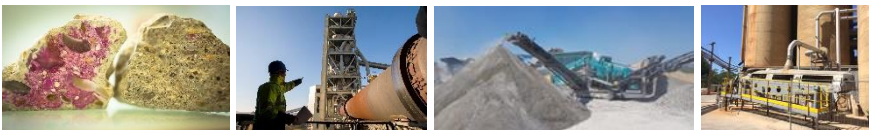
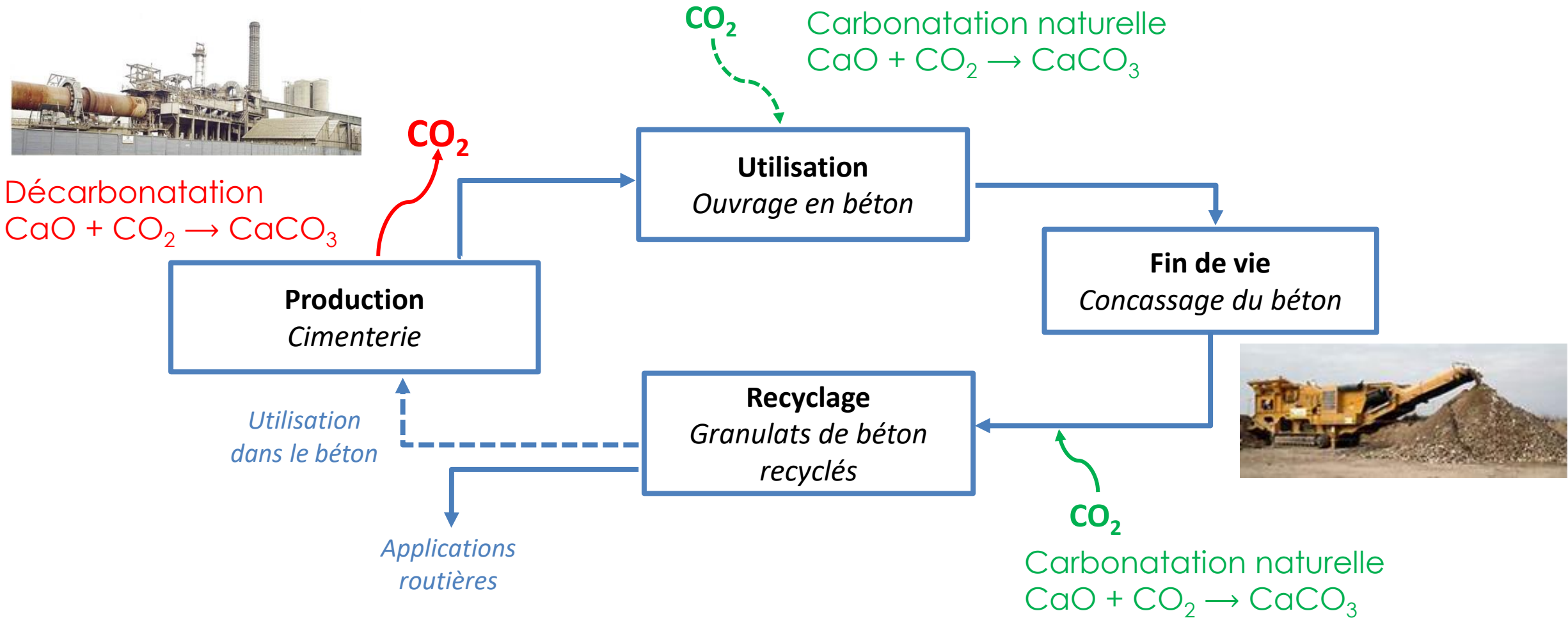


# Modélisation de la carbonatation naturelle du béton

[www.fastcarb.fr](http://www.fastcarb.fr)

