



Institut Mines-Télécom



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

Thèse

pour le grade de Docteur

Ecole doctorale SP-SA
Spécialité Génie des Procédés

Formulation et étude des propriétés
mécaniques d'agrobétons légers isolants
à base de balles de riz et de chènevotte
pour l'éco-construction

Présentée par **Morgan CHABANNES**

Le 26 Novembre 2015

Équipe encadrante: Jean-Charles BÉNÉZET – Laurent CLERC – Eric GARCIA-DIAZ
C2MA - Centre des Matériaux des Mines d'Alès

Contexte de l'étude



330 kWh/m²/an

Parc résidentiel et tertiaire :

- 25% des émissions de gaz à effet de serre (GES)
- 43% des consommations énergétiques



Réduction de l'impact environnemental global

- Grenelle de l'Environnement (2009)
- Réglementation Thermique RT 2012



Existant



Neuf RT 2012



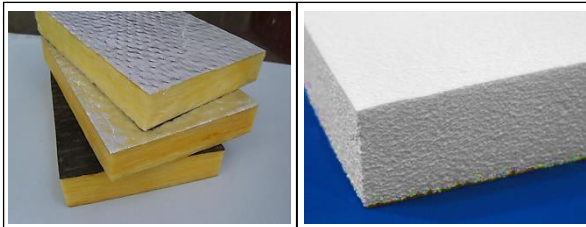
(Magniont, 2010 – Nozahic, 2012)

Contexte de l'étude

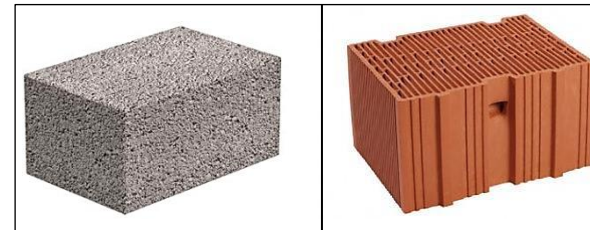
Impact environnemental :

- Performance énergétique durant le fonctionnement (chauffage et climatisation)

Isolants



Isolation répartie



- Impact carbone des matériaux de construction



Ecomatériaux de construction

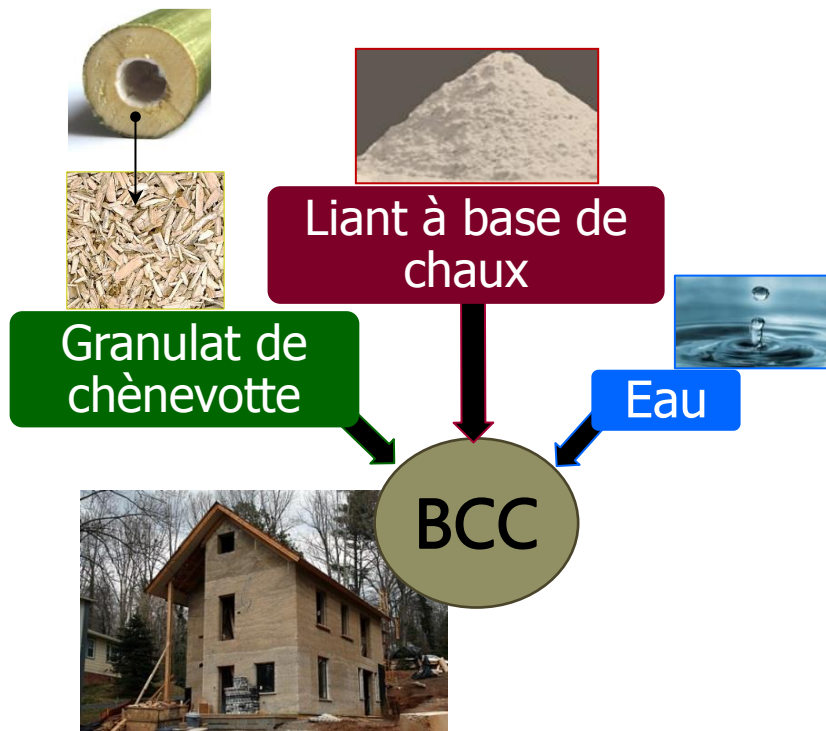


Agro-sourcés

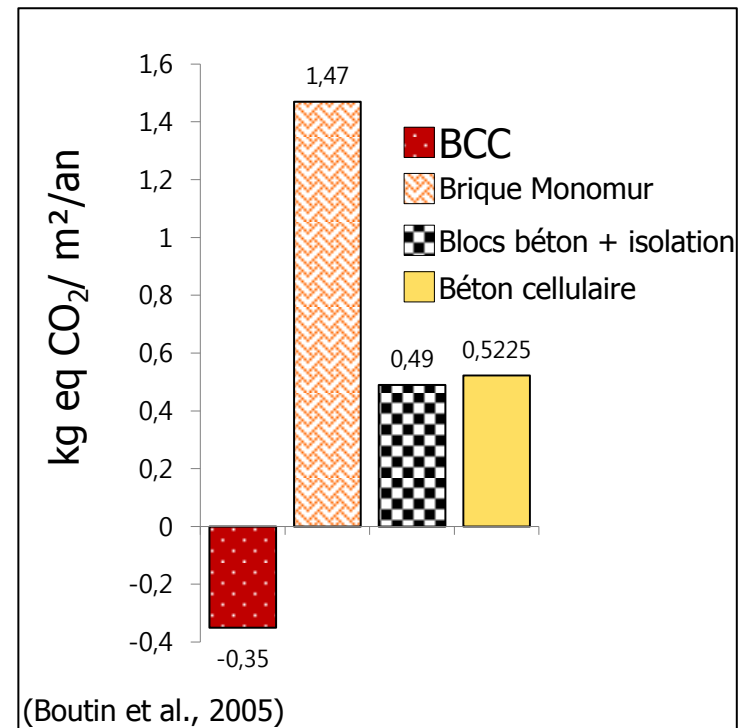
- Matières premières renouvelables et locales
- Faible énergie incorporée
- Faibles émissions de GES sur le cycle de vie
- Performances hygrothermiques

Contexte de l'étude

Bétons Chaux-Chanvre (BCC)



Analyse de Cycle de Vie (ACV)



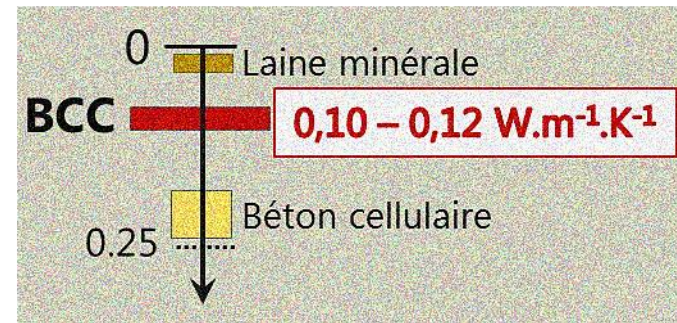
Contexte de l'étude



(Construire en Chanvre, 2012)

MUR

(Aigbomian & Fan, 2013 - Stazi et al., 2014)



Conductivité thermique λ (W.m⁻¹.K⁻¹)

- ◉ Isolant thermique ☺
- ◉ Régulateur hydrique (Collet & Pretot, 2012)

- ◉ Faible résistance mécanique ($R_{C-28j} \leq 0,5$ MPa) ☹ (Nozahic, 2012)

Objectifs et démarche méthodologique



CHAUX



→ BCC

→ Béton Chaux-Balles de riz = BCBR

Matériau innovant

①

Thèse

BCBR

Catégories	Isolant	Intermédiaire	Léger structurel
Densité apparente (kg.m ⁻³)	< 800	800 – 1500	1500 – 2000
R _C (MPa)	< 2	2 – 15	> 15

BCC

Littérature

Ciment Portland + Balles de riz + Granulats minéraux

(Sisman et al., 2011
Salas Serrano et al., 1985-1986)



C.B. Sisman, E. Gezer, I. Kocaman. Bulgarian journal of Agricultural Science, 2011
J. Salas, M. Alvarez, J. Veras. International journal of cement composites and lightweight concrete, 1896
J. Salas Serrano, J. Veras Castro. Informes de la Construcción, 1985

Objectifs et démarche méthodologique

② Améliorer les performances mécaniques des agrobétons

➔ $R_{C-28} \rightarrow 2-3 \text{ MPa}$ sans augmenter la conductivité thermique

(1)
Mise en œuvre
Compactage
(Nguyen, 2010)

(2)
Traitements de surface des
granulats végétaux
en vue d'améliorer l'interface liant/granulat
(Nozahic, 2012 – Khazma et al., 2008-2014 - Manh, 2014)

(3)
Modification de la
matrice minérale
Additions pouzzolaniques,
agents rétenteurs d'eau,
etc.)
(Magniont, 2010 – Manh, 2014 –
Nozahic, 2012 – Khazma 2008)

(4)
Conditions de cure
Humidité relative %HR
Température T°C
Taux de CO₂

➔ Très peu abordé
dans la littérature
(Arnaud & Gourlay, 2012)

T.T. Nguyen. Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne-Sud, 2010
M. Khazma et al. Industrial crops and products, 2011/Composites Part A, 2008
Dinh The Manh. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III, 2014
Arnaud & Gourlay. Construction and Building Materials, 2012

Objectifs et démarche méthodologique

Matériaux

➤ Granulats végétaux :



Chènevotte commerciale
(FRD, Troyes)



Balles de riz naturelles (Biosud, Arles)

→ Coque protectrice du grain de riz

- Ressource locale et disponible toute l'année
- Volumes importants dans les bassins rizicoles
- Valorisation négligeable (enfouie) ou non bénéfique d'un point de vue environnemental (calcinée)

Objectifs et démarche méthodologique

➤ Liant minéral:

Mélange 50/50 (% massique):

- Chaux hydraulique NHL3.5
- Chaux aérienne CL90-S

➔ Composition minéralogique:

