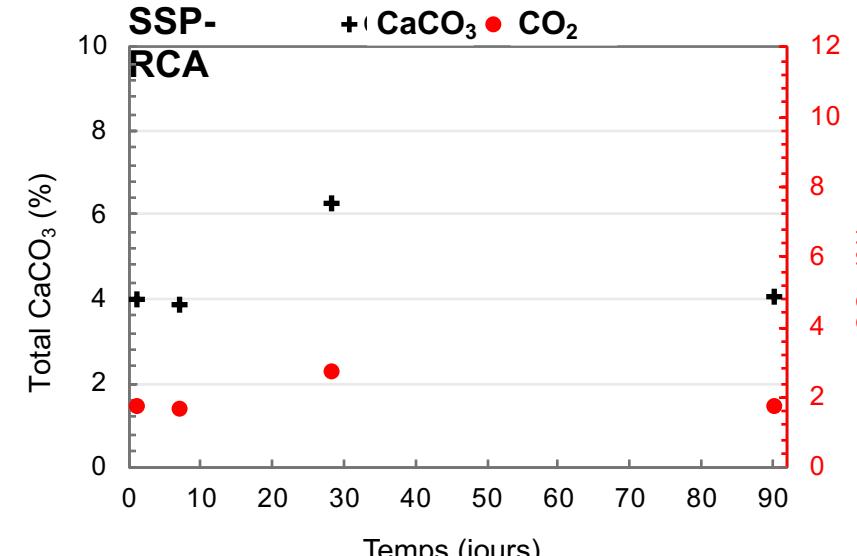
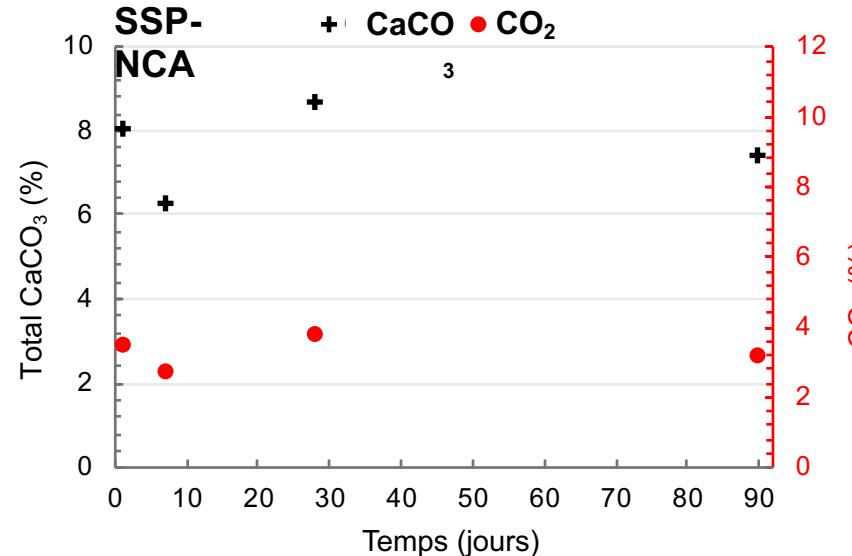
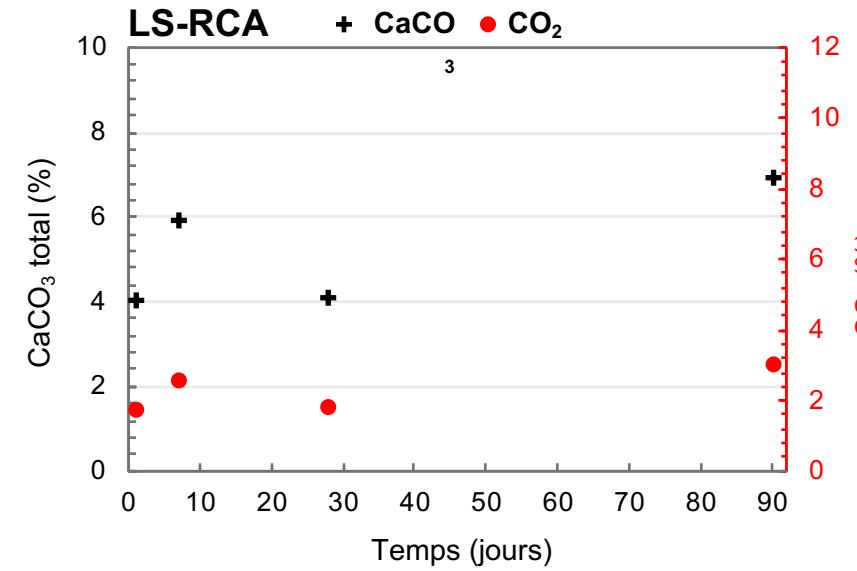
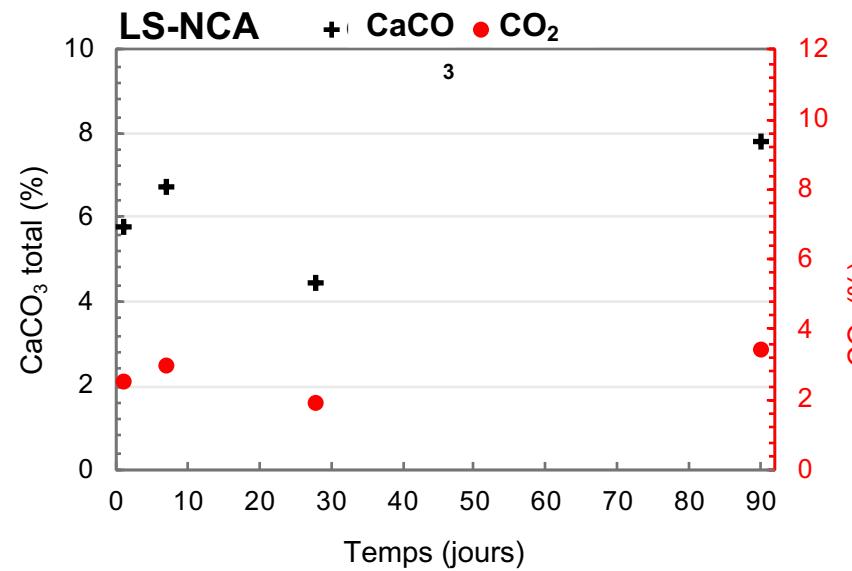
Carbonatation continue

Dissolution des hydrates (liée au pH local)

Alternance hydratation ↔ carbonatation

Passivation des hydrates

Quantité du CO₂ stockée estimée par ATG

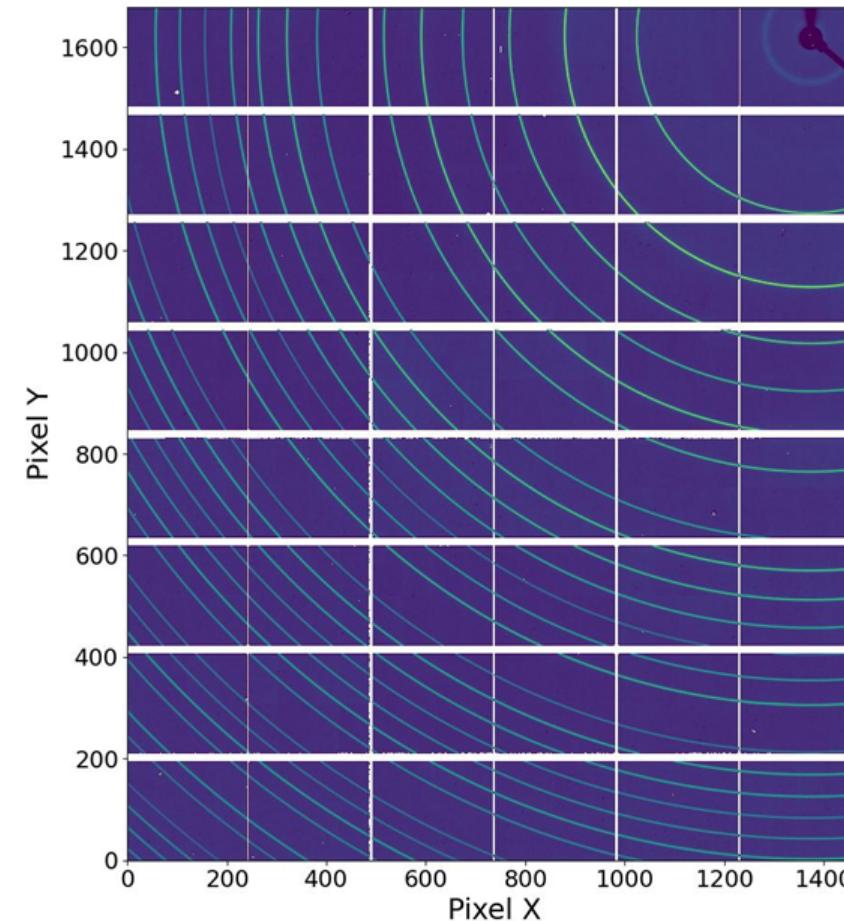


Tendances non monotones

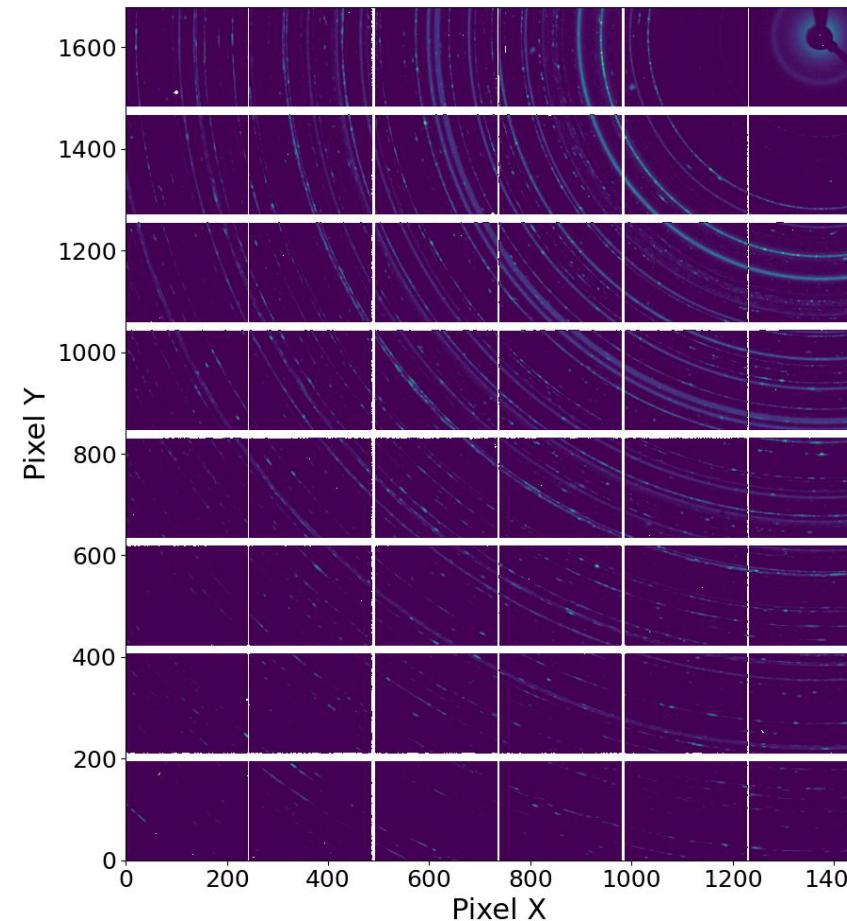
3.5 % CO₂ — SSP-NCA (max; 24h)
4 % CO₂ — SSP-NCA (max; 28j)