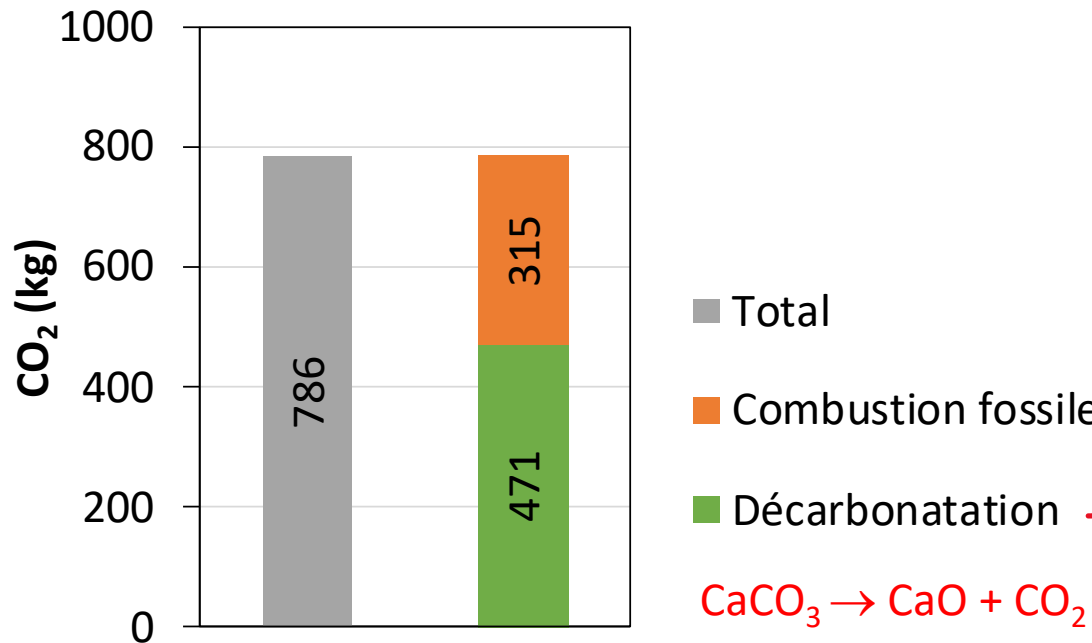
*Philippe TURCRY (LaSIE, La Rochelle Université, CNRS)  
Jonathan MAI-NHU (Cerib)*

► Echanges de CO<sub>2</sub> pendant le cycle de vie du béton



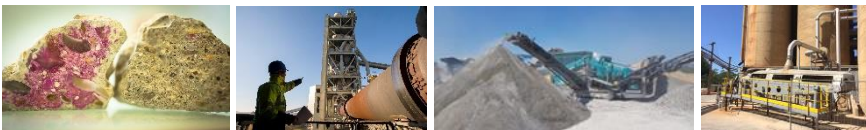
## ► Potentiel et taux de fixation du CO<sub>2</sub>

- Emissions de CO<sub>2</sub> pour 1 kg de clinker (SFIC, 2018)



- Capacité maximale de fixation du CO<sub>2</sub> par carbonatation :  
~ 471 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de clinker
- Définition d'un taux de fixation :  
 masse de CO<sub>2</sub> fixé par carbonatation /  
 masse de CO<sub>2</sub> émis par décarbonatation

*(définition pour les ciments Portland)*



## ► Comment modéliser la fixation du CO<sub>2</sub> par l'ouvrage?

- Modèle « ingénieur » : Norme EN 16757

Masse de CO<sub>2</sub> fixé (kg<sub>CO2</sub>/m<sup>2</sup>) :  **$m_{CO_2}(t) = Xc(t).U.Dc$**

avec :

U (kg<sub>CO2</sub> / m<sup>3</sup><sub>béton</sub>) : capacité de fixation maximale # *clinker*

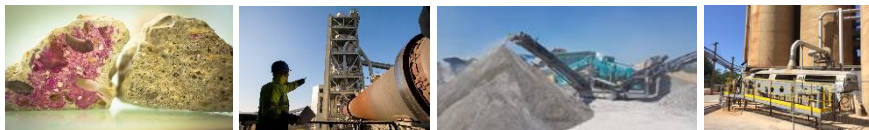
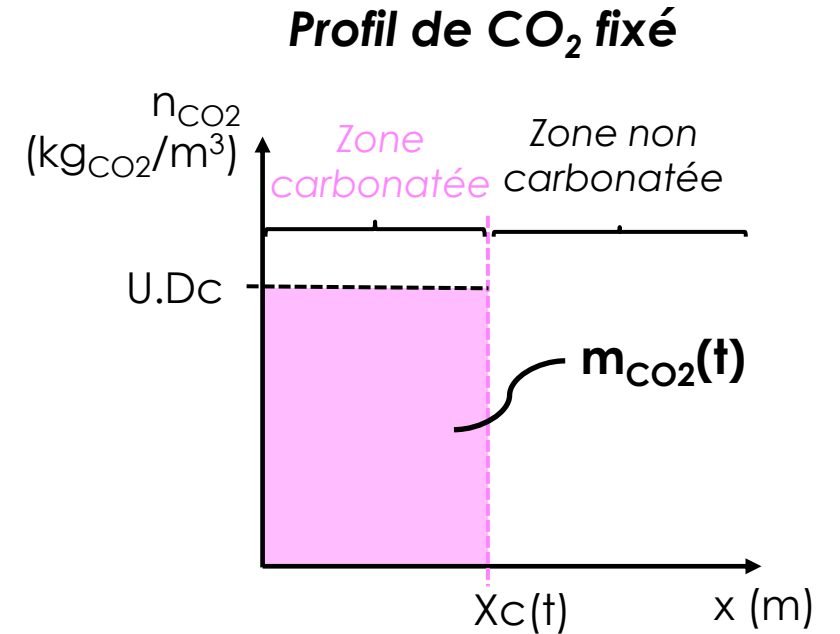
Dc (-) : degré de carbonatation # *environnement*