% $\text{Ca}(\text{OH})_2$	% C_2S	% CaCO_3
65	≈ 15	10

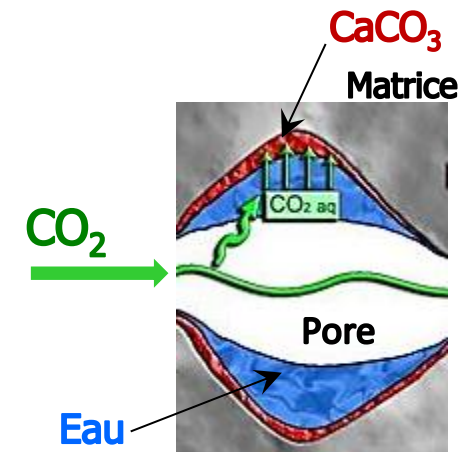
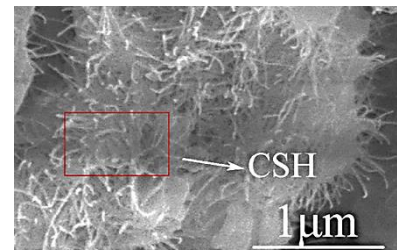
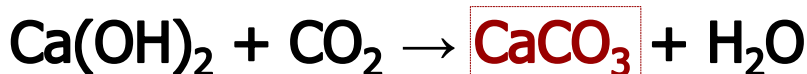
% massique

➔ Processus de durcissement:

Hydratation



Carbonatation



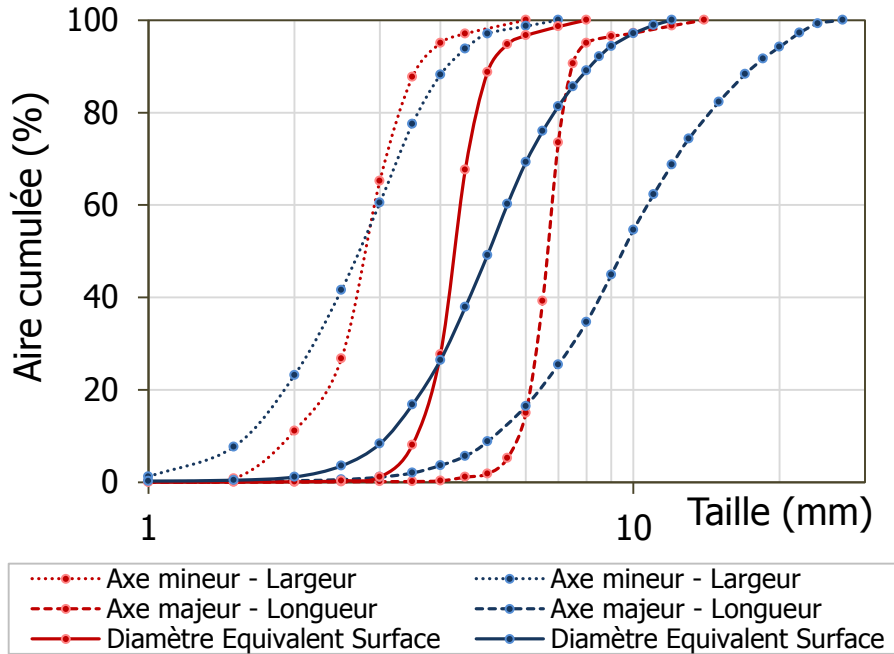
Sommaire

1. De la caractérisation des particules végétales à la formulation des agrobétons
2. Propriétés thermiques et mécaniques en conditions standards
3. Caractérisation du durcissement et des performances mécaniques en fonction des conditions de cure

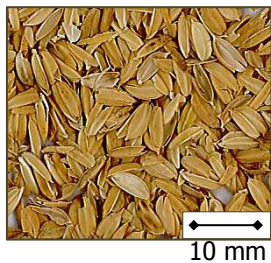
Conclusion générale

Perspectives

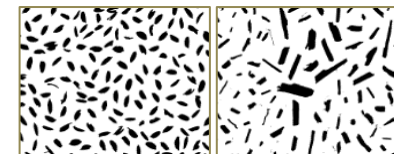
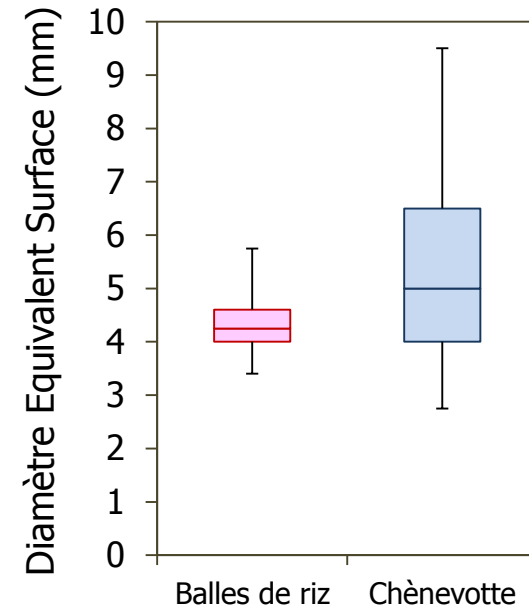
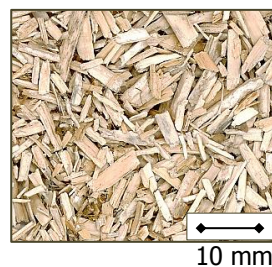
Distribution granulométrique par analyse d'image



Balles de riz



Chènevotte



Porosités

Propriétés physiques	Balle de riz	Chènevotte
Masse volumique en vrac sèche (kg.m ⁻³)	103,2 ± 5,4	103,5 ± 4
Masse volumique apparente d'une particule (kg.m ⁻³)	453	256
Masse volumique absolue (phase solide) (kg.m ⁻³)	690	1465
Porosité inter-granulaire du mélange η_{inter} (%)	78	60
Porosité intra-granulaire ouverte η_o (%)*	34	83

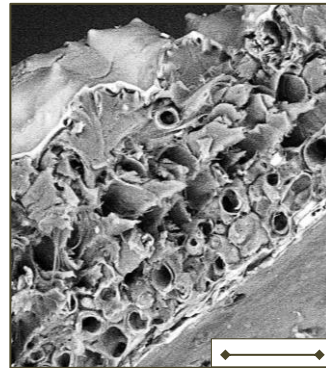
(Nguyen et al., 2010
 – Salas Serrano & Veras Castro, 1985
 – González de la Cotera, 1982)

→ $\eta_{inter} = 1 - \text{vrac/apparente}$

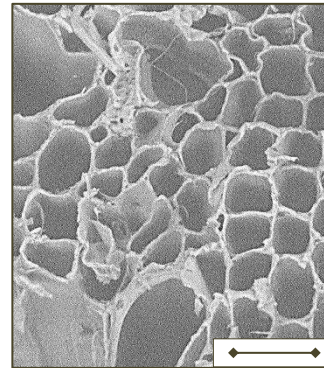
→ $\eta_o = 1 - \text{apparente/absolue}$

*des particules isolées

➤ MEB

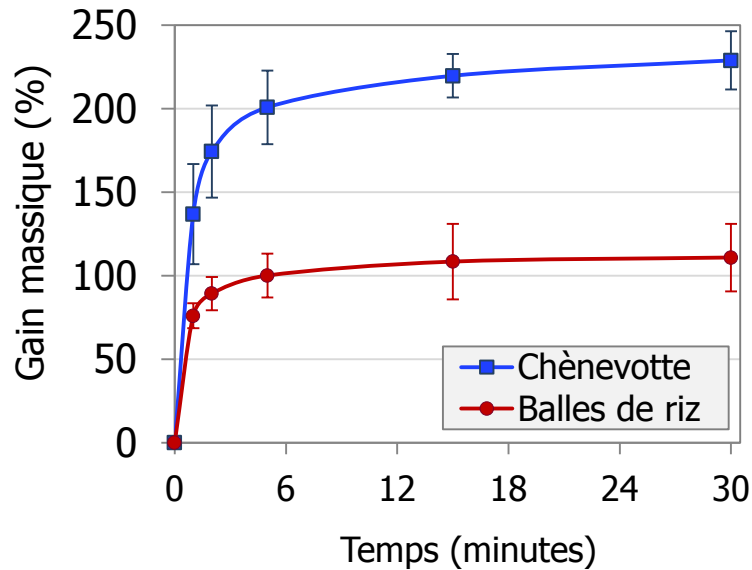


Balle de riz



Chènevotte

➤ Test d'absorption par immersion-centrifugation



Taux d'absorption d'eau après 5 minutes :

Balles de riz : 100%

Chènevotte : 200%

Eau de prémouillage

- Prémouillage des granulats
- Ajout du liant à base de chaux
- Ajout de l'eau de gâchage

➤ Dosages en eau

$$\text{BCBR} : E = E_p + E_G = 1 \times G + 0,5 \times L$$

$$\text{BCC} : E = E_p + E_G = 2 \times G + 0,5 \times L$$

E_p = Eau de prémouillage

E_G = Eau de gâchage

G = Granulats

L = Liant

Test d'absorption $E_G/L = 0,5$ (Nozahic, 2012)

➤ Ratios massiques et densités visées

	L/G	E/L	Densité à l'état frais (kg.m ⁻³)	Densité après stabilisation 20°C - 50%HR (kg.m ⁻³)
BCBR	1,5	1,17	800	509 ± 6
	2	1	980	637 ± 2
	2,5	0,9	1125	734 ± 12
BCC	1,5	1,83	705	364 ± 5
	2	1,5	860	459 ± 5
	2,5	1,3	1055	600 ± 14



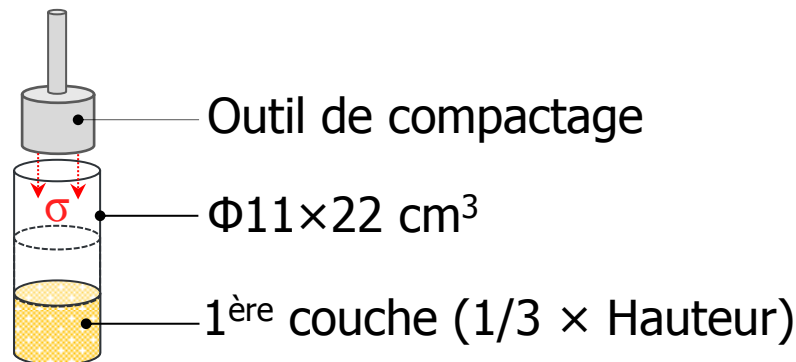
BCBR



L/G = 2

BCC

➤ Mise en œuvre



Bilan

Granulat



Formulation de l'agrobéton

Balles de riz



BCBR

Par rapport à la chènevotte:

- Granulométrie quasi-monodisperse
 - Morphologie particulière en demi-coque
 - Masse volumique apparente plus élevée
- ↳ Porosité inter-granulaire favorisée

Par rapport au BCC:

Densité visée plus forte à L/G donné de façon à limiter la macroporosité

- assurer une tenue mécanique
- rester $< 800 \text{ kg.m}^{-3}$

- Porosité intra-particule plus faible
- Absorption d'eau nettement plus limitée

Ratio E/L plus faible

Sommaire

1. De la caractérisation des particules végétales à la formulation des agrobétons

2. Propriétés thermiques et mécaniques en conditions standards

3. Caractérisation du durcissement et des performances mécaniques en fonction des conditions de cure

Conclusion générale

Perspectives

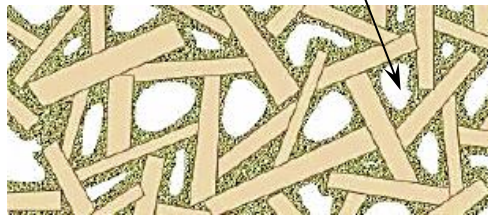
Estimation des porosités

Liant	ρ_{ABS} (kg.m ⁻³)	ρ_{APP} (kg.m ⁻³)
NHL3.5/CL90-S	2610	840,3 ± 31,8

(Nozahic, 2012
Grilo et al.,2014)

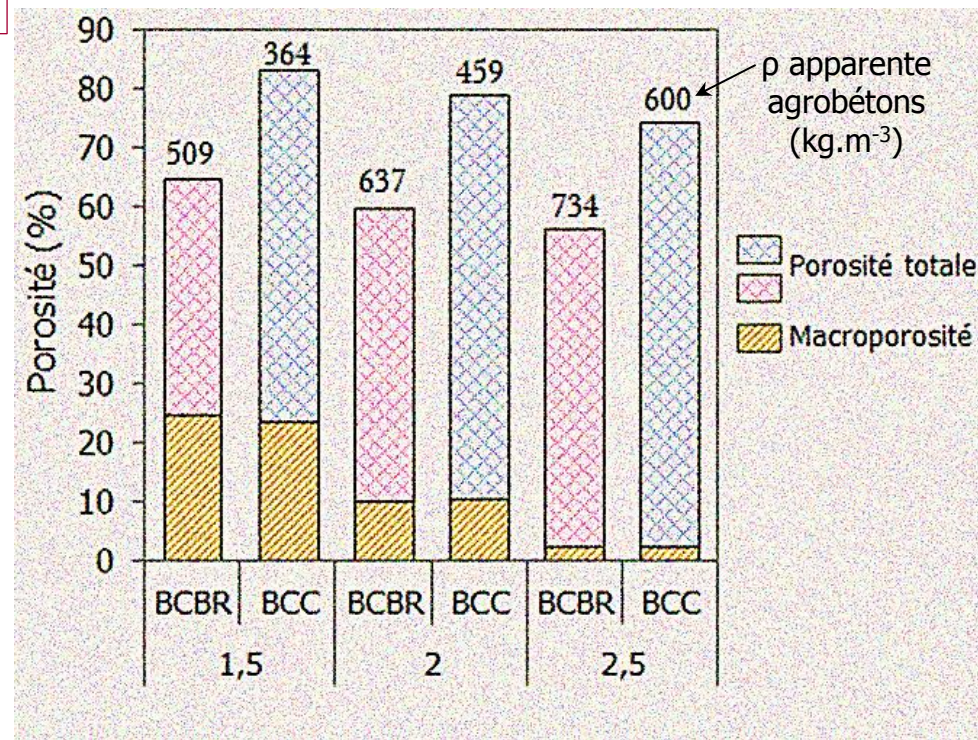
+ ρ_{ABS} et ρ_{APP} des granulats végétaux

Porosité totale Macroporosité



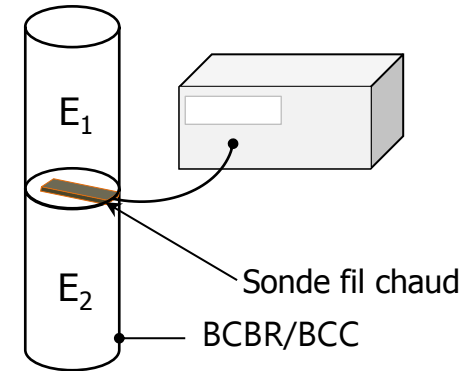
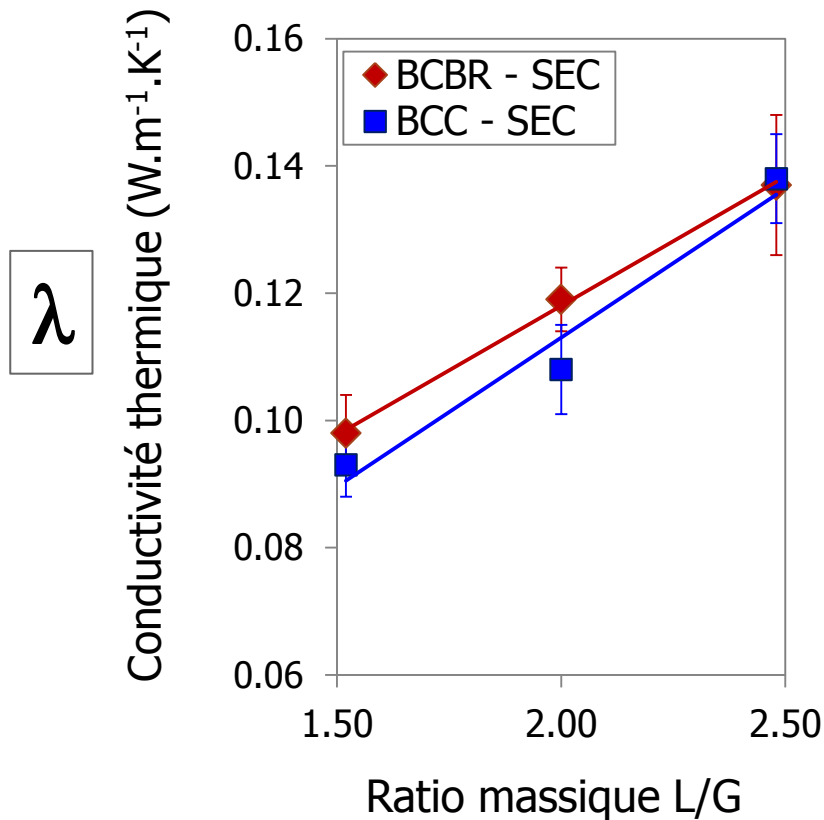
Porosité totale:

- Intra-granulat
- Intra-liant
- Inter-granulat (macroporosité)



Conductivité thermique par la méthode du fil chaud

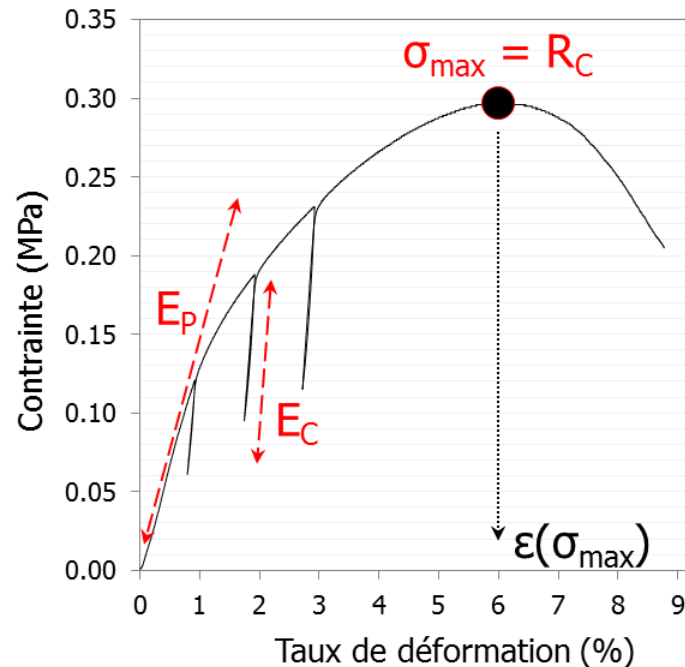
- Stabilisation hydrique des éprouvettes à 20°C et 50%HR
- Étuvage des éprouvettes à 60°C pendant 48 heures



$\lambda_{\text{BCBR}} \approx \lambda_{\text{BCC}}$
 à L/G égal

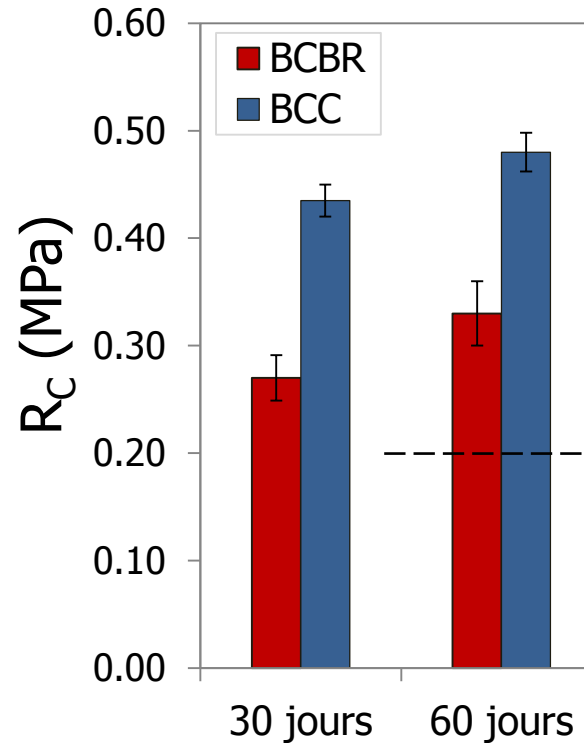
Caractéristiques mécaniques en compression

Essais de compression:



E_p : Module apparent
 E_c : Module élastique

(Chamoin, 2013)