Meilleur stockage avec les échantillons SSP

Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld



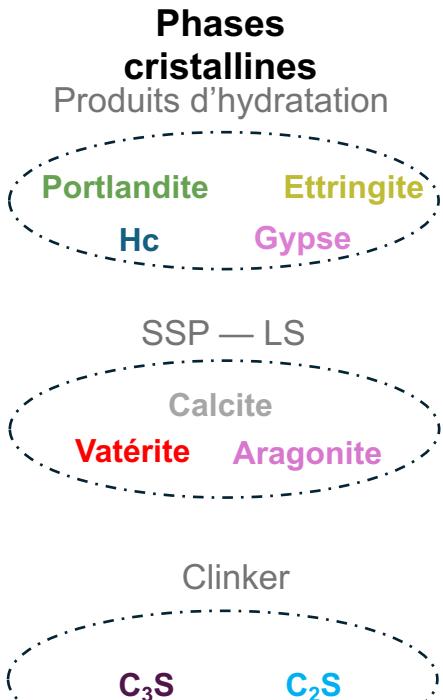
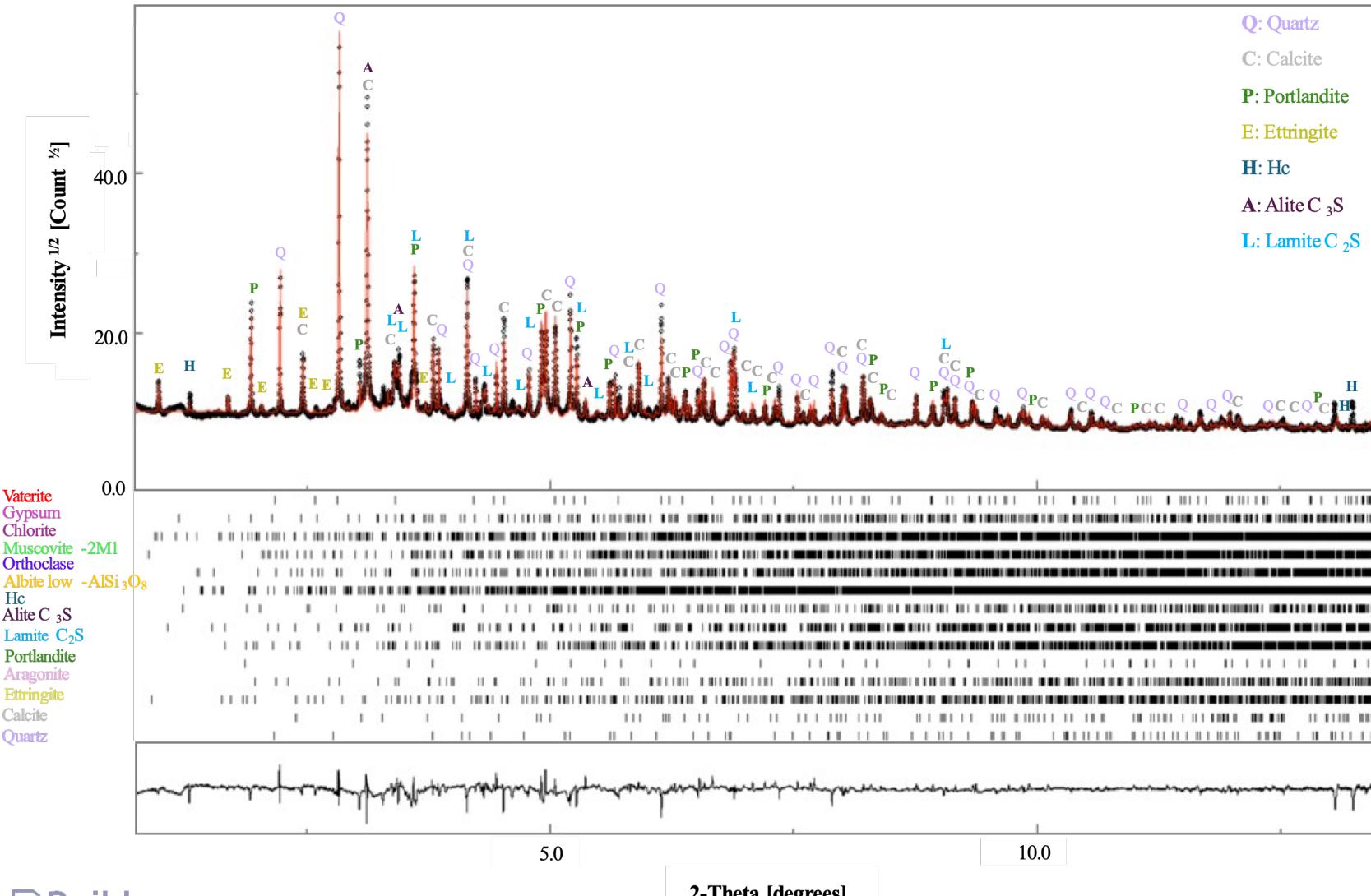
LaB₆ 660b NIST poudre



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

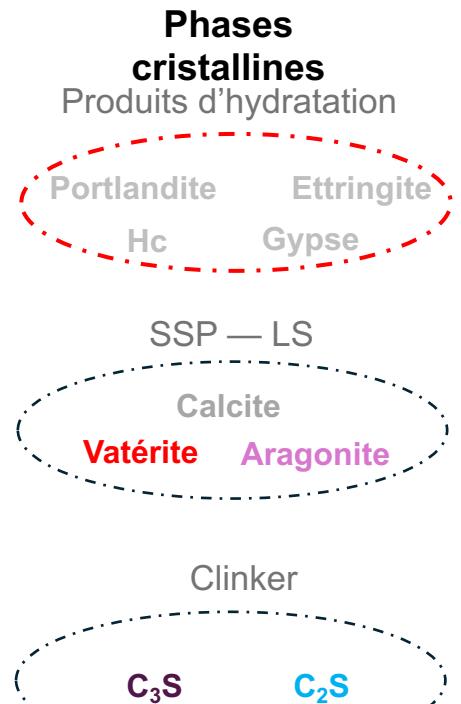
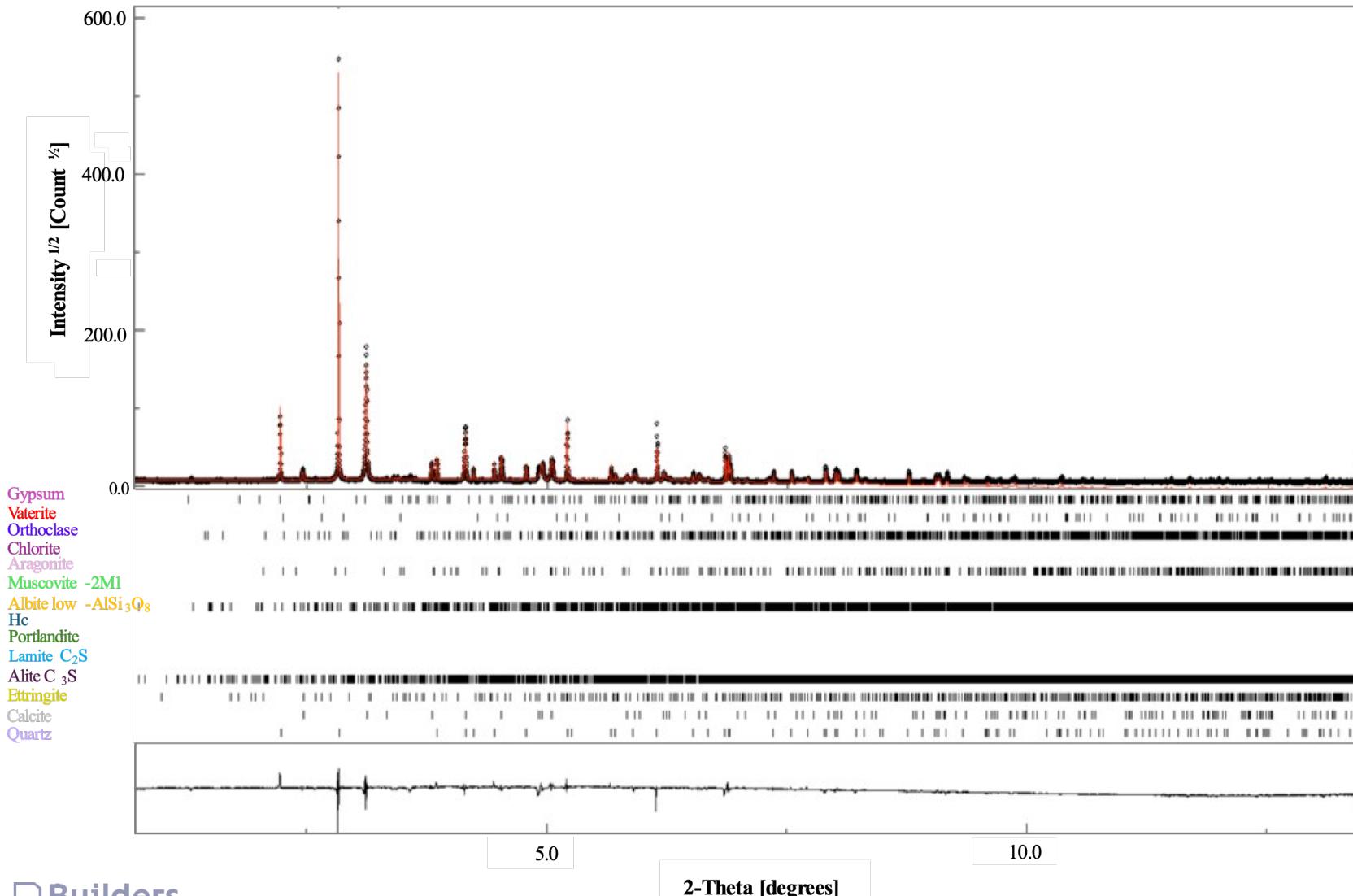
Durcissement sans carbonatation - 1 jour

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

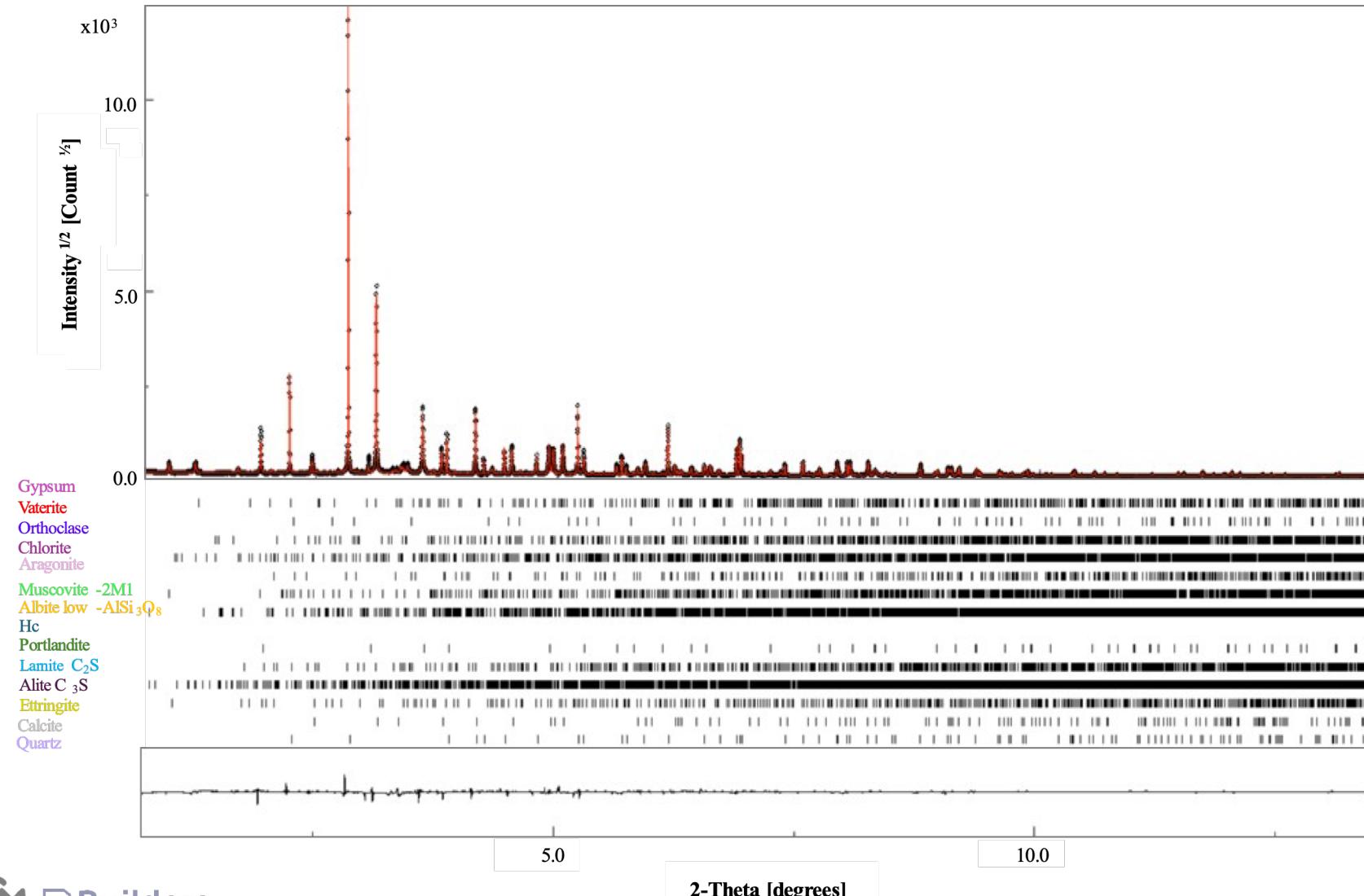
Durcissement par carbonatation - 1 jour

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)