Xc(t) (m) : profondeur de carbonatation

$$Xc(t) = k.t^{1/2}$$

avec :

k (m/an<sup>1/2</sup>) : vitesse de carbonatation # *matériau, environnement*



## ► Comment modéliser la fixation du CO<sub>2</sub> par l'ouvrage?

- Modèle(s) « numérique(s) » :

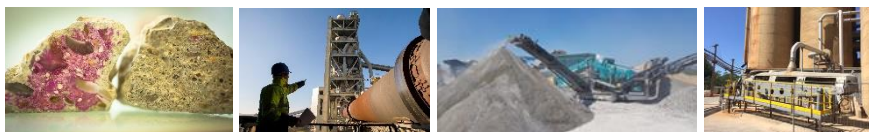
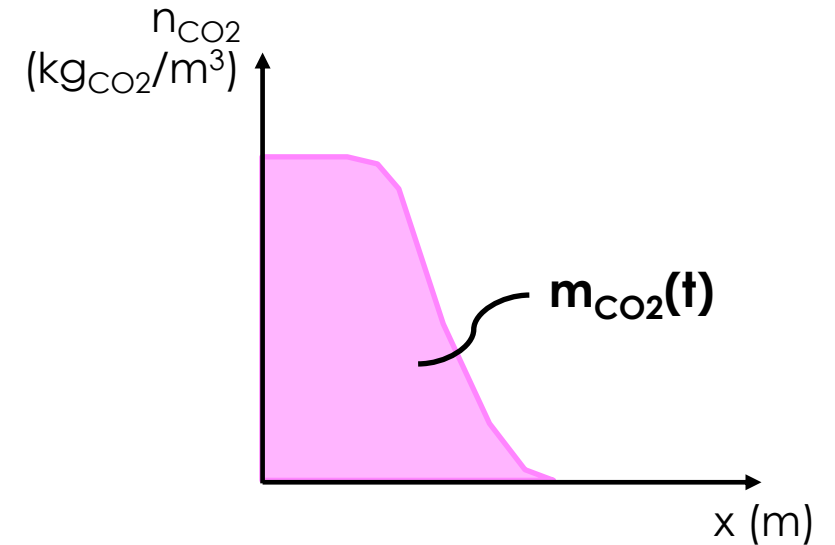
Modèle de transfert réactif basé sur  $n$  équations de conservation des réactifs (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH, CSH, etc.)

Exemple (bilan du CO<sub>2</sub>) :

$$\frac{\partial n_{\text{CO}_2}}{\partial t} = \text{div}(\underbrace{D \text{grad}[\text{CO}_2]}_{\text{Diffusion gazeuse}}) + \underbrace{R_c}_{\text{Réactions}}$$

Données d'entrées : composition chimique, propriétés du béton, conditions environnementales