- **L/G = 2**
- 20°C – 50%HR

Module	BCBR	BCC
E_p (MPa)	17 ± 4	27 ± 1
E_c (MPa)	50 ± 5	73 ± 3

CenC MUR

60jours
20°C–50%HR

	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) en condition standard	>15 MPa	>0,2 MPa

Bilan

Mur L/G = 2	BCC	BCBR
$\rho_{(20^{\circ}\text{C} - 50\%\text{HR})} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	459 ± 5	637 ± 2
$\lambda \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$	$0,108 \pm 0,007$	$0,119 \pm 0,005$
$R_{C-60j} \text{ (MPa)}$	$0,48 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,03$

Interface liant/granulats



Durcissement du liant



Sommaire

1. De la caractérisation des particules végétales à la formulation des agrobétons
2. Propriétés thermiques et mécaniques en conditions standards
- 3. Caractérisation du durcissement et des performances mécaniques en fonction des conditions de cure**

Conclusion générale

Perspectives

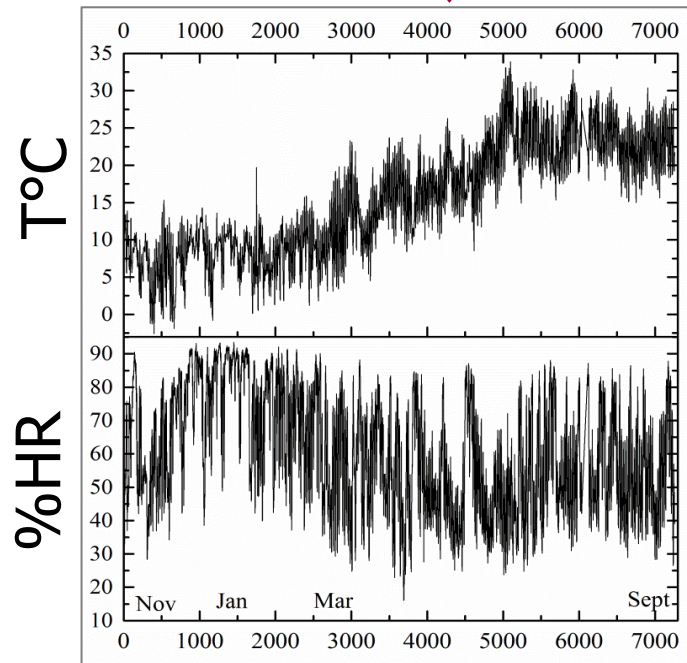
Formulation étudiée



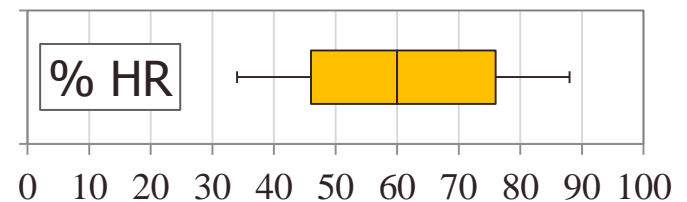
Agrobéton	L/G	E/L	L	G	E	Densité fraiche
	MUR					kg.m ⁻³
BCBR	2	1	395	195	390	980
BCC	2	1,5	285	145	430	860

① Carbonatation naturelle - 10 mois

- **ISC:** Indoor Standard Conditions: 20°C – 50%HR
- **OC:** Outdoor exposure Conditions

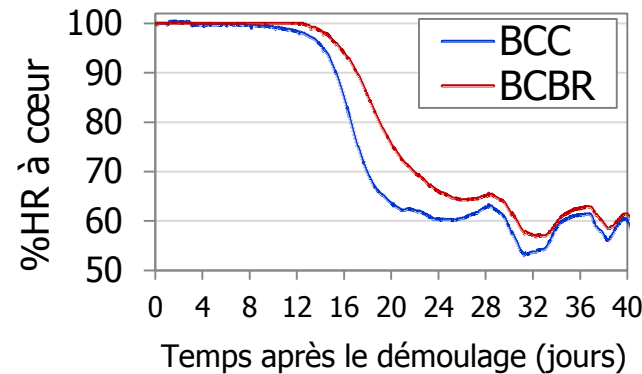


OC:



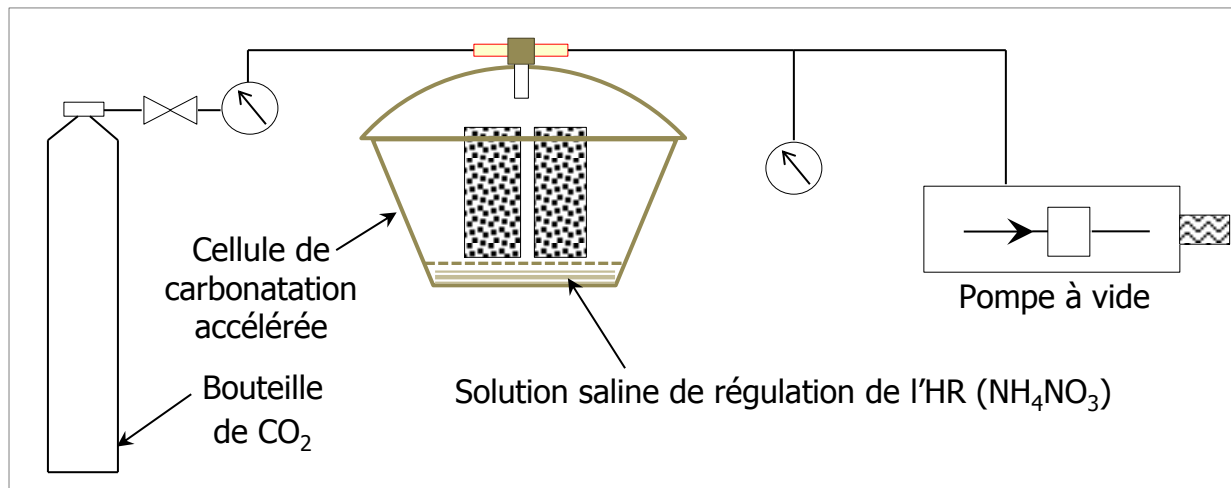
② Carbonatation accélérée (ACC)