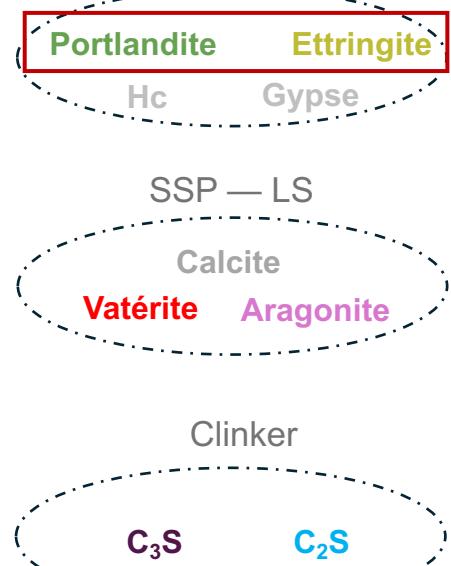
- Augmentation significative de la calcite
- Légère augmentation de l'aragonite et la vaterite
- Ca(OH)₂ insuffisant → baisse du pH → décalcification du C-S-H
- Carbonatation simultanée des hydrates

Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

Durcissement par carbonatation - 7 jours



Phases cristallines
Produits d'hydratation



Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

Durcissement par carbonatation - 7 jours

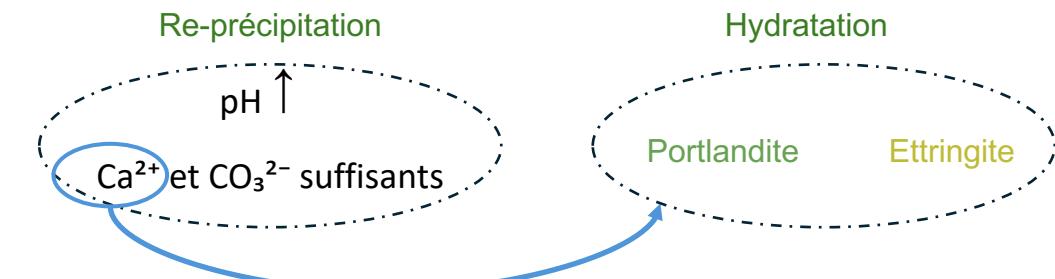
cif	wt (%)			
	LS-NCA	LS-RCA	SSP-NCA	SSP-RCA
Calcite	29.2(0.1)	65(0.4)	57.5(0.3)	65.6(0.2)
Aragonite	1.25(0.1)	3.1(0.1)	0.1(0.1)	1.9(0.2)
Vaterite	0.4(0.1)	2.5(0.1)	0.01(0.06)	1.1(0.1)
Portlandite	9.6(0.1)	0.17(0.03)	0.004 (0.03)	0.01(0.07)
Ettringite	4.1(0.1)	0.04(0.08)	0.003(0.064)	0.001(0.041)
Hc	-	-	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%

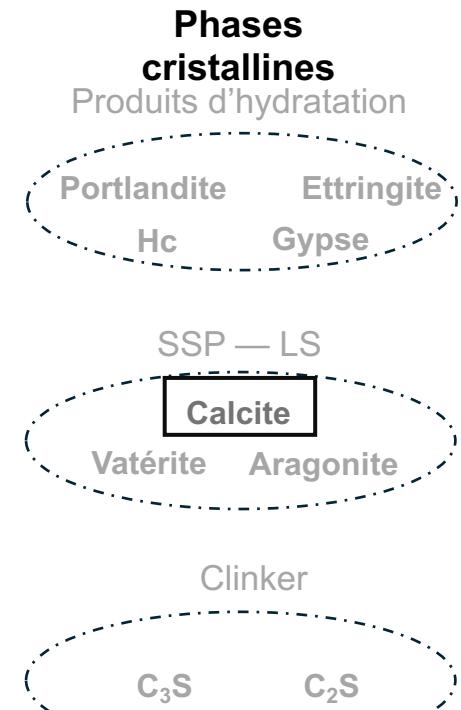
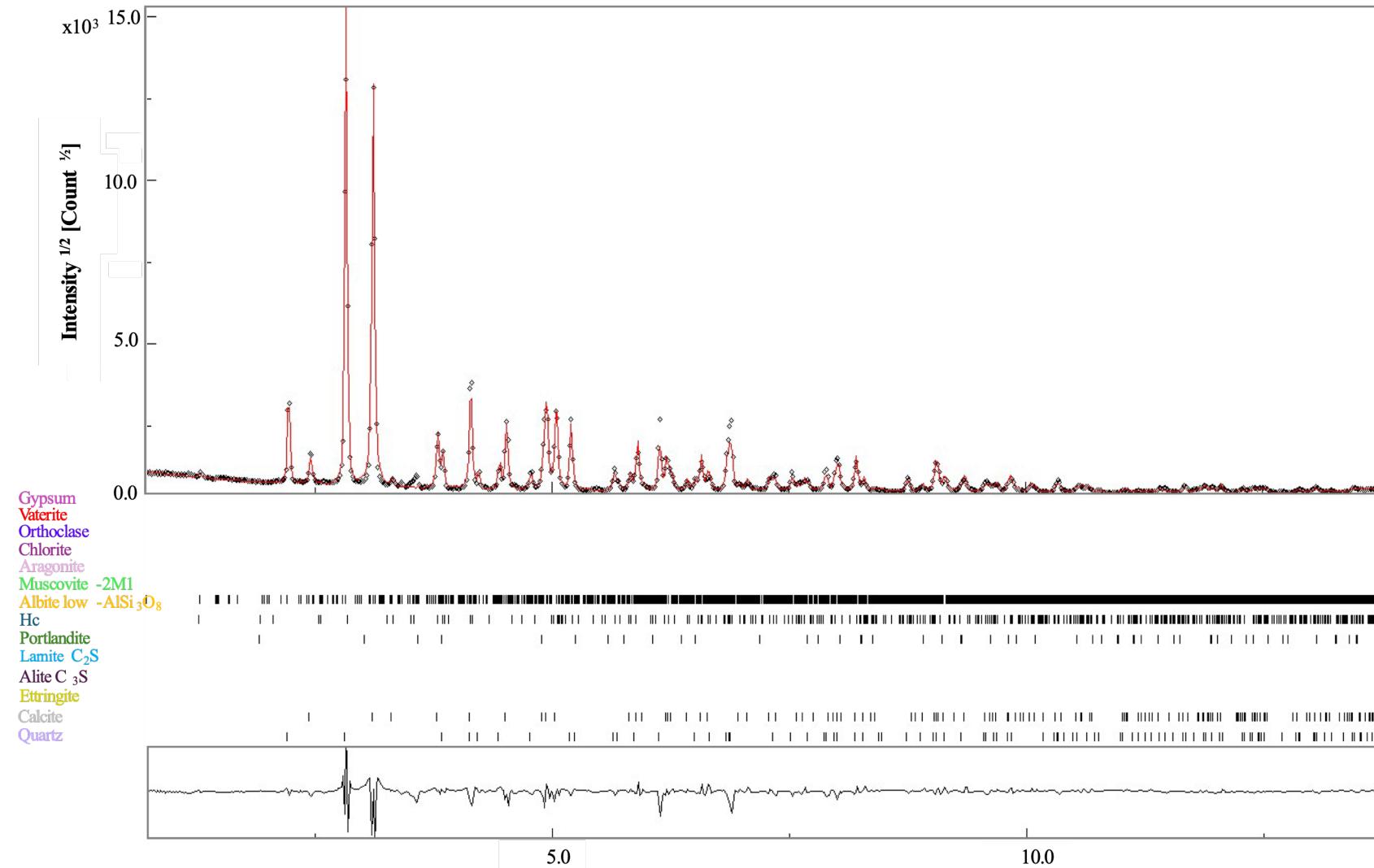
Dissolution de la calcite



- 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

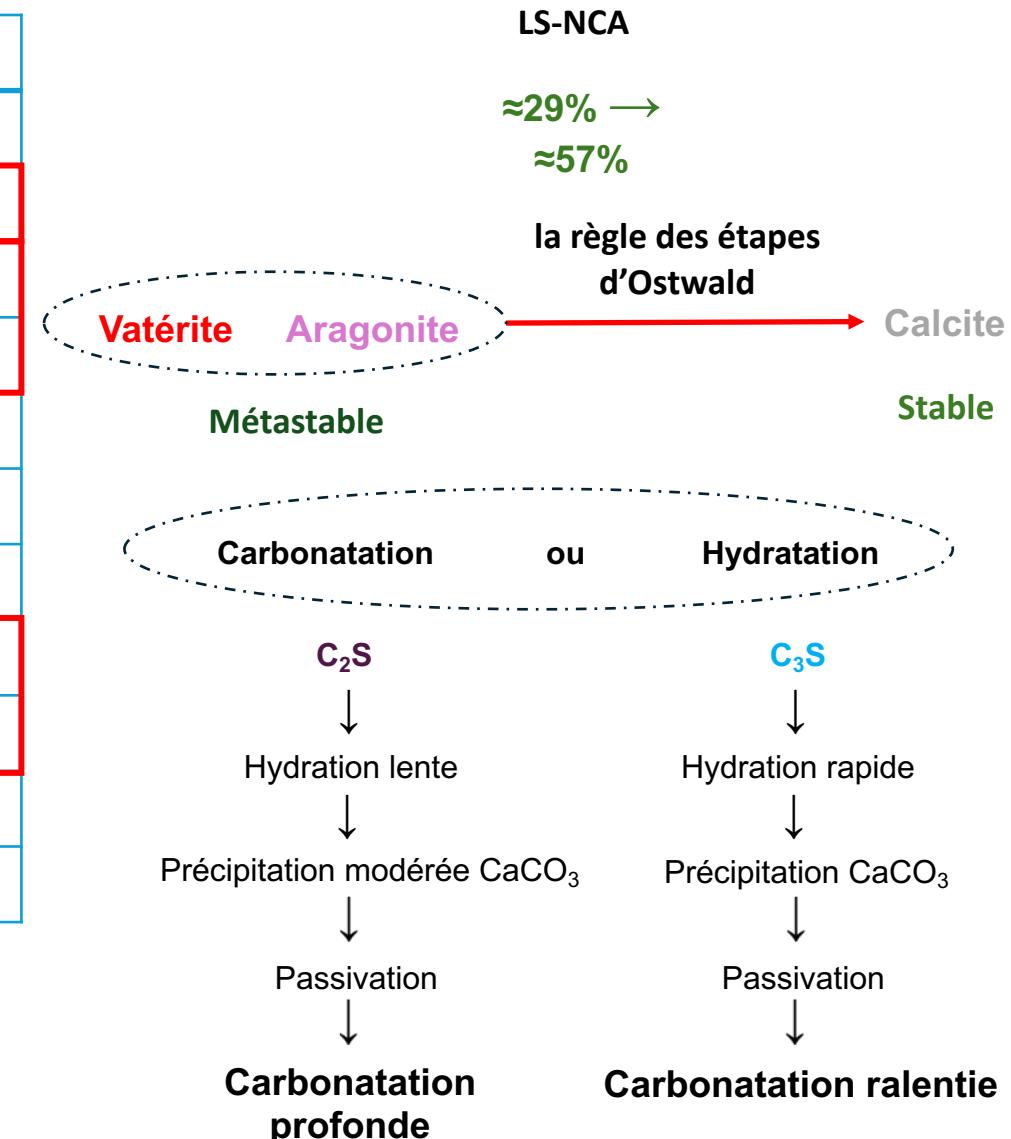


Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld

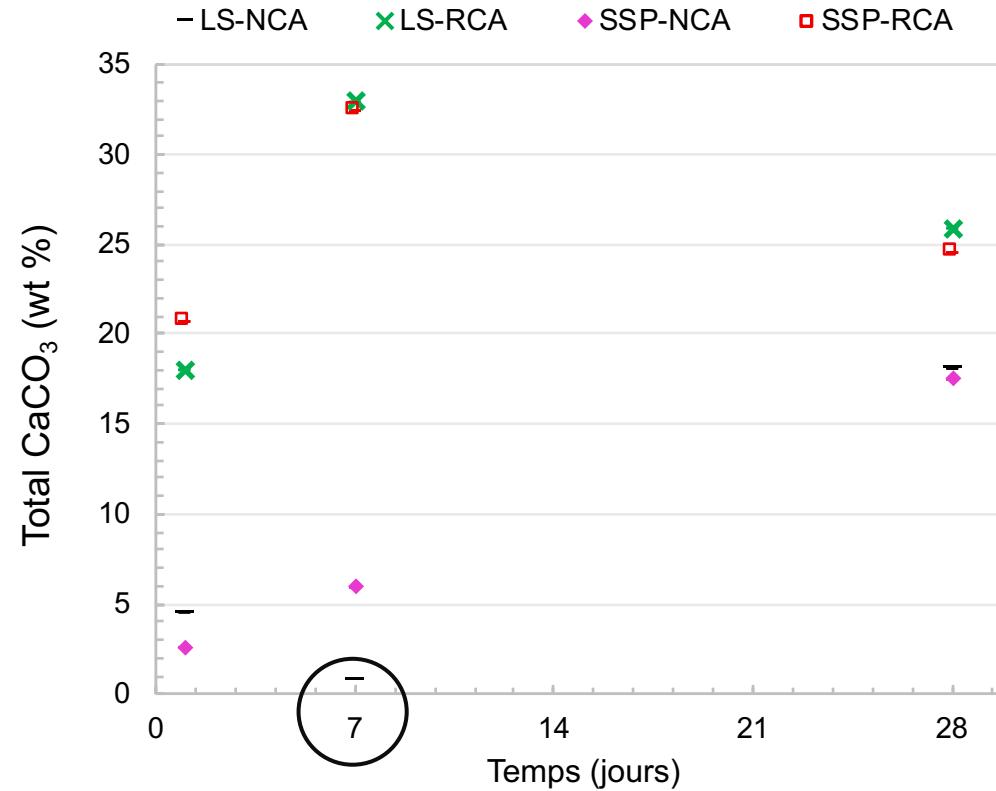
Durcissement par carbonatation - 28 jour