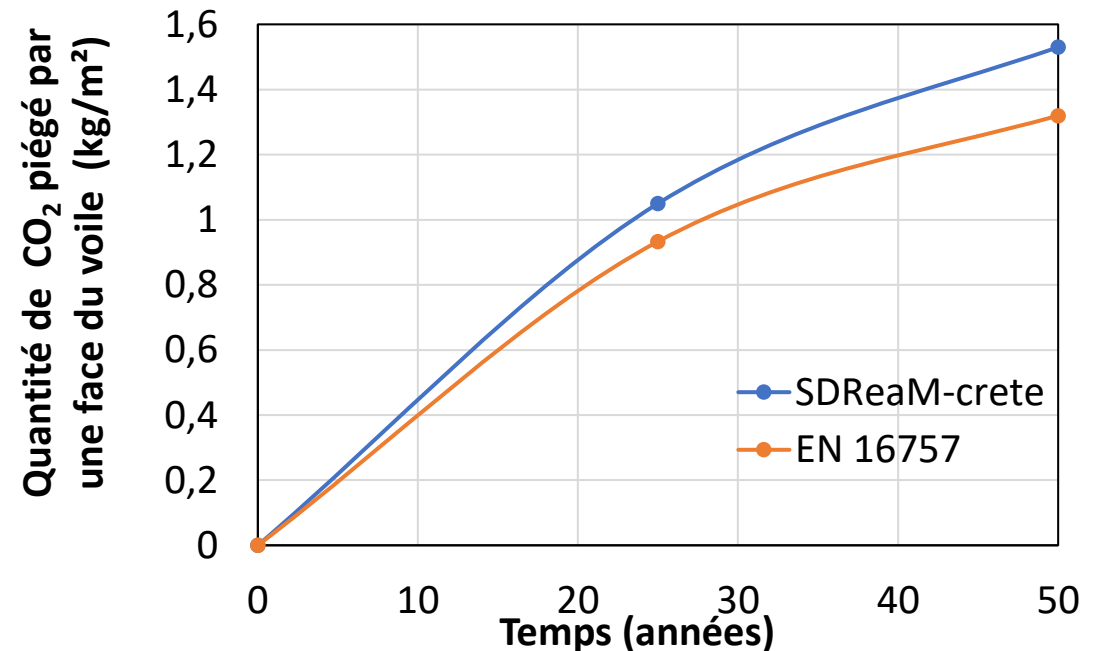
**Profil de CO<sub>2</sub> fixé**



## ► Etude de cas n°1

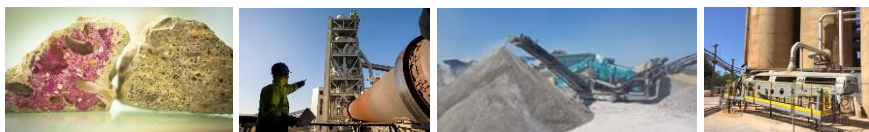
- Carbonatation d'un voile fictif de 20 cm ( $1\text{m}^2$ ) sur 50 ans

BETON	
CEM I 52,5 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	280
$E_{\text{eff}}/C$	0,60
Classe de resistance	C25/30
ENVIRONNEMENT	
Classe d'exposition	XC4
Humidité Relative (%)	$80 \pm 10$
Taux de $\text{CO}_2$ (ppm)	400



- ✓ Modèle « ingénieur » EN 16757 :  $1,3\text{ kg}/\text{m}^2$
- ✓ Modèle « numérique » SDReaM-crete :  $1,5\text{ kg}/\text{m}^2$

⇒ Taux de carbonatation = 8%



## ► Etude de cas n°2 :

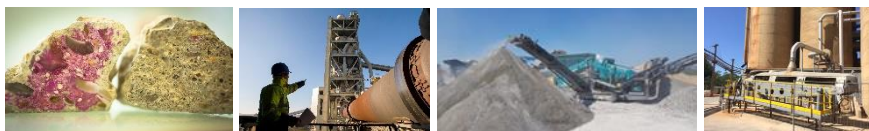
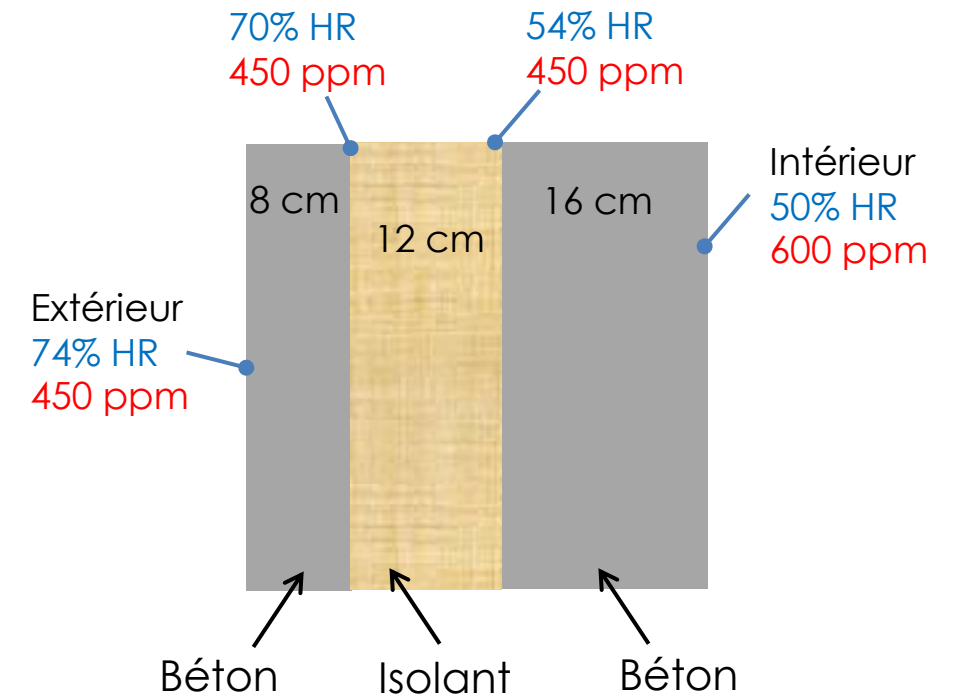
- Carbonatation d'un bâtiment existant sur 50 ans
  - Résidence d'étudiants Aziyadé La Rochelle :
    - Béton C30/37 brut de décoffrage
    - Composition du béton connue (CEMI 52.5)



Aziyadé (CROUS, HOBO Architecture, CIR Préfa)