- Préconditionnement
40 jours à 20°C – 50%HR



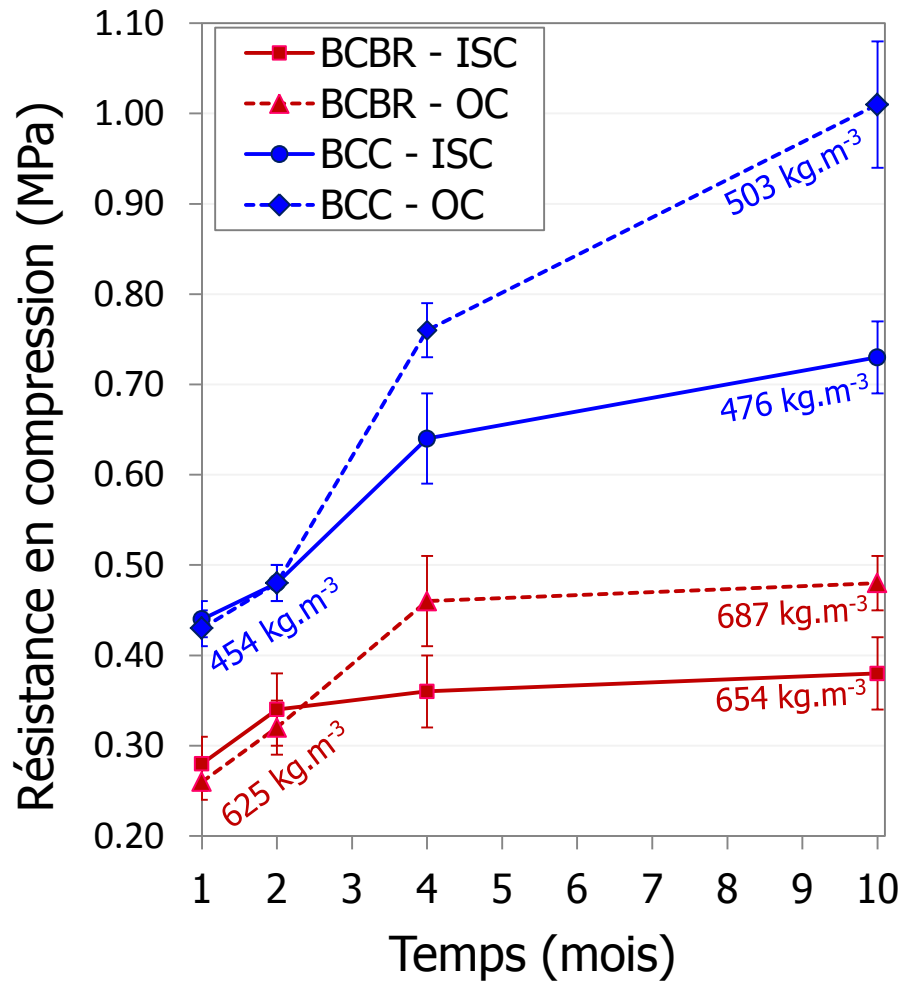
➔ HR = 60 ± 5%

- Cure accélérée durant 30 jours



- [CO₂] = 50%
- 20 ± 2°C
- 65 ± 5%HR

Carbonatation naturelle



→ $R_{C-BCBR} < R_{C-BCC}$

→ **BCBR**: Effet **PLAFOND**

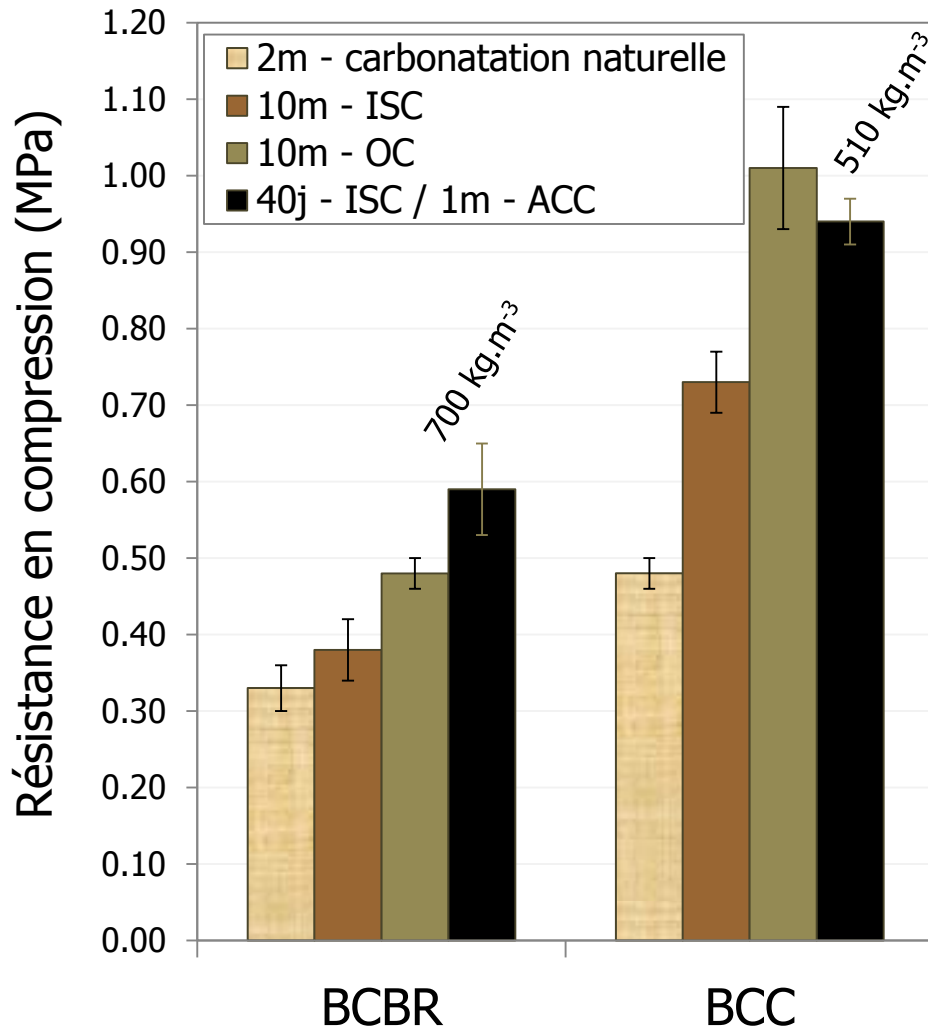
BCC > BCBR:

- Cinétique de durcissement
- Liaison mécanique liant/granulat

→ **Gain de R_c** plus significatif à l'extérieur après 2 mois

OC > ISC: Cinétique de durcissement

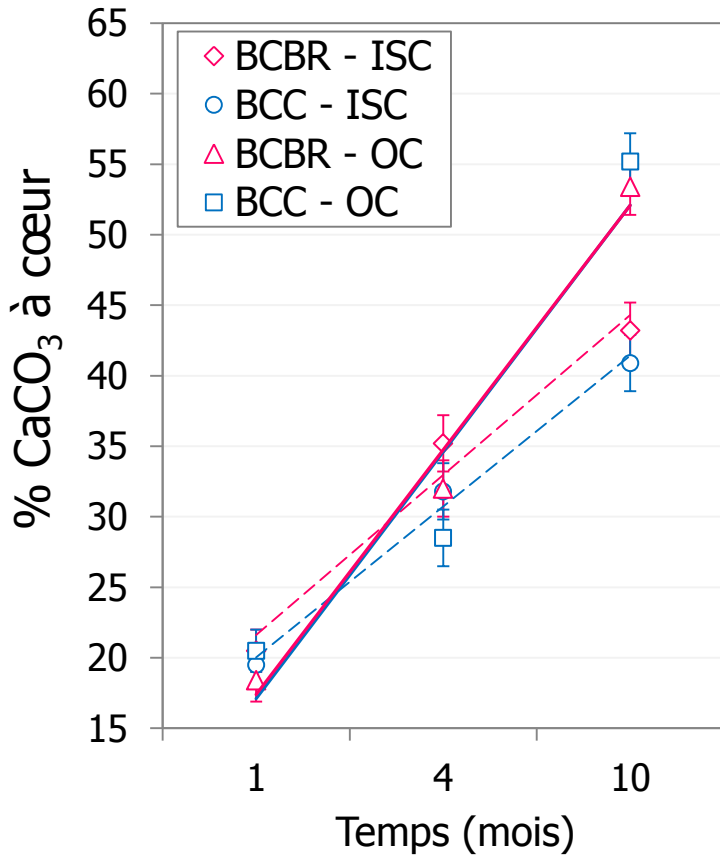
Carbonatation accélérée



$$\rightarrow R_{C-ACC} \approx R_{C-10m-OC}$$

Taux de carbonatation

ATG:



Cure	Temps	Béton	TC (%)
ISC	10m	BCBR	42.6
		BCC	39.6
OC	10m	BCBR	55.6
		BCC	57.9

Carbonatation naturelle:
 $TC_{BCBR} \approx TC_{BCC}$

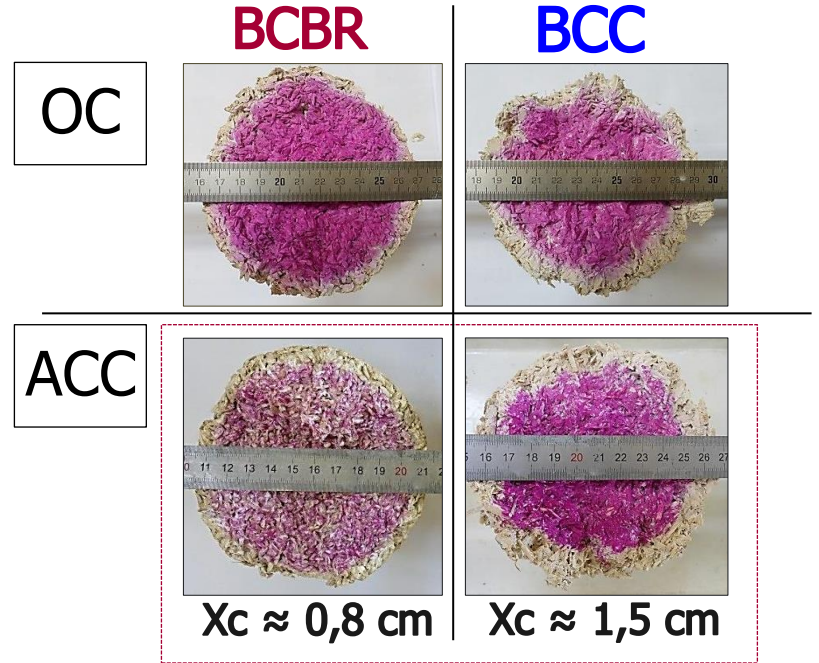
Taux de carbonatation

TC(%):

Cure	Temps	Béton	ΔM	ATG
ISC	10m	BCBR	32.5	42.6
		BCC	33.6	39.6
OC	10m	BCBR	—	55.6
		BCC	—	57.9
ACC	—	BCBR	72.1	80.4
		BCC	71.5	67.3

TC global
BCBR \approx BCC

TC à cœur



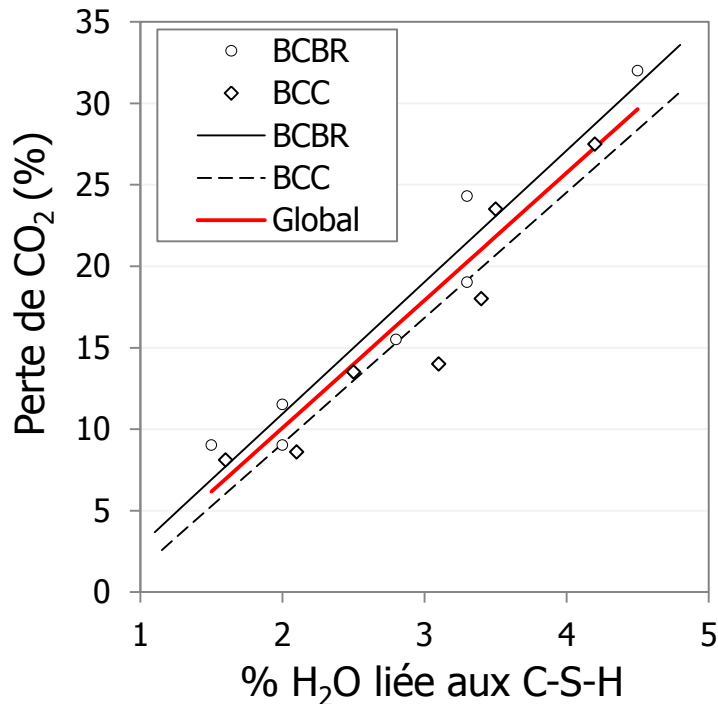
Carbonatation diffuse

Réactivité locale du CO₂

L	G	E
		kg.m ⁻³
395	195	390
285	145	430

Hydratation

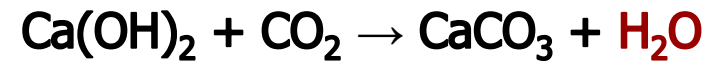
ATG → Perte d'eau liée aux C-S-H (LH_2O) entre 100°C et 400°C (Xu et al., 2014)



→ LH_2O : BCBR \approx BCC

→ Hydratation ↔ Carbonatation

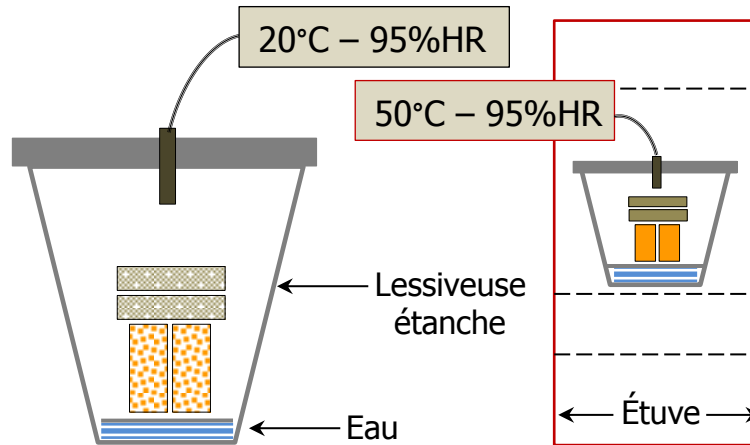
→ Hydratation des C_2S favorisée par l'eau relarguée localement lors de la réaction de carbonatation