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

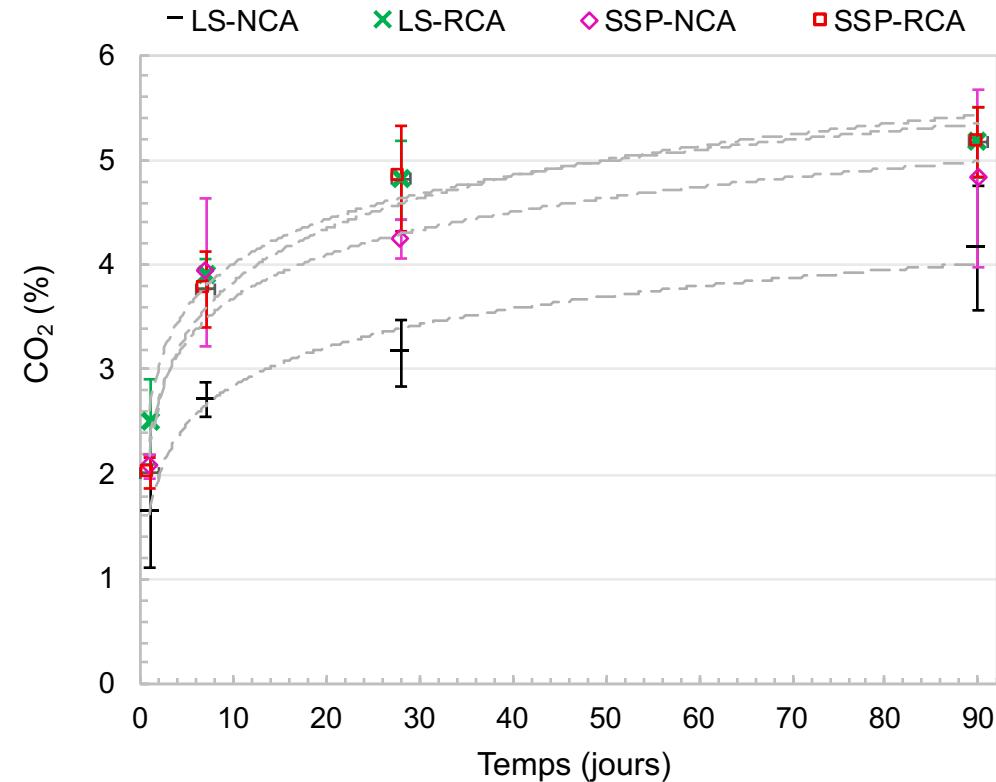


Quantité du CO₂ stockée estimée par DRX-Affinement Rietveld



- **RCA > NCA pour l'absorption de CO₂ à tous les âges**
- Max absorption \approx 32–33 wt% à 7 → \approx 25-26 wt% à 28 jours
- Hydratation dominant dans LS-NCA au jeune âge

Quantité du CO₂ stockée estimée par méthode perte de masse



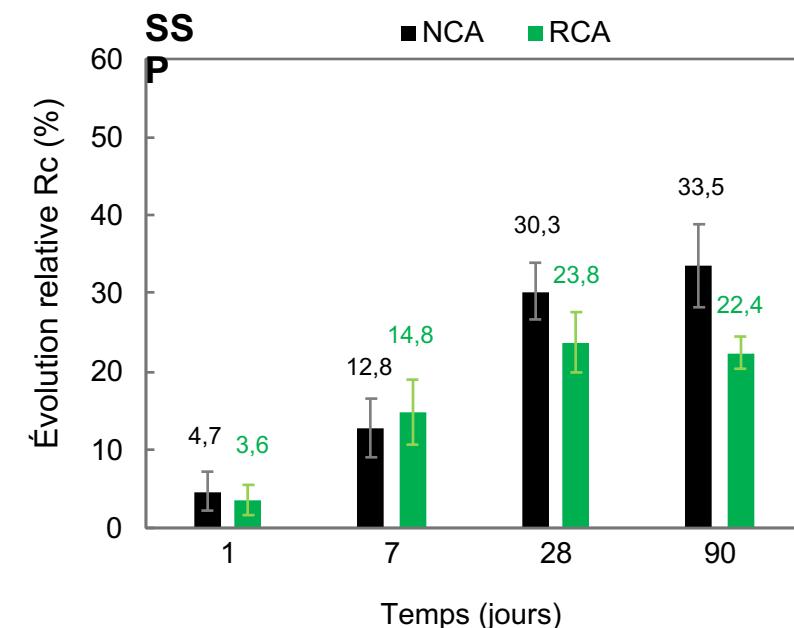
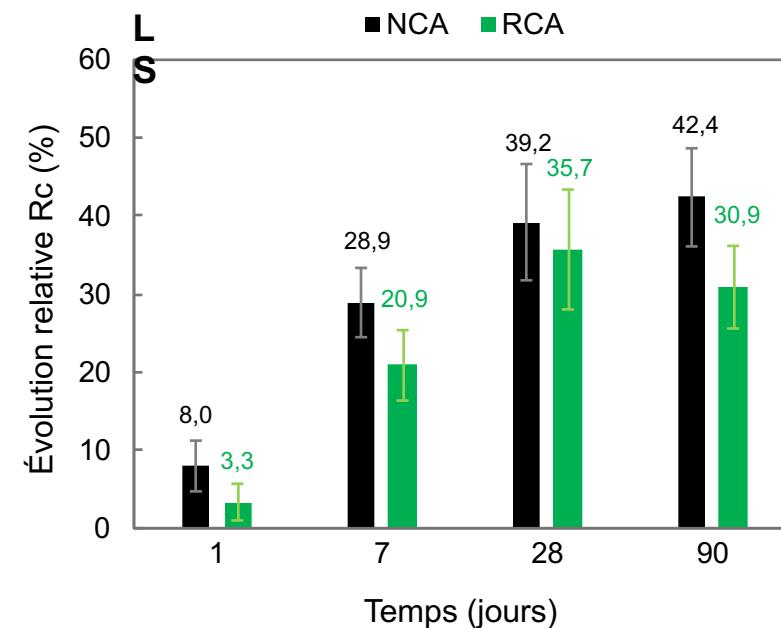
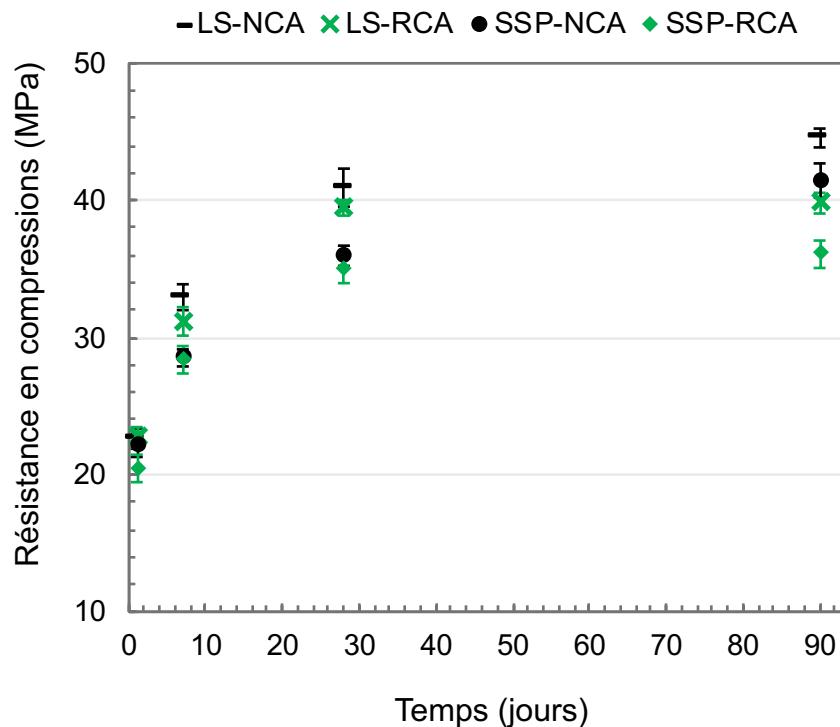
Min absorption ≈2 % par LS-NCA
24h

Max absorption ≈5% par SSP-RCA
90 jours

RCA > NCA
SSP > LS

Effet du durcissement par carbonatation sur les propriétés des BAPs

Résistance en compression

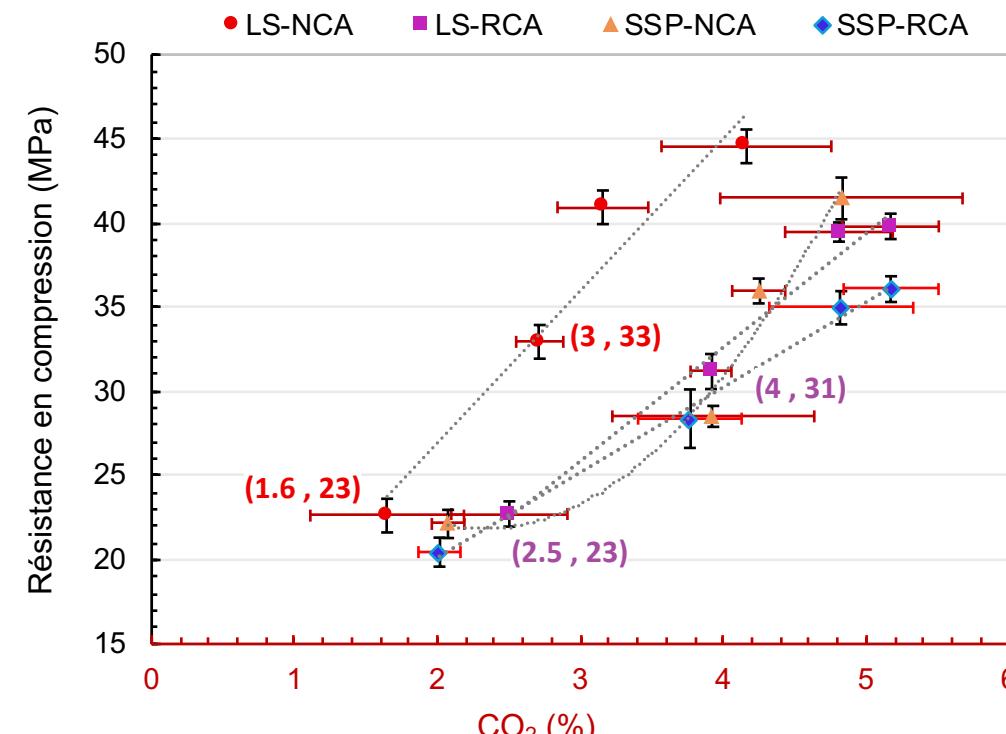


Le durcissement par carbonatation
augmente la résistance en compression
sans effet négatif à long terme

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)