### Mur à double paroi

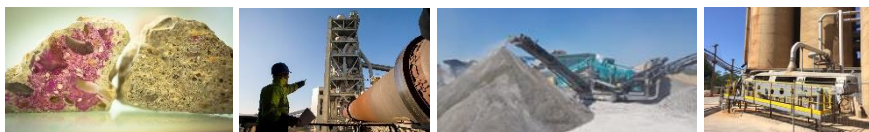
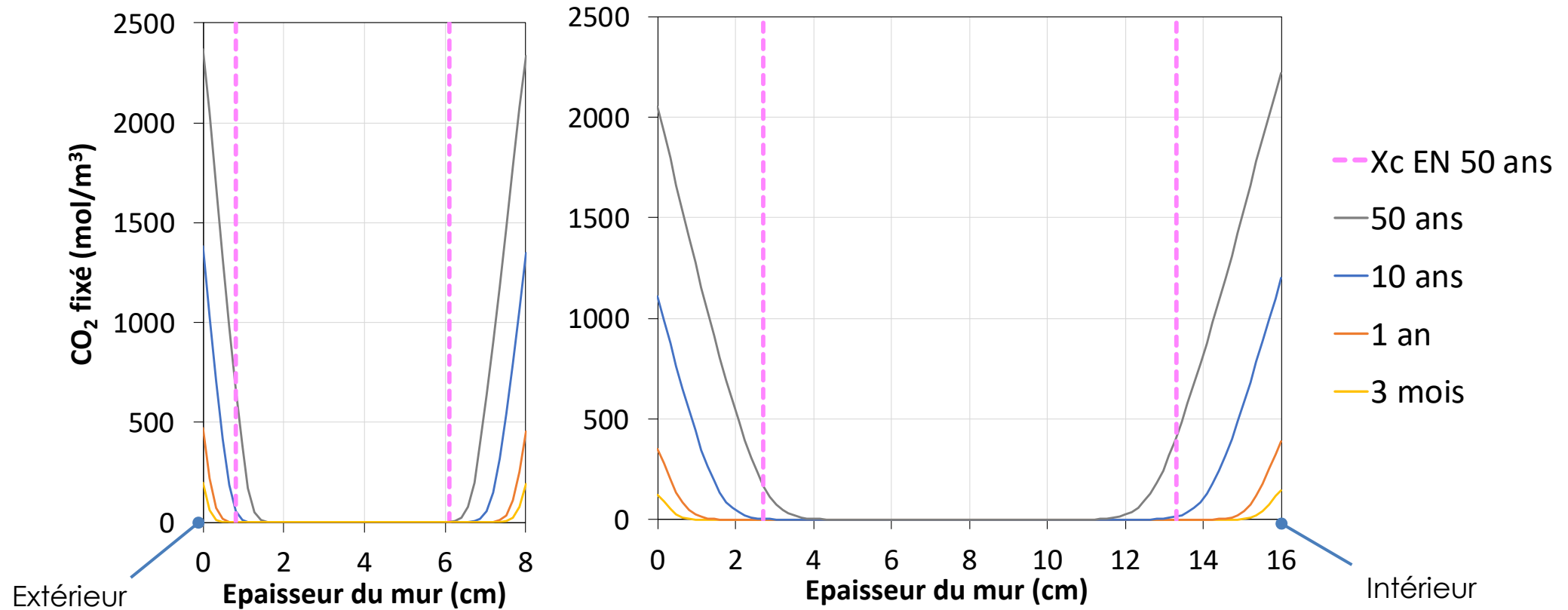
4 ambiances de HR et [CO<sub>2</sub>]





## ► Etude de cas n°2 :

- Profils simulés de CO<sub>2</sub> fixé (modèle LaSIE) et profondeur de carbonatation X<sub>c</sub> (EN 16757)





## ► Etude de cas n°2 :

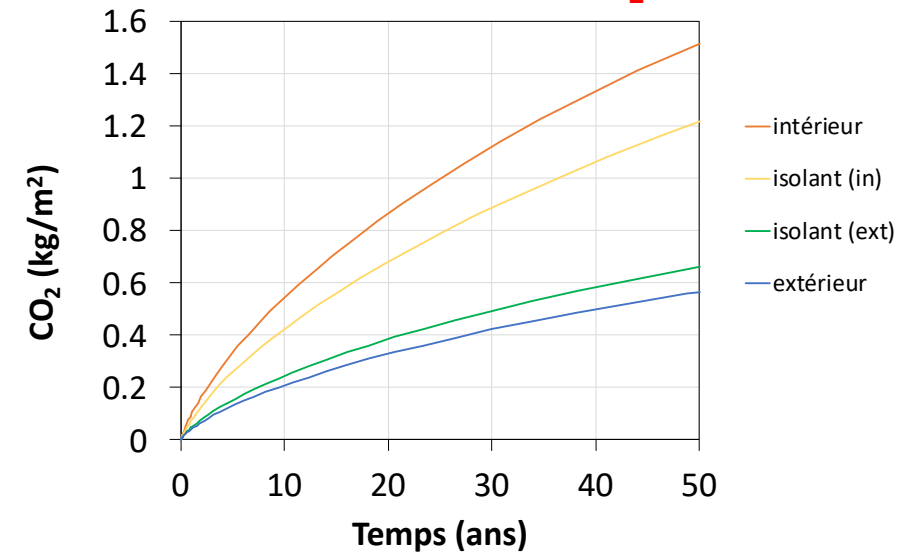
- Quantité de CO<sub>2</sub> fixé par le bâtiment en 50 ans