→ Mauvaise hydratation des C_2S pour $\text{HR} < 75\%$

↓
CURE

③ Cure en humidité saturée (>95%HR) et à 50°C



ISC: Indoor Standard Conditions
 MC: Moist curing
 TA: Thermal activation

	Age (jours)	1	7	21	28	
Conditions de cure	28d-ISC	20°C – 50%HR				R _C
	7d-MC	20°C – 95%HR	20°C – 50%HR			
	7d-TA	50°C – 95%HR	20°C – 50%HR			
	21d-MC	20°C – 95%HR			20°C – 50%HR	

Formulations étudiées

- Mortiers de chaux normalisés (NF EN 459-1)

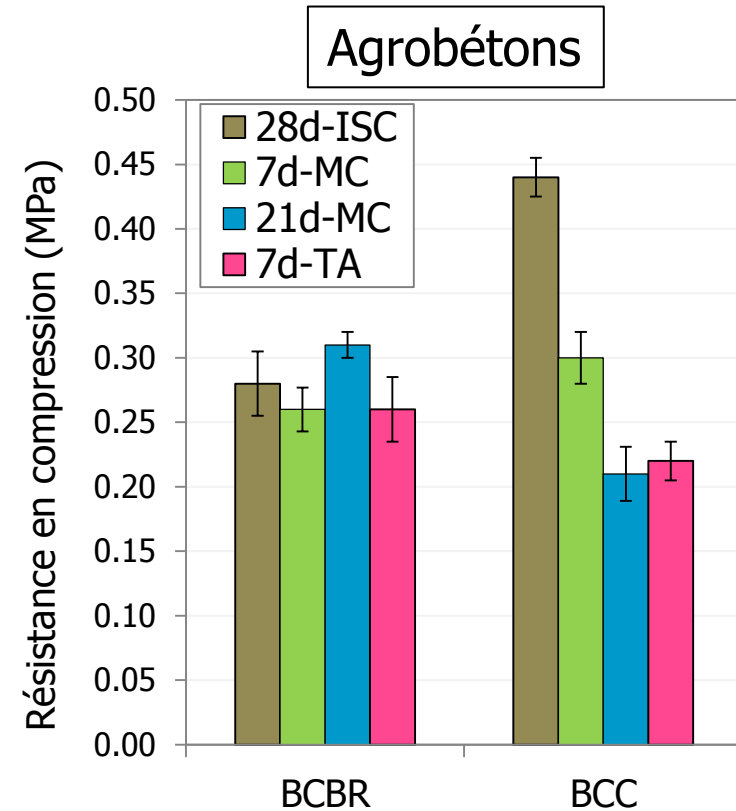
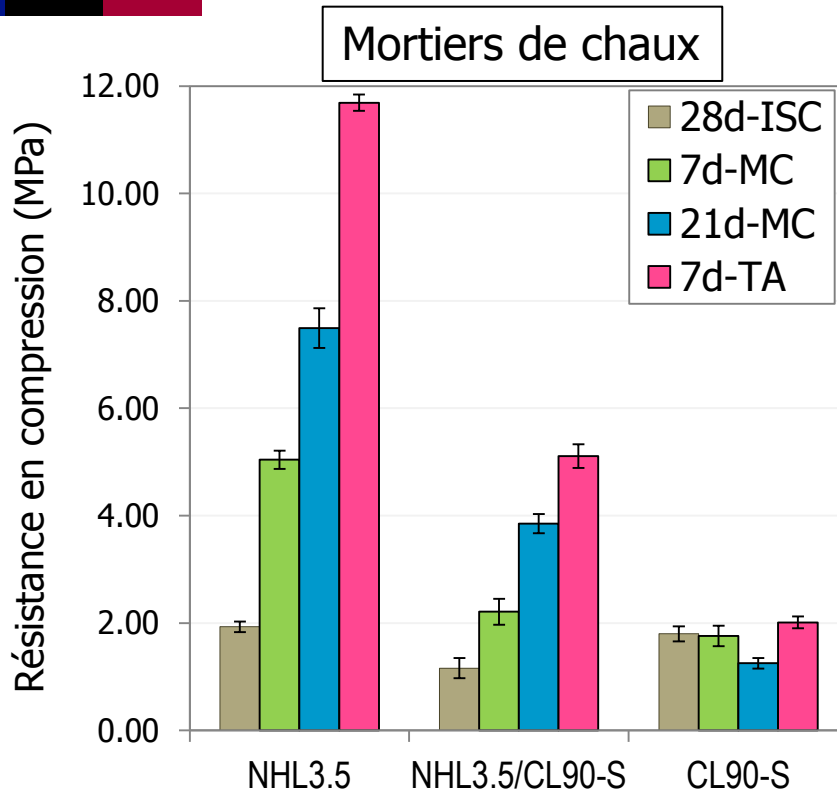


Mortier	Ratios massiques	
	Sable/Chaux	E/L
NHL3.5	2,75	0,56
NHL3.5/CL90-S		0,62
CL90-S		0,71

- Agrobétons



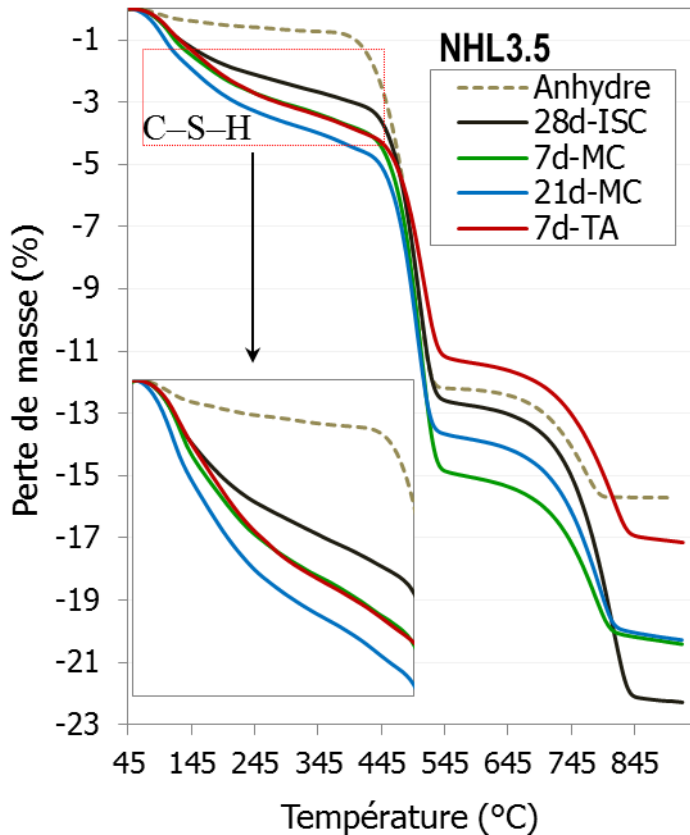
Béton	L/G	E/L	L	G	E
			kg.m ⁻³		
BCBR	2	1	395	195	390
BCC	2	1,5	285	145	430



Age (jours)	1	7	21	28	
28d-ISC	20°C – 50%HR				R _c
7d-MC	20°C – 95%HR		20°C – 50%HR		
7d-TA	50°C – 95%HR		20°C – 50%HR		
21d-MC	20°C – 95%HR			20°C – 50%HR	

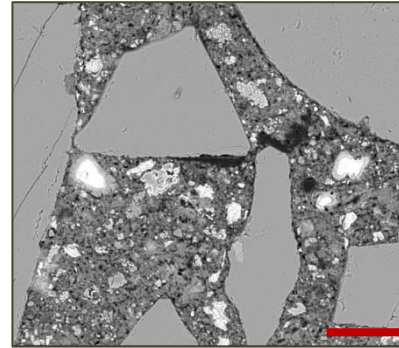
Mortiers de chaux

ATG:



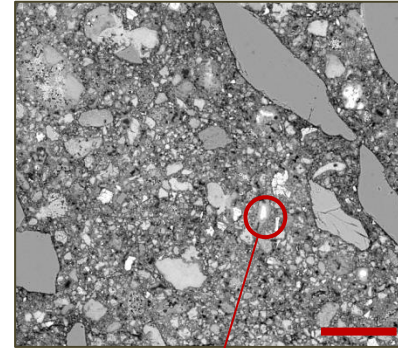
Sections polies au MEB en mode BSE:

28d-ISC

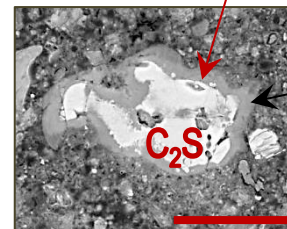


100 µm

7d-TA



100 µm

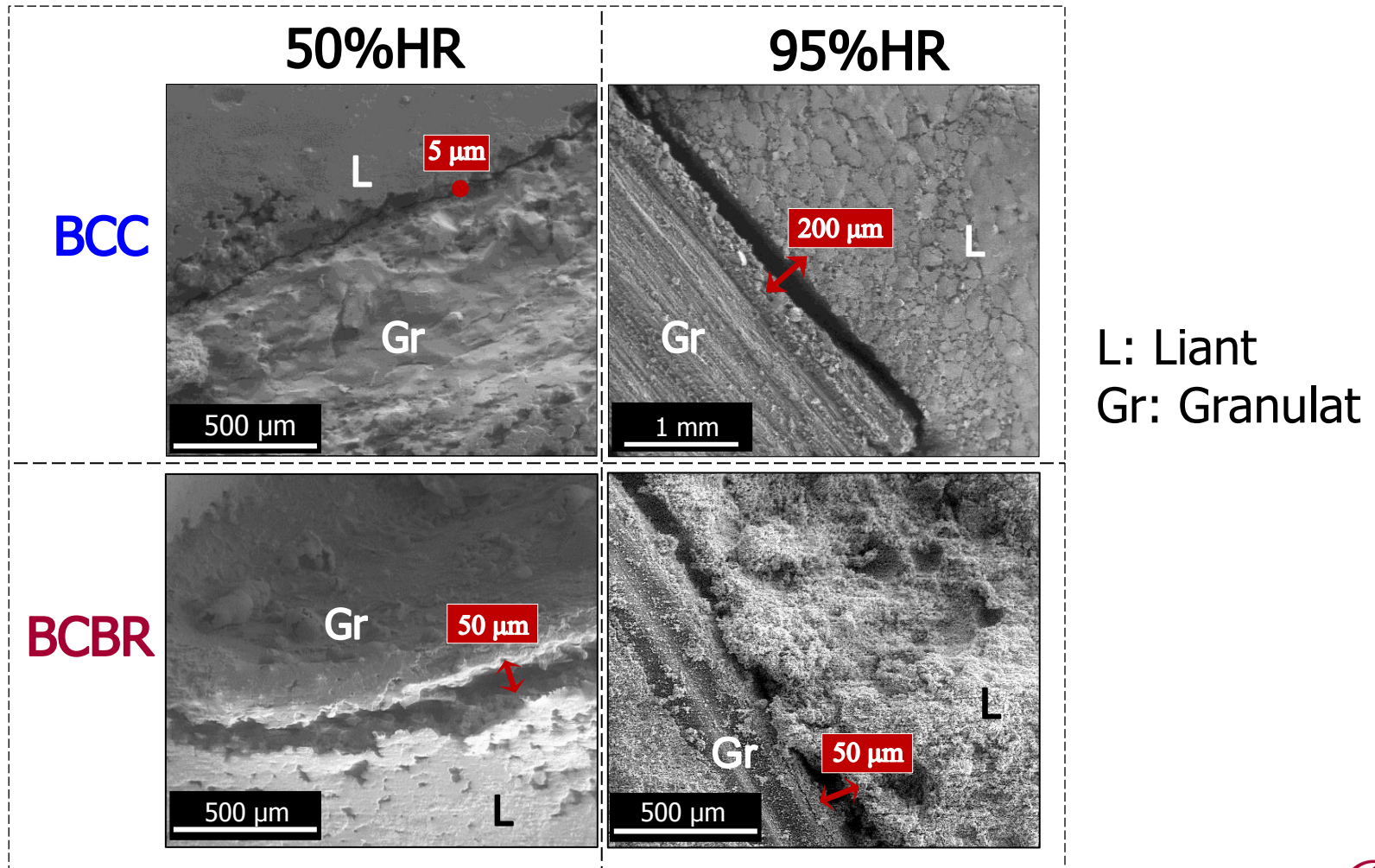


20 µm

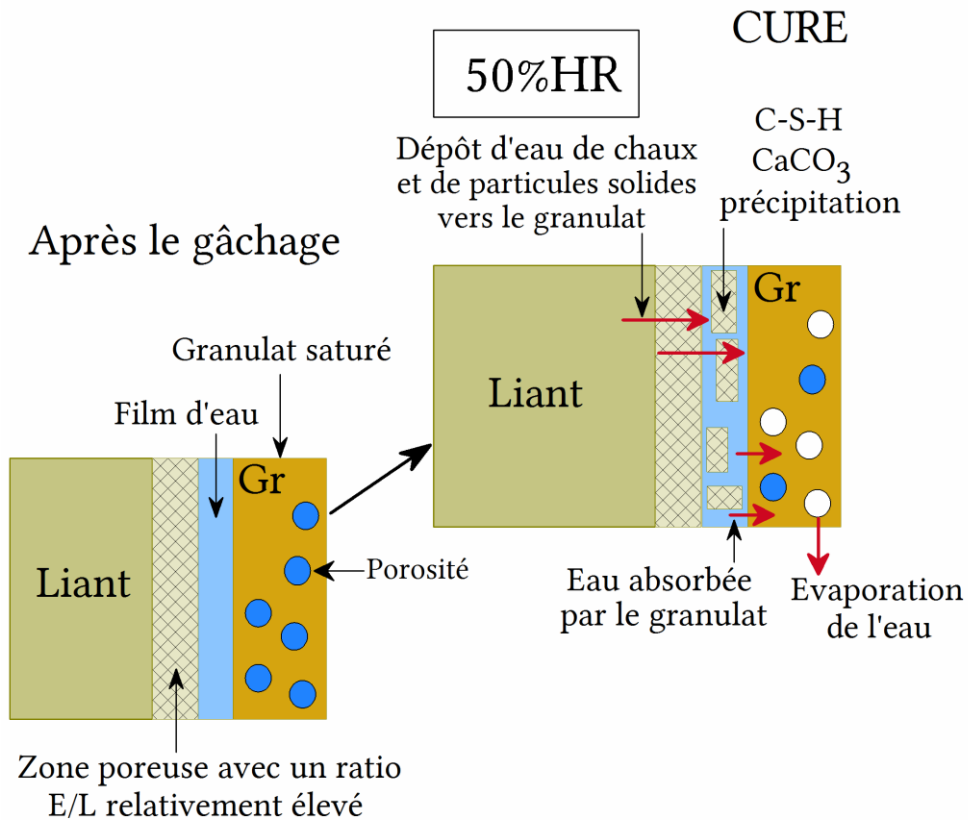
C-S-H

C₂S

Interface par MEB



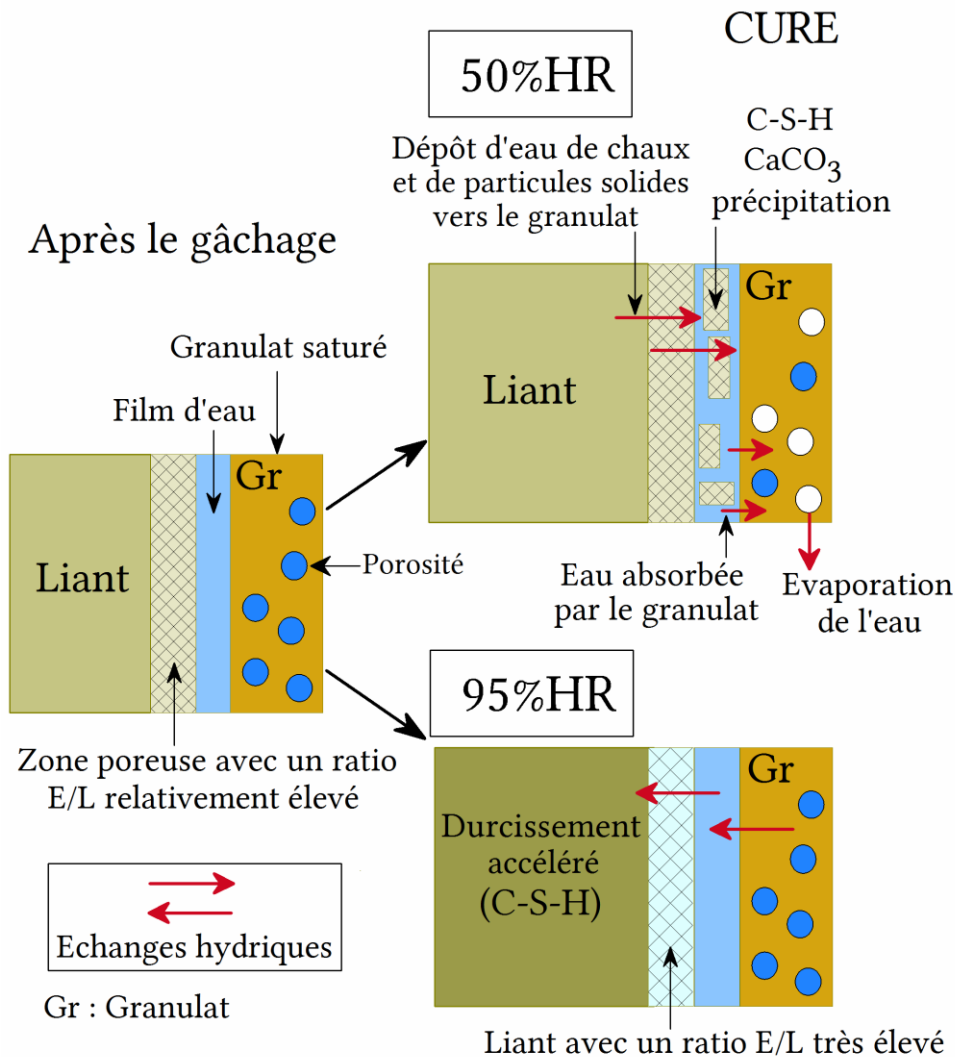
Proposition d'un mécanisme



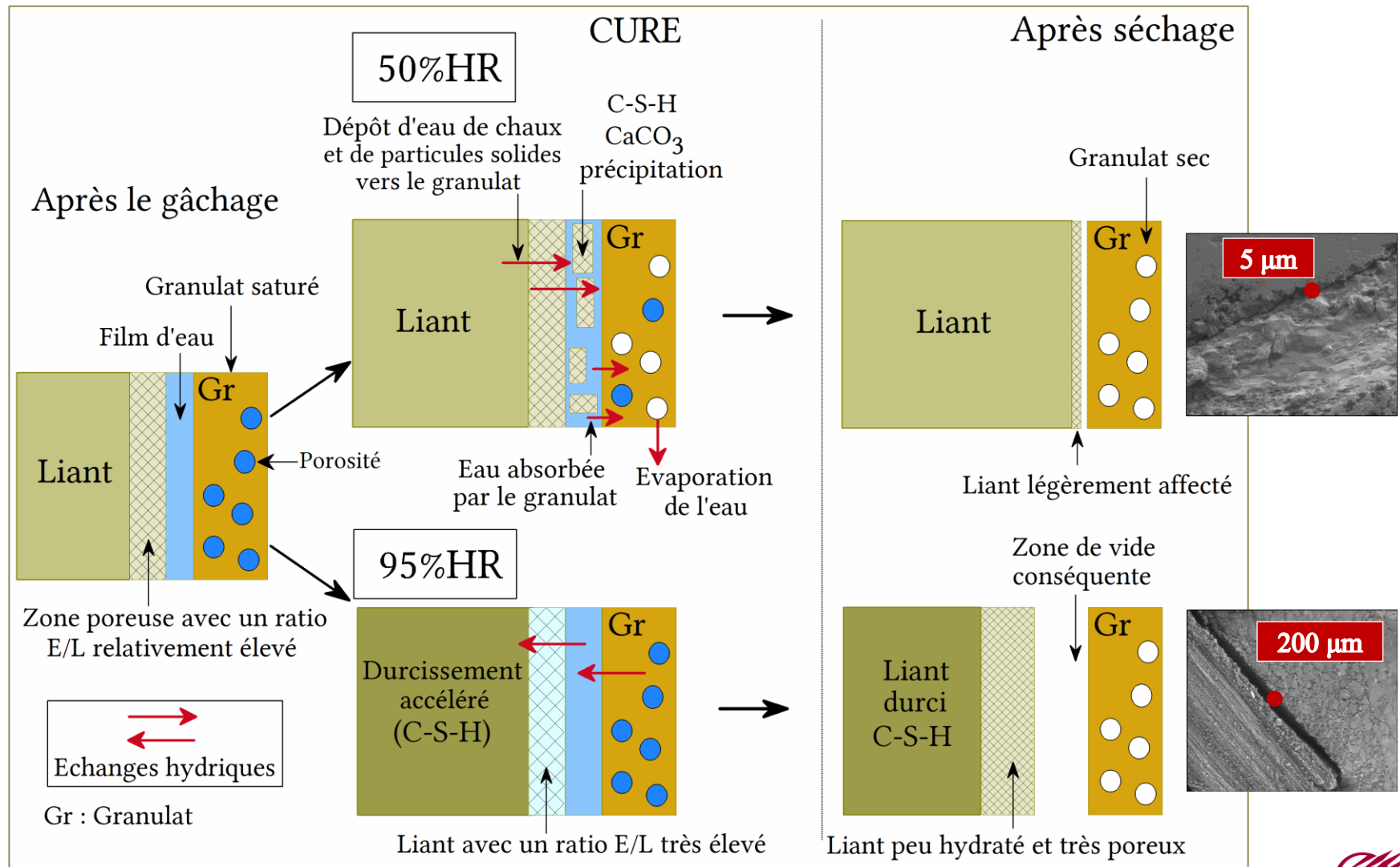
⇌
Echanges hydriques

Gr : Granulat

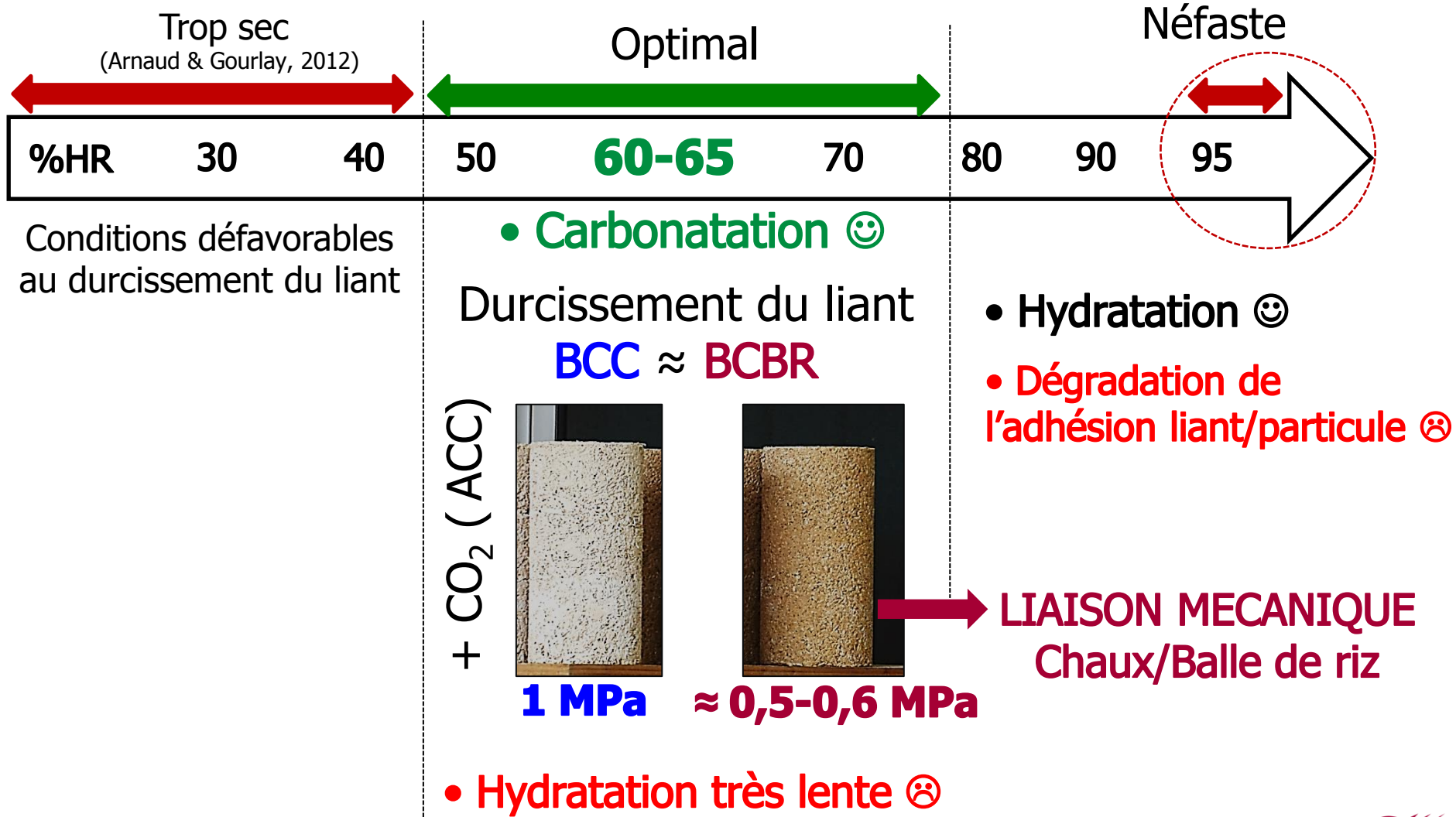
Proposition d'un mécanisme



Proposition d'un mécanisme



Bilan



Conclusion générale

Faisabilité du béton chaux/balles de riz



Broyage 😊

+

CL90-S/NHL3.5



BCC



BCBR

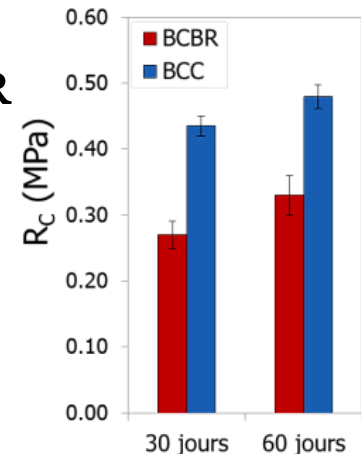
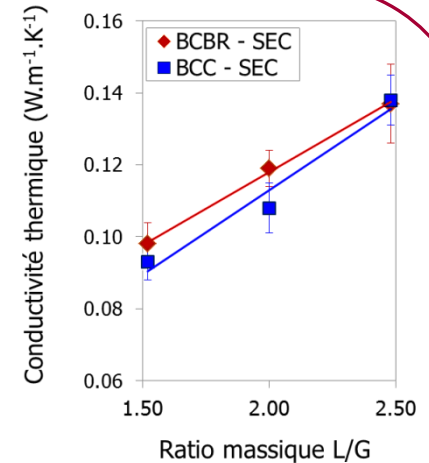


$\rho < 800 \text{ kg.m}^{-3}$

$$\lambda_{\text{BCBR}} \approx \lambda_{\text{BCC}}$$

R_C 20°C-50%HR

CenC



Conclusion générale

Conditions de cure

Au jeune âge:

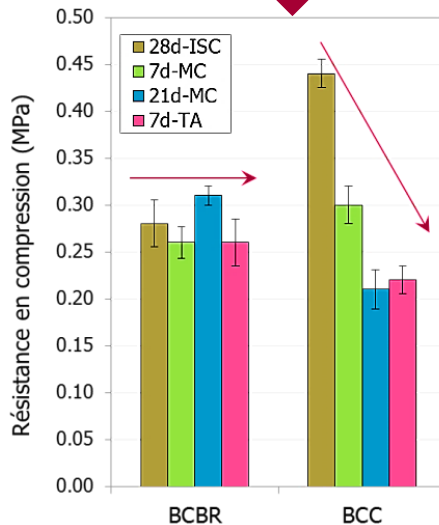
Hydratation: **HR > 95%**