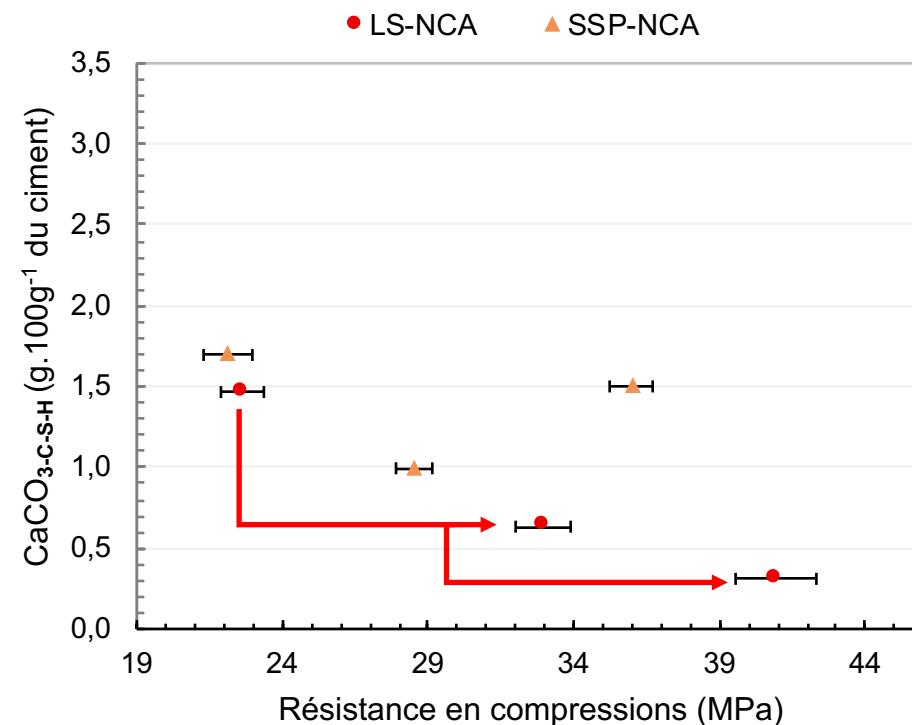


CO₂ n'est pas le seul facteur

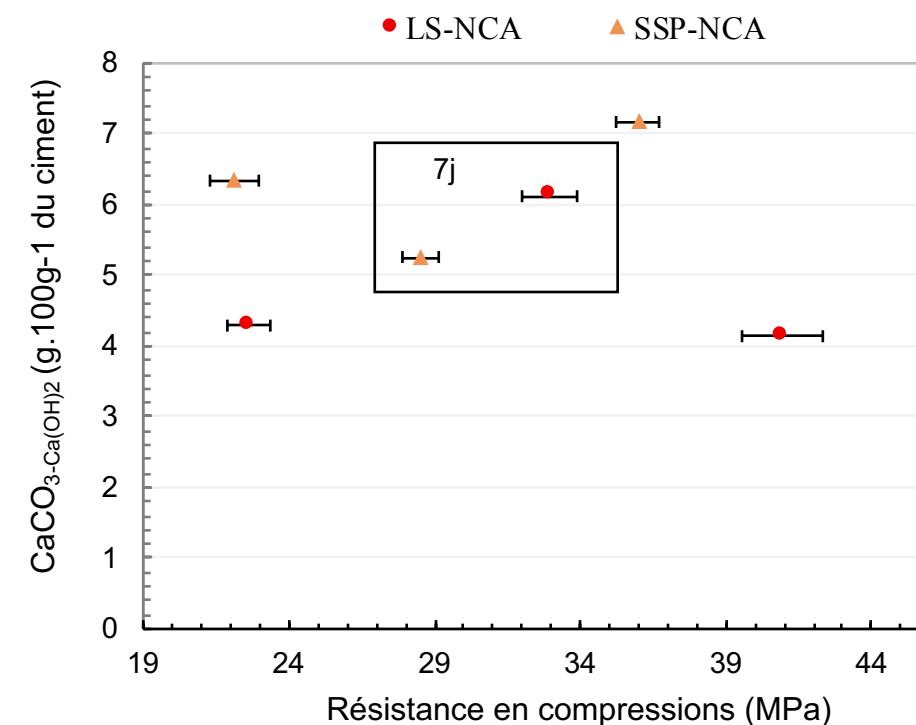
Quels autres mécanismes contrôlent réellement l'évolution
de la résistance ?

Résistance en compression: Paramètres influençant son évolution

C-S-H



Ca(OH)₂



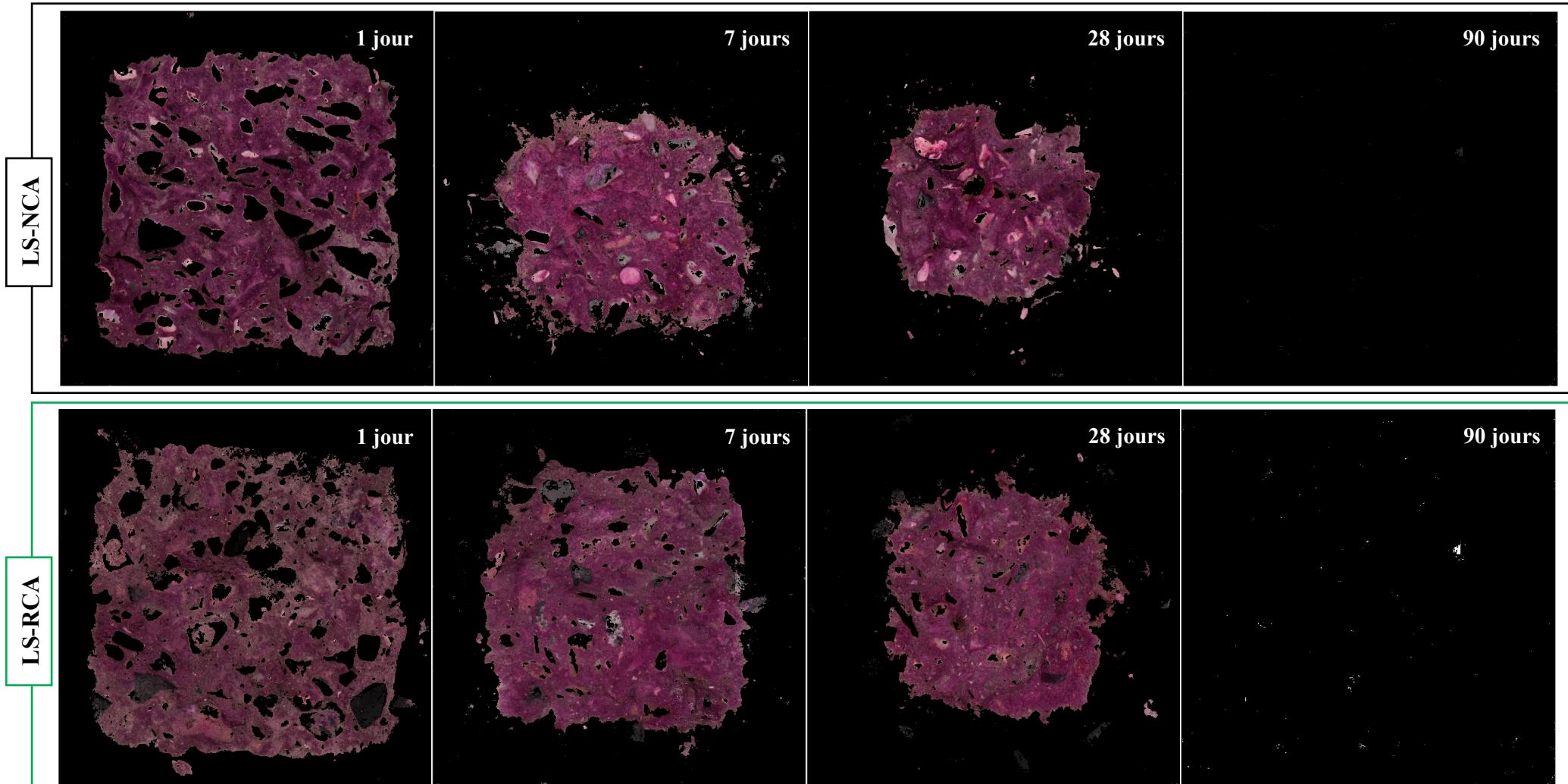
Moins de CaCO₃ issu du C-S-H → Décalcification limitée → Meilleure R_c

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

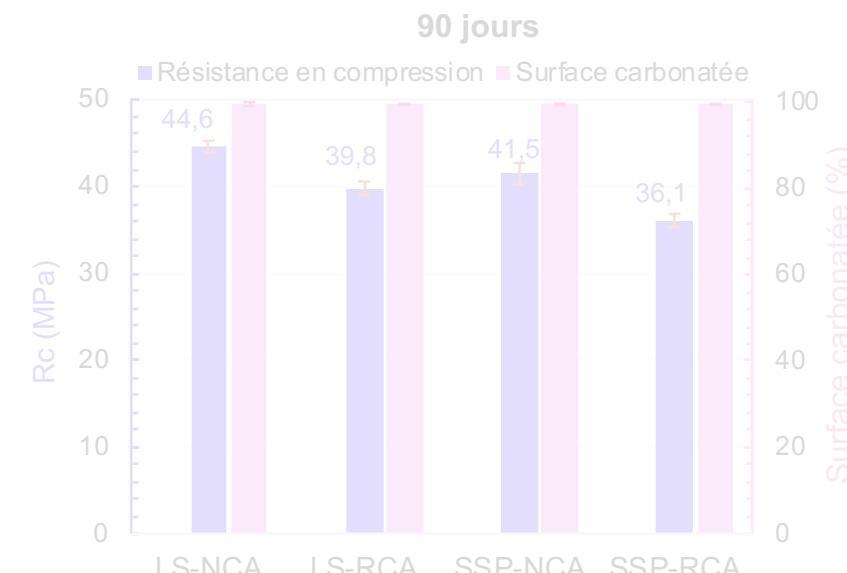
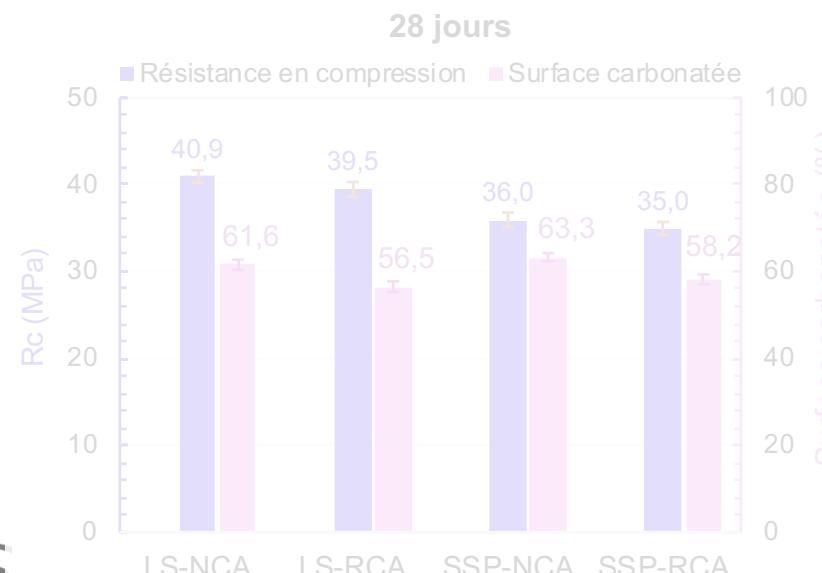
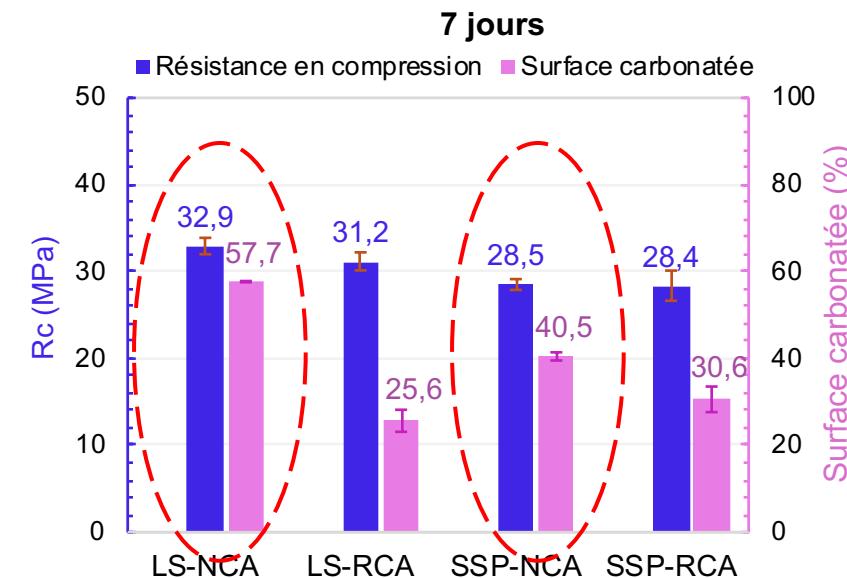
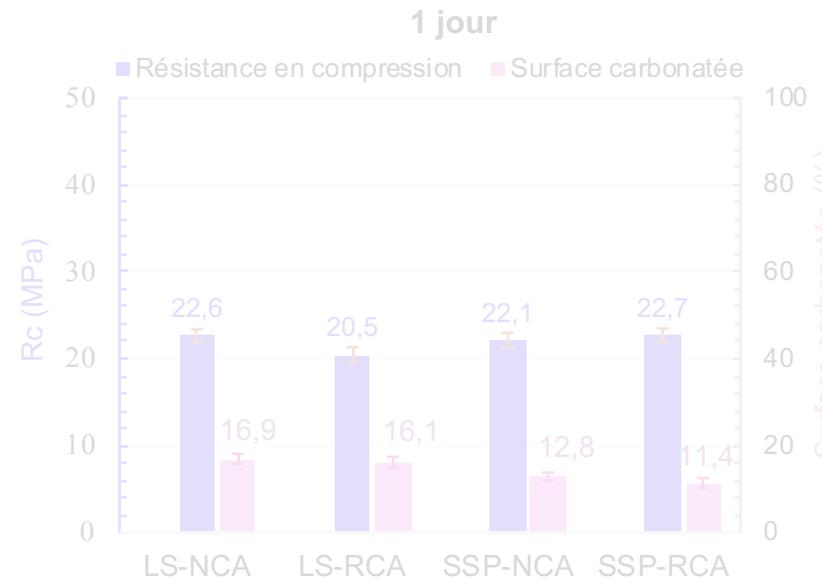