Modèle « EN 16757 »  
**33 tonnes de CO<sub>2</sub>**

Surfaces (m <sup>2</sup> )	
Verticale Ext.	2490
Horizontale Ext.	2550
Verticale Int.	7240
Horizontale Int.	2400
Verticale Iso Ext.	1620
Verticale Iso int.	1620

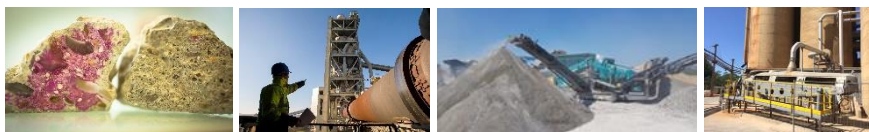
Xc (mm)	Degré de carbo. ( - )
8	0,85 (XC4)
19	0,75 (XC3)
27	0,40 (XC1)
27	0,40 (XC1)
19	0,75 (XC3)
27	0,40 (XC1)

Modèle « numérique »  
**20 tonnes de CO<sub>2</sub>**

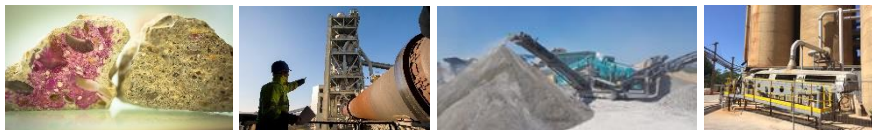
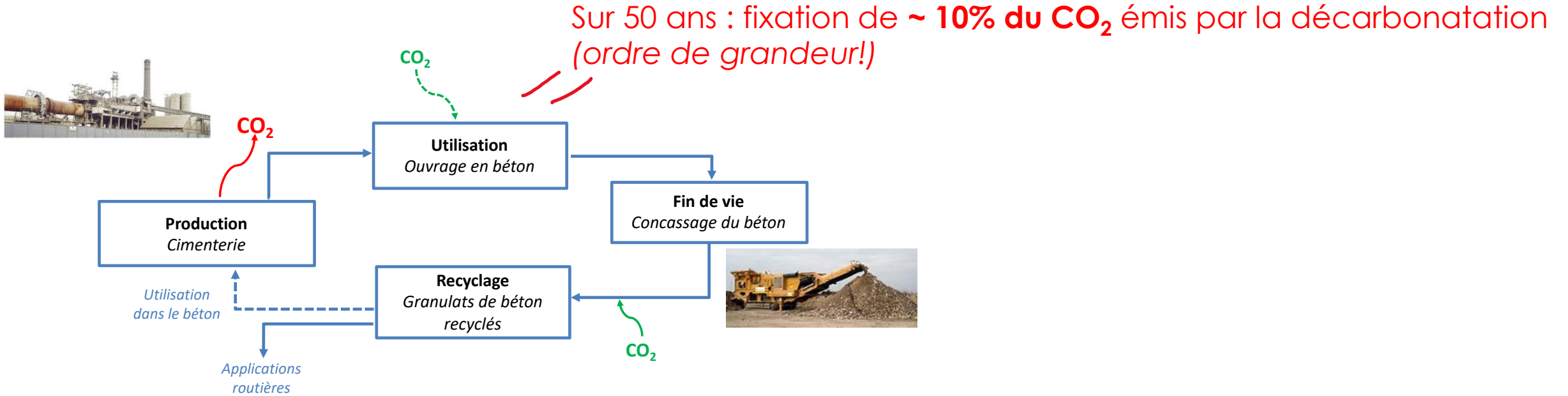


⇒ Taux de carbonatation de **8 à 12%**

(475 tonnes de clinker utilisées pour le bâtiment)