+T°C > 20°C

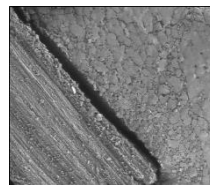
= Durcissement 😊

LIANT CHAUX

AGROBETONS



Interface



Cure naturelle:

Carbonatation

Optimal



%HR

50

60-65

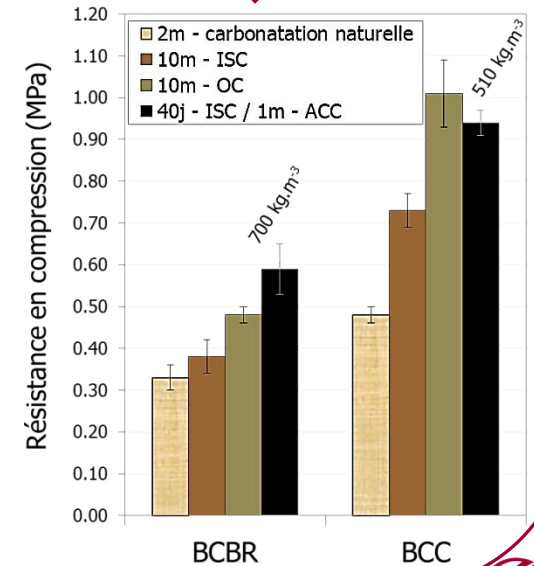
70

Carbonatation

Accélérée:

65%HR

50%CO₂



Perspectives

Axes de recherche:

- Pré-traitement des balles → Liaison mécanique liant/particule
- Propriétés mécaniques au jeune âge en jouant sur la nature du liant et les conditions de cure

→ Traitement **EAU DE CHAUX**

+ cure de l'agrobéton en cellule de **carbonatation accélérée**

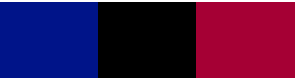
→ $R_c \text{ BCC} \approx R_c \text{ BCBR} \approx 1 \text{ MPa}$? → **PRÉFABRICATION**

→ Ex: Ajout de ciment prompt

Liants à base de sulfate de calcium (Pretot et al., 2015)

Additions pouzzolaniques, etc.

- Confort hygrothermique et acoustique



Merci pour votre attention