Équilibre entre carbonatation
et hydratation

Résistance en compression: Paramètres influençant son évolution



Résistance en compression: Paramètres influençant son évolution



LS-NCA / SSP-NCA

↑ Surface carbonatée → ↑ résistance en compression

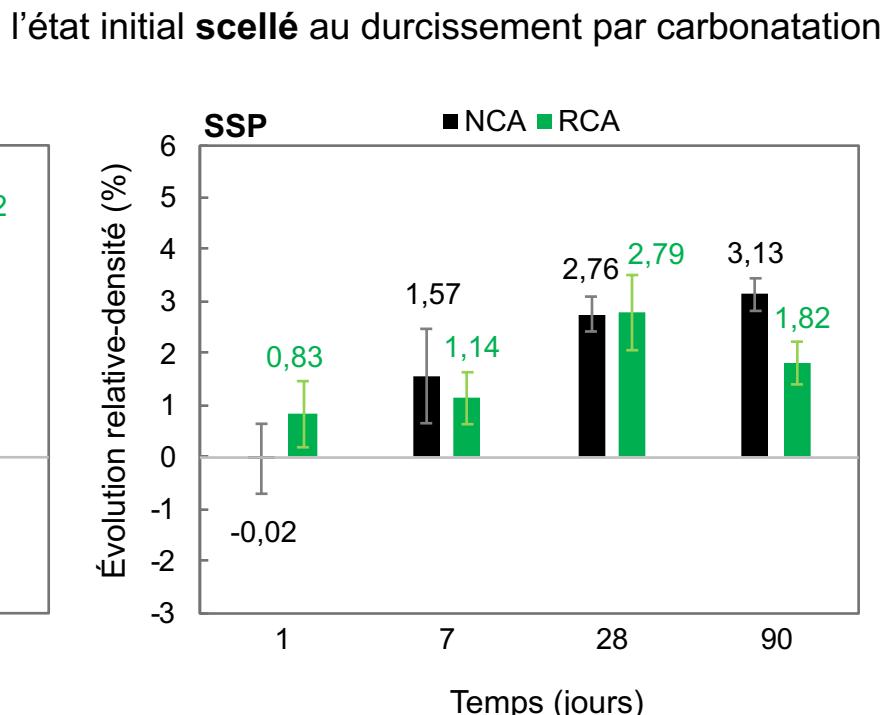
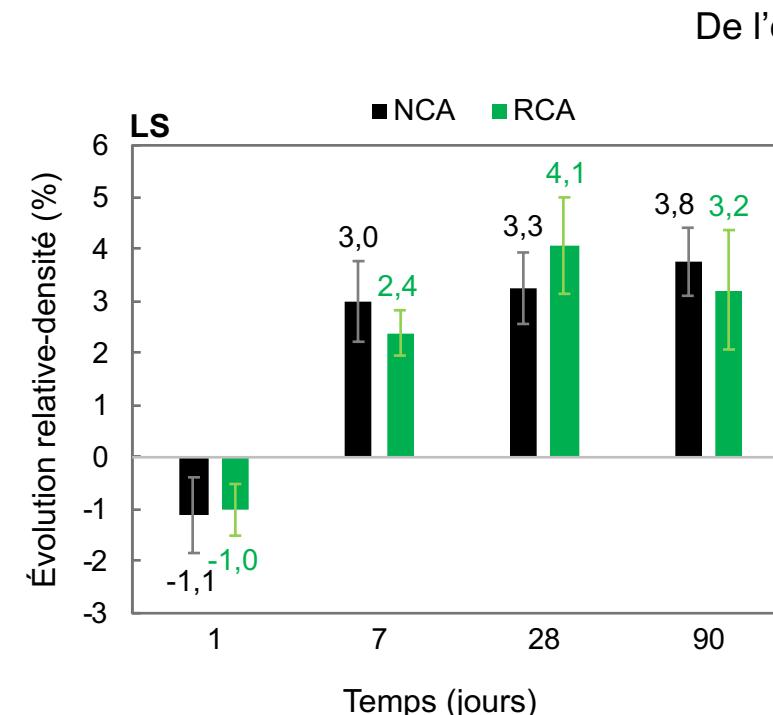
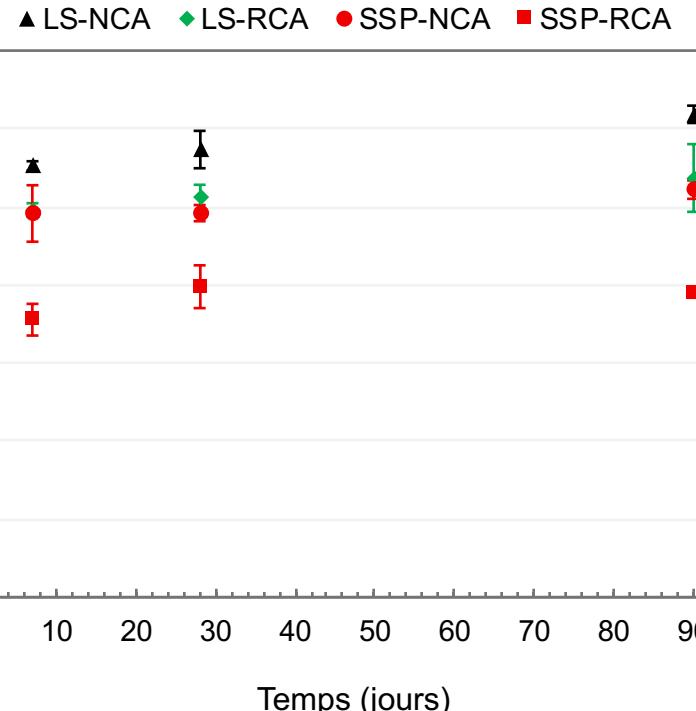


CaCO₃ réparti dans un volume



Effet plus bénéfique

Densité apparente



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



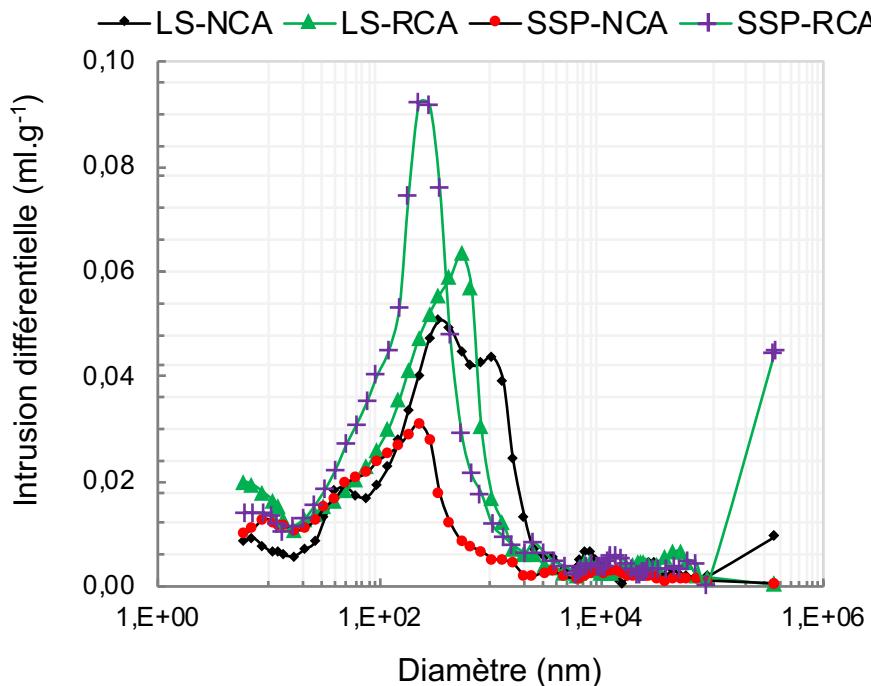
Durcissement par carbonatation non encore optimal à 1 jour



Augmentation de la densité à partir de
7 jours

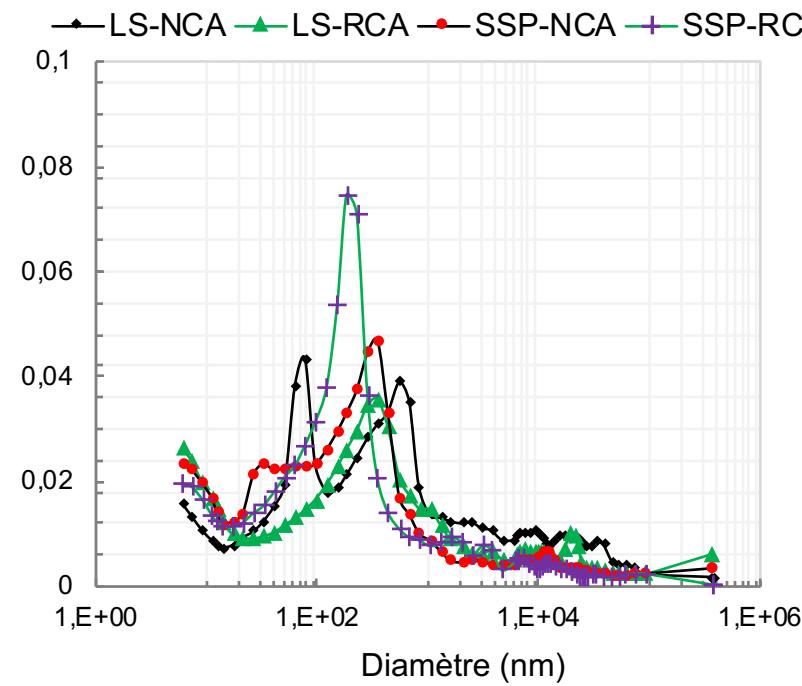
Porosité

1 jour



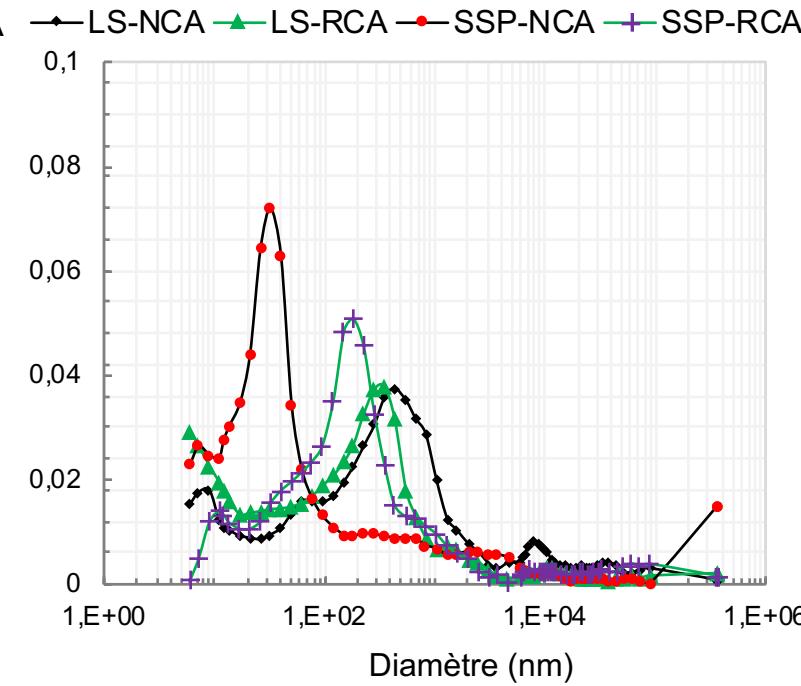
1 jours	Porosité totale (%)
LS-NCA	15.8
LS-RCA	16.4
SSP-NCA	10.1
SSP-RCA	18.8