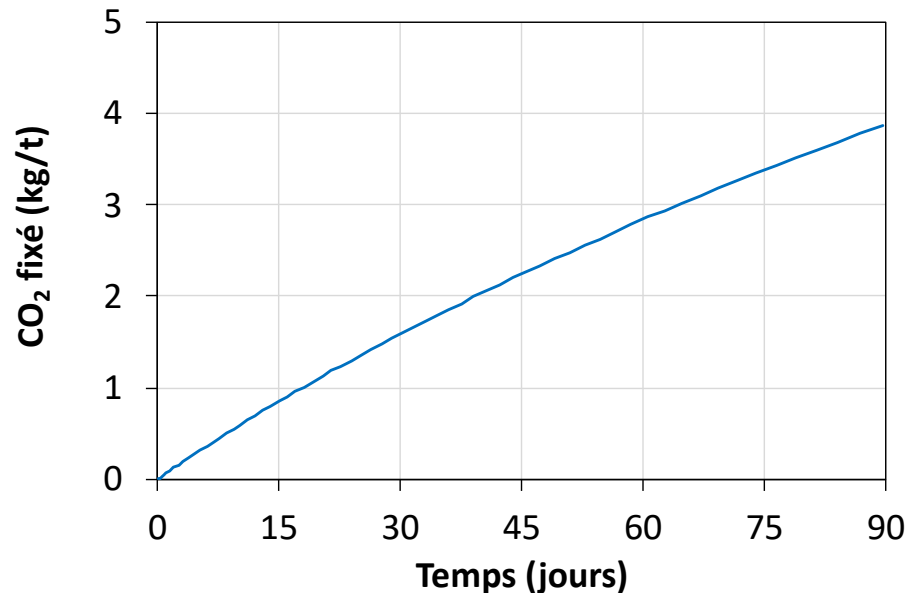
► Echanges de CO<sub>2</sub> pendant le cycle de vie du béton



Le béton recyclé, un puits de carbone!  
27 Septembre 2022, Paris La Défense

## ► Simulation numérique de la carbonatation naturelle d'un GBR

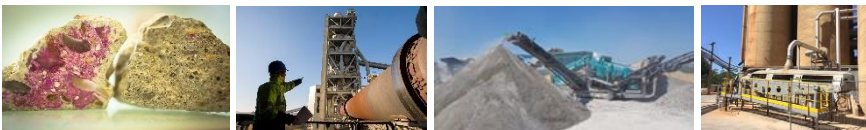
- Etude de cas :
  - 1 grain de 4 mm de composition homogène (porosité=20%, CH=1000 mol/m<sup>3</sup>)
  - état initial : équilibre hydrique à 65% HR et 20°C
  - carbonatation de 90 jours à 20°C, 65% HR et 0,04% de CO<sub>2</sub>
- Résultat :



Sur 3 mois :

**3,9 kg/t<sub>GBR</sub>**

**Taux de carbonatation ~ 5 %**



## ► Cas d'un tas de GBR

- Après concassage : stockage des GBR sous forme de tas !
- Evaluation de la vitesse de carbonatation d'un tas (Hou et al, RUGC 2022)



(Y. Hou)

$$m_{CO_2} = S \times X_c \times Q_{CO_2}$$

Surface de stockage (m<sup>2</sup>) →  $S$   
 Potentiel de piégeage de CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) →  $Q_{CO_2}$   
 Profondeur de carbonatation (m) =  $\sqrt{\frac{2D_{CO_2}[CO_2]}{Q_{CO_2}} \times t}$   
 $D_{CO_2}$ : Coefficient de diffusion effectif du CO<sub>2</sub> (m<sup>2</sup>/s)  
 $[CO_2]$ : concentration en CO<sub>2</sub> dans air ambiant (kg/m<sup>3</sup>)

$D_{CO_2}$  : déterminée par des essais de diffusion gazeuse (O<sub>2</sub>)  
 $Q_{CO_2}$  : déterminée par des essais de consommation du CO<sub>2</sub>

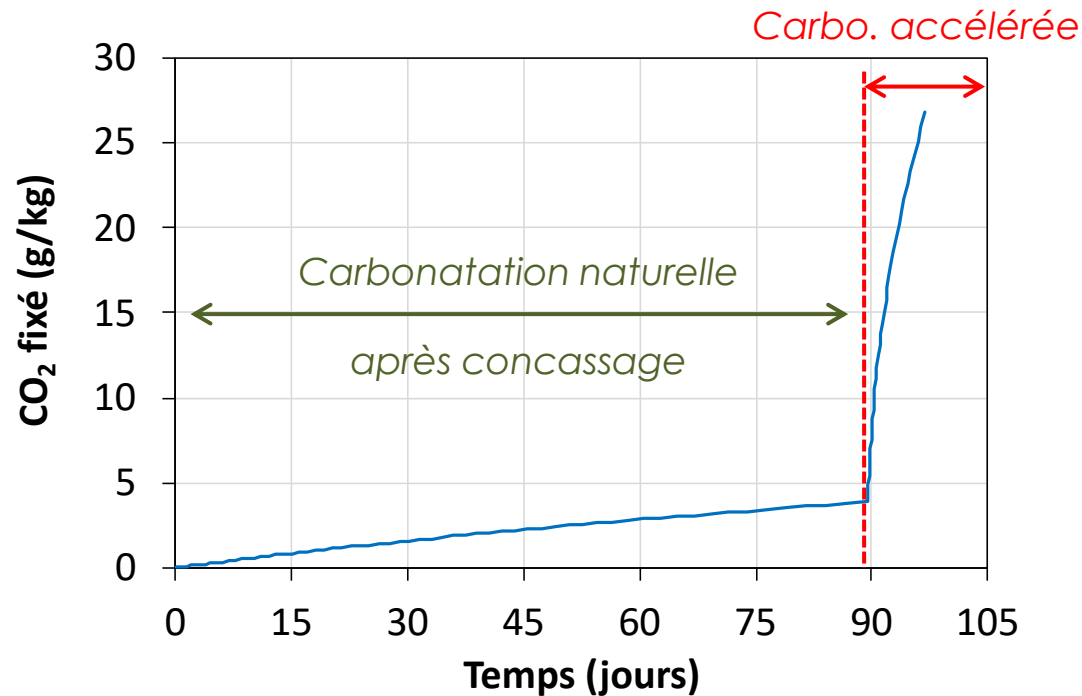
- Vitesse de carbonatation d'un tas non remanié évaluée à **10 cm/an**
  - Exemple pour un tas de 2000 m<sup>3</sup> : piégeage < 0,2 kg/t<sub>GBR</sub> sur 3 mois de stockage (<< 3,9 kg/t<sub>GBR</sub> pour un grain totalement exposé au CO<sub>2</sub> ambiant)