7 jours



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

28 jours



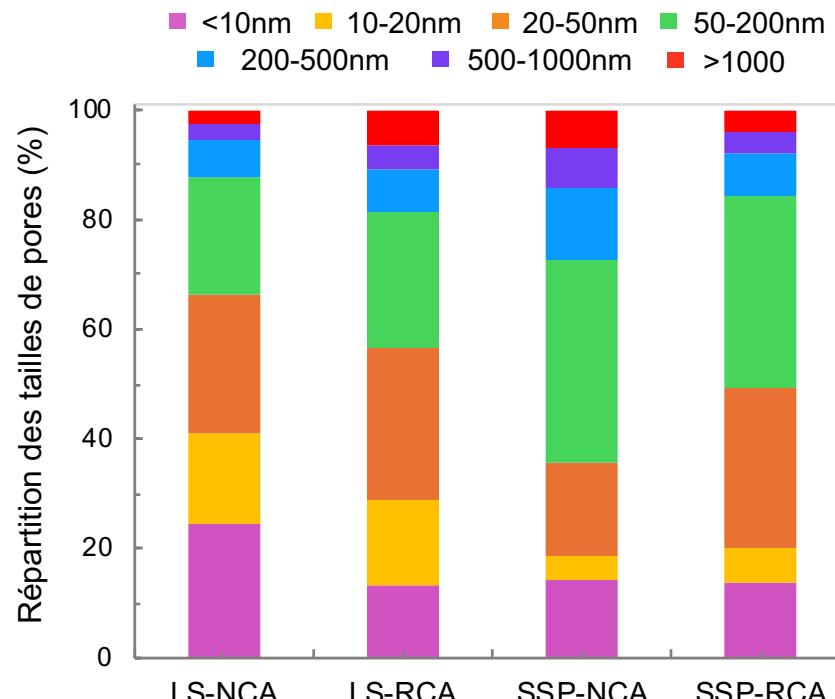
28 jours	Porosité totale (%)
LS-NCA	12.5
LS-RCA	11.3
SSP-NCA	13.3
SSP-RCA	12.7

Affinement de la porosité dans les systèmes

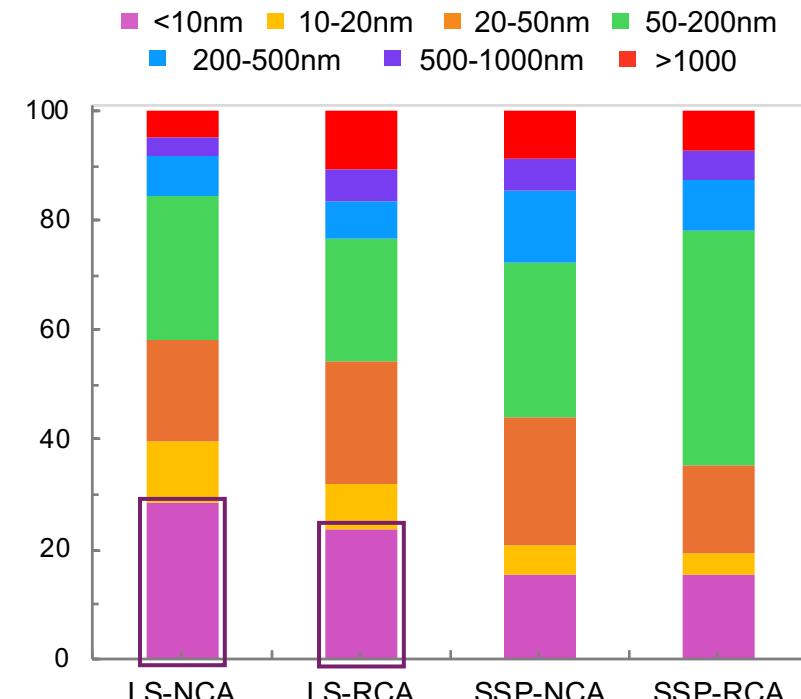
SSP → sur-carbonatation → augmentation de porosité

Porosité

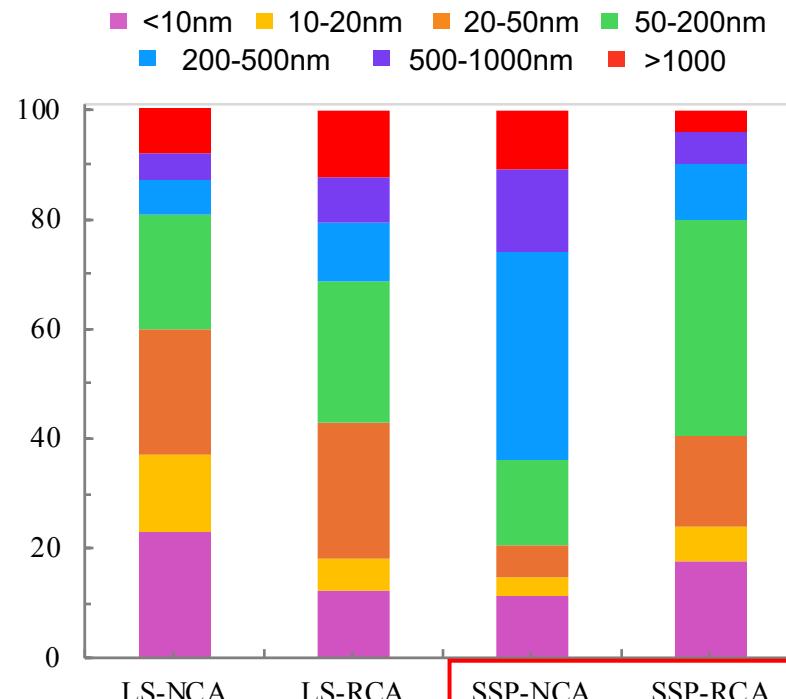
1 jour



7 jours



28 jours

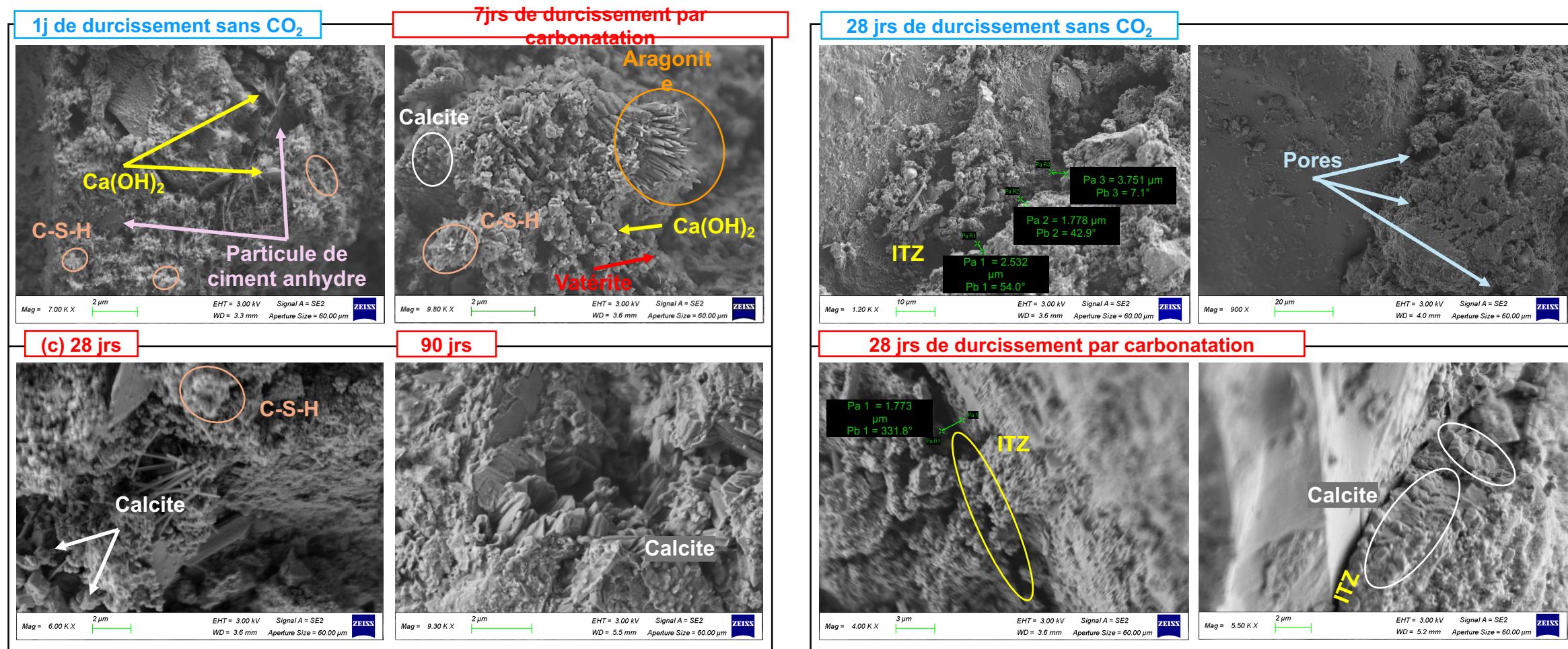


Précipitation des $\text{CaCO}_3 \rightarrow \uparrow$ pores <200 nm \rightarrow microstructure plus dense

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

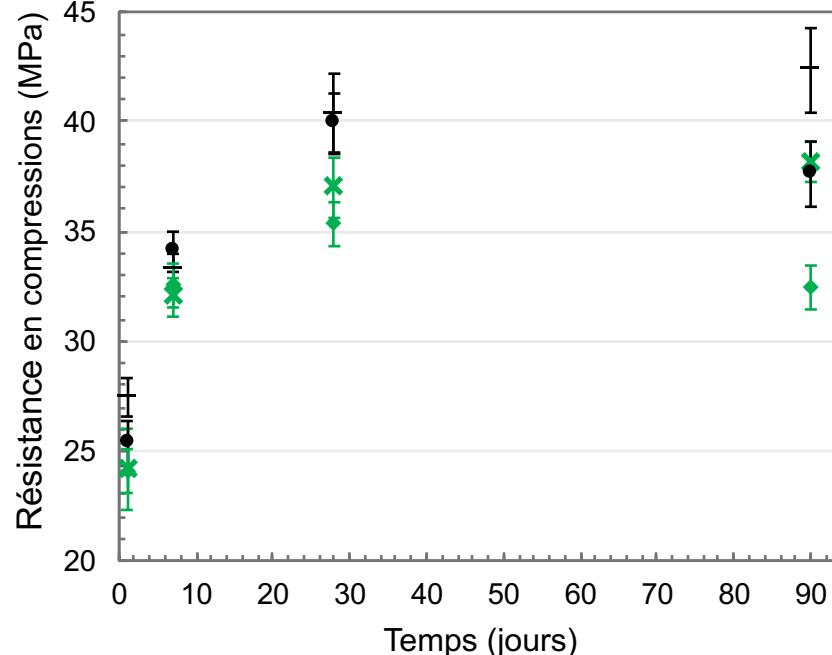


Carbonatation ou durcissement standard ?

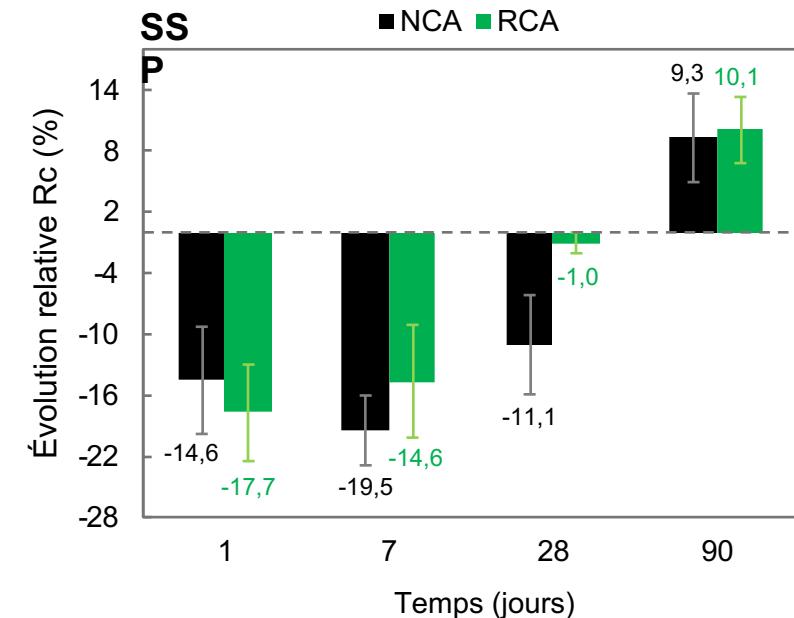
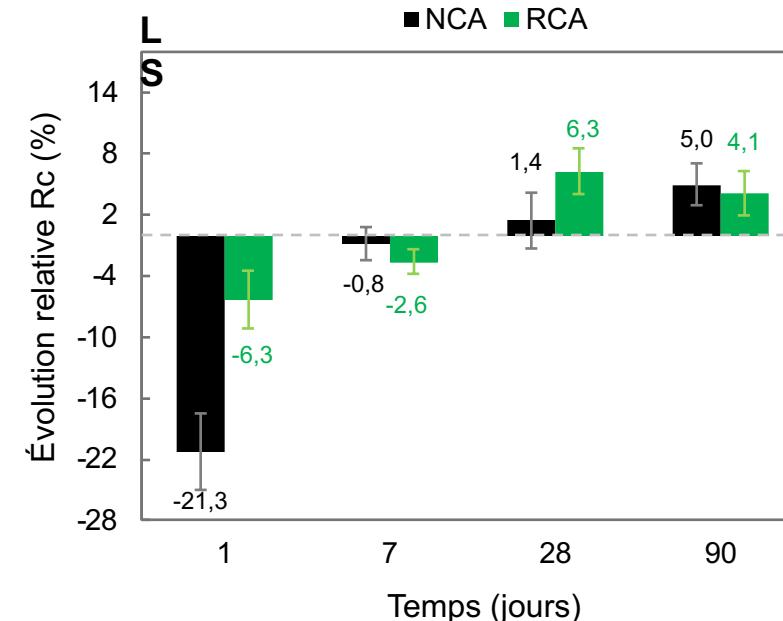
Résistance en compression

Durcissement standard

— LS-NCA ✕ LS-RCA • SSP-NCA ◆ SSP-RCA



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



résistance initiale < durcissement standard

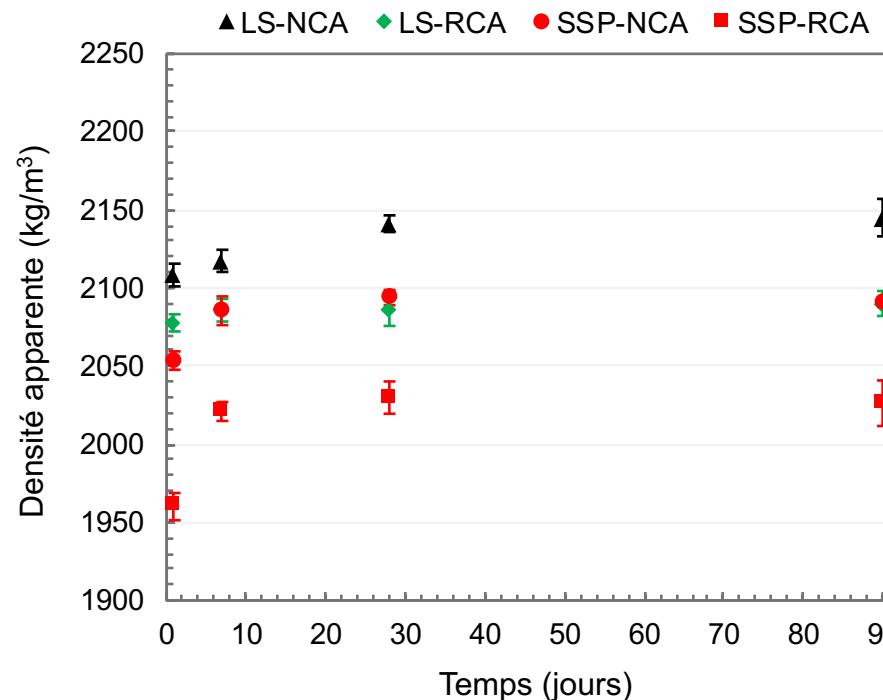


Long terme résistance en compression

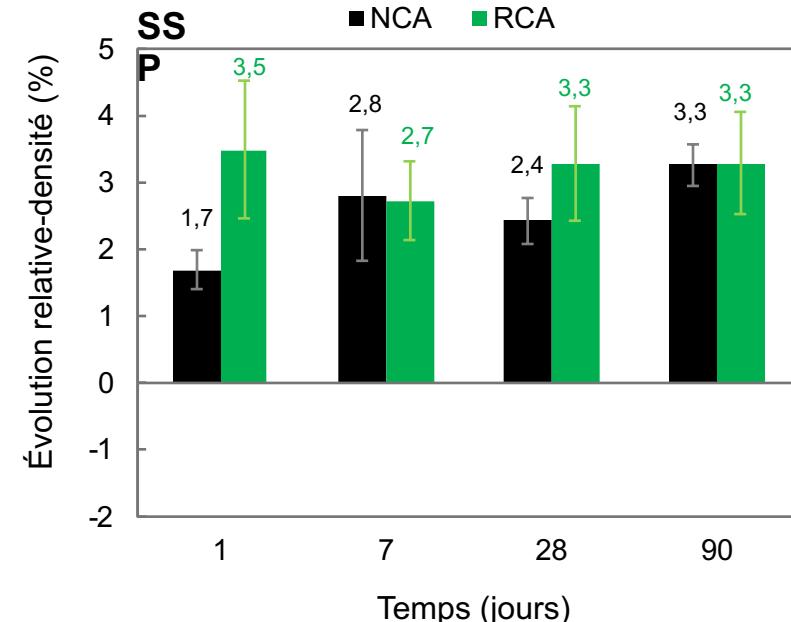
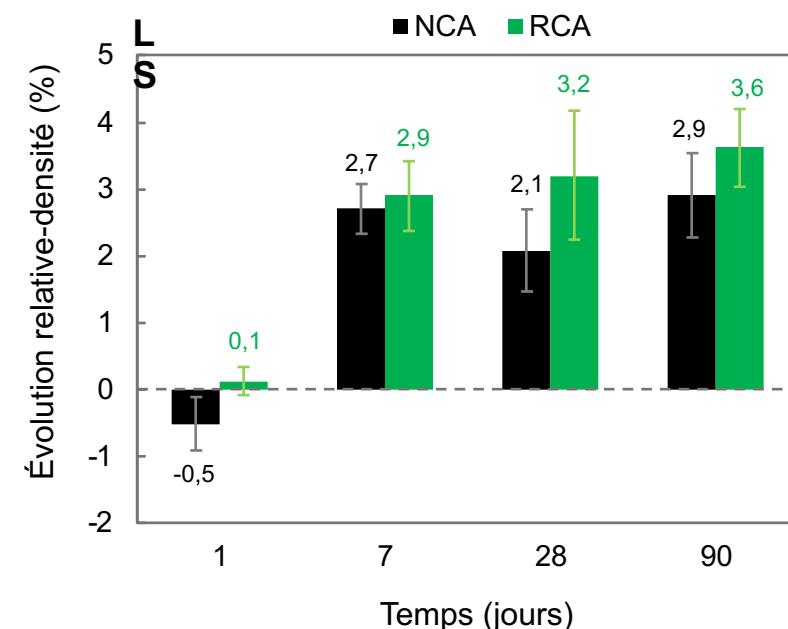
Carbonatation ou durcissement standard ?

Densité apparente

Durcissement standard



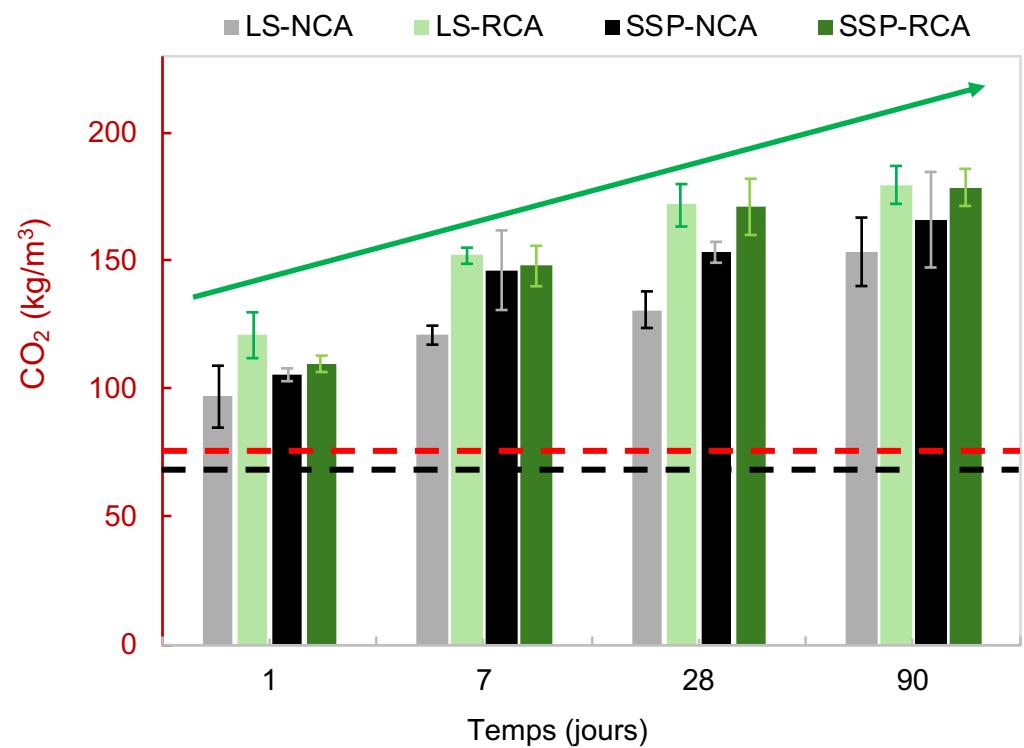
De l'état initial **standard** au durcissement par carbonatation



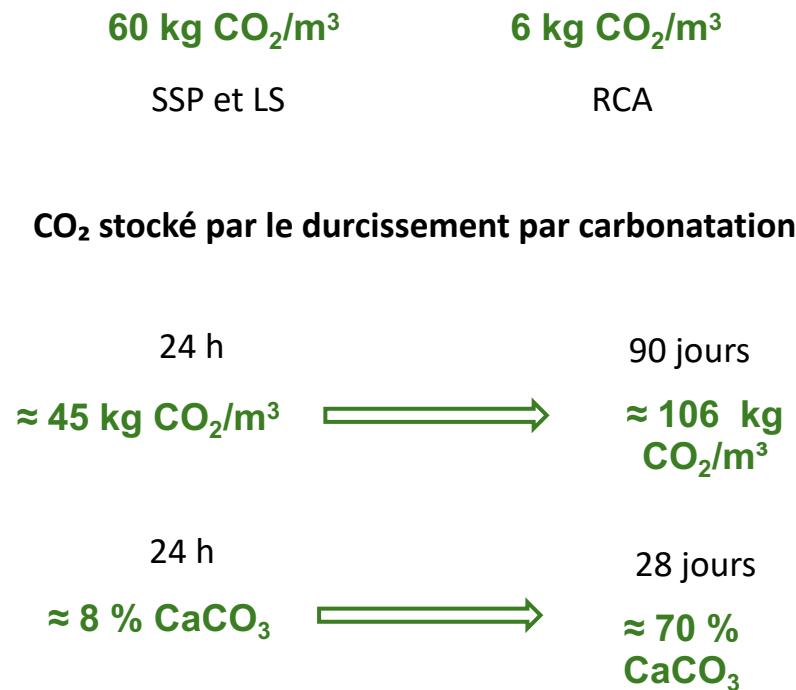
Le durcissement par carbonatation
améliore la densité apparente

Carbonatation ou durcissement standard

Méthode: Perte de masse



CO₂ séquestré par les précurseurs



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 contrôlants 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

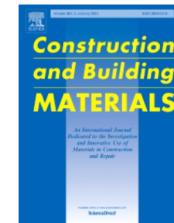
Développer un protocole standardisé de carbonatation

Nouveaux matériaux biosourcés

Publications et communications

Meriem GUESSOUUM, 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