## ► Impact d'une carbonatation initiale sur une carbonatation accélérée ?

### ▪ Etude de cas :

- 1 grain de 4 mm de composition homogène (porosité=20%, CH=1000 mol/m<sup>3</sup>)
- état initial : équilibre hydrique à 65% HR et 20°C
- carbonatation de 90 jours à 0,04% de CO<sub>2</sub> puis 7 jours à 15% de CO<sub>2</sub> (20°C et 65% HR)

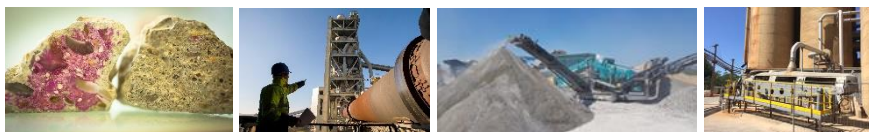


En (90 +7) jours :

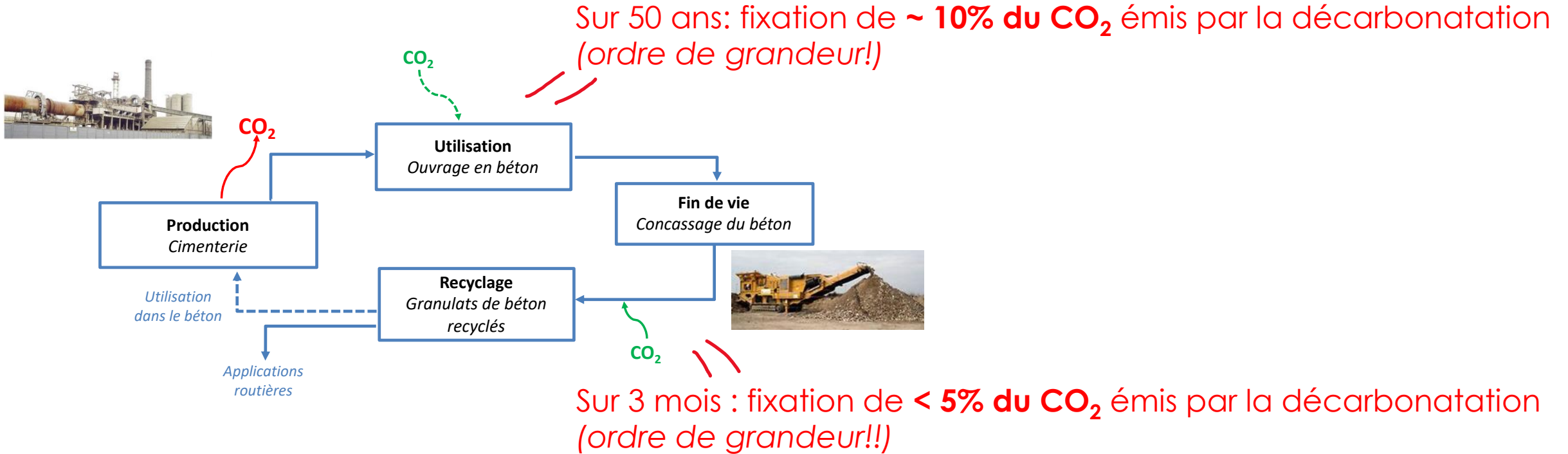
**27 kg/t<sub>GBR</sub>**

**Taux de carbonatation ~ 40%**

**Carbo. naturelle << carbo. accélérée**



► Echanges de CO<sub>2</sub> pendant le cycle de vie du béton



Béton en carbonatation naturelle : puits de carbone réel mais lent...

**fort intérêt d'un procédé de carbonatation accélérée des GBR!**





► Membres du GT1-2

