

# Prise en compte de la capacité de piégeage de CO<sub>2</sub> d'une résidence étudiante AZIYADÉ pendant sa durée de vie théorique

Pierre-Yves Mahieux<sup>1</sup>, Philippe Turcry<sup>1</sup>, Jérôme Lux<sup>1</sup>, Jonathan Mai-Nhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LaSIE, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement, UMR 7356 CNRS, La Rochelle Université, La Rochelle

<sup>2</sup> Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, Cerib, Epernon, France

**RESUMÉ** Dans le cadre de la réglementation environnementale RE2020, le secteur du bâtiment français se doit de produire des bâtiments à énergie positive et bas carbone en prenant en compte l'analyse du cycle de vie des matériaux (de la conception des bâtiments jusqu'à leur démolition). Avec cette nouvelle approche, tout laisse à penser que les structures en béton armé sont impactées négativement puisque les émissions de gaz à effet de serre se situent entre 300 et 400 kg en eq. CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton (de la fabrication du ciment à la mise en œuvre du béton sur chantier). Si de multiples leviers sont possibles pour réduire l'impact environnemental de ce matériau comme, par exemple, l'utilisation de ciments à faible teneur en clinker ou la réduction du volume des éléments de structure en favorisant l'utilisation de béton à haute performance, il existe un autre levier sur lequel il est également possible d'agir : la prise en compte du piégeage du CO<sub>2</sub> par carbonatation naturelle du béton tout au long de la durée de vie de l'ouvrage. Si la carbonatation reste un phénomène inducteur de corrosion pour les structures en béton armé, elle permet en revanche le piégeage d'une certaine quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Le bâtiment présenté dans cet article est une résidence universitaire, nommée AZIYADÉ, totalement préfabriquée en usine. Les éléments porteurs verticaux et horizontaux ont été assemblés à sec sur le chantier. Les parois extérieures et les intérieures sont en béton brut, matricé ou poli. La carbonatation atmosphérique de ce bâtiment a été modélisée à l'aide du modèle code 2010 proposé par la FIB, ainsi qu'avec le guide de calcul proposé dans la norme européenne NF EN 16757 en vue de calculer le piégeage de CO<sub>2</sub> par carbonatation naturelle. La masse de CO<sub>2</sub> piégé a été évaluée à partir des profondeurs de carbonatation estimées pour les différents éléments de construction. Pour une durée de vie de 50 ans, ce bâtiment est susceptible de piéger entre 23 et 32 tonnes eq. CO<sub>2</sub>, ce qui représente au plus 12 % des émissions de CO<sub>2</sub> dues à la décarbonatation du calcaire émis pendant la fabrication du ciment utilisé pour cette construction.

**Mots-clefs** : RE2020, structure béton armé, carbonatation naturelle, piégeage de CO<sub>2</sub>

## I. INTRODUCTION

Dans le cadre de réglementation environnementale RE2020 (Loi n°2015-992), le secteur du bâtiment français se doit de produire des bâtiments à énergie positive et bas carbone en prenant en compte l'analyse du cycle de vie des matériaux (de la conception des bâtiments à leur démolition). Avec cette nouvelle approche, tout laisse à penser que les structures en béton armé soient impactées négativement puisque les émissions de gaz à effet de serre sont comprises entre 300 et 400 kg eq. CO<sub>2</sub> par m<sup>3</sup> de béton, de la fabrication du ciment à la mise en œuvre du béton sur chantier (Solutions béton, 2017). Si de multiples leviers sont envisagés pour réduire l'impact environnemental, comme

l'utilisation de ciments à faible teneur en clinker (Younsi et al., 2013) ou bien la réduction du volume des éléments de structure en favorisant l'utilisation de bétons à haute performance (Habert et Roussel, 2009), il existe un autre levier sur lequel il est également possible d'agir pour réduire leur empreinte environnementale, à savoir la prise en compte de la capacité de piégeage du CO<sub>2</sub> par carbonatation naturelle du béton tout au long de la vie de l'ouvrage (Lagerblad, 2005). Si la carbonatation reste un phénomène pathologique pour les structures en béton armé, elle permet, en revanche, de piéger une certaine quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique et de réduire par conséquent l'empreinte environnementale du béton. Pour un béton, si l'on considère que l'intégralité des oxydes de calcium CaO du liant hydraulique peuvent réagir avec le CO<sub>2</sub> par carbonatation naturelle, alors le potentiel théorique de piégeage du CO<sub>2</sub> peut être supérieur à 150 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton.

Nous proposons dans cet article une étude de cas du piégeage du CO<sub>2</sub> par le bâtiment présenté dans la figure 1, c'est-à-dire la résidence universitaire pour étudiants, nommée AZIYADÉ, entièrement préfabriquée en usine. Chaque élément porteur vertical et horizontal a été assemblé à sec, sur le chantier situé sur le campus universitaire de La Rochelle (France). Les revêtements extérieurs et les revêtements intérieurs sont en béton brut, matricé ou poli. La carbonatation atmosphérique de ce bâtiment a été modélisée à l'aide d'un modèle ingénieur proposé dans la norme européenne (NF EN 16757, 2017) et celui proposé par la FIB (FIB, 2006). Le piégeage global de CO<sub>2</sub> pendant la durée de vie théorique de la résidence a été évaluée à partir des différentes zones de béton exposé aux conditions atmosphériques et des profondeurs de carbonatation prédites puis comparée au CO<sub>2</sub> émis pour la construction, et plus particulièrement la décarbonatation du calcaire lors de la fabrication du ciment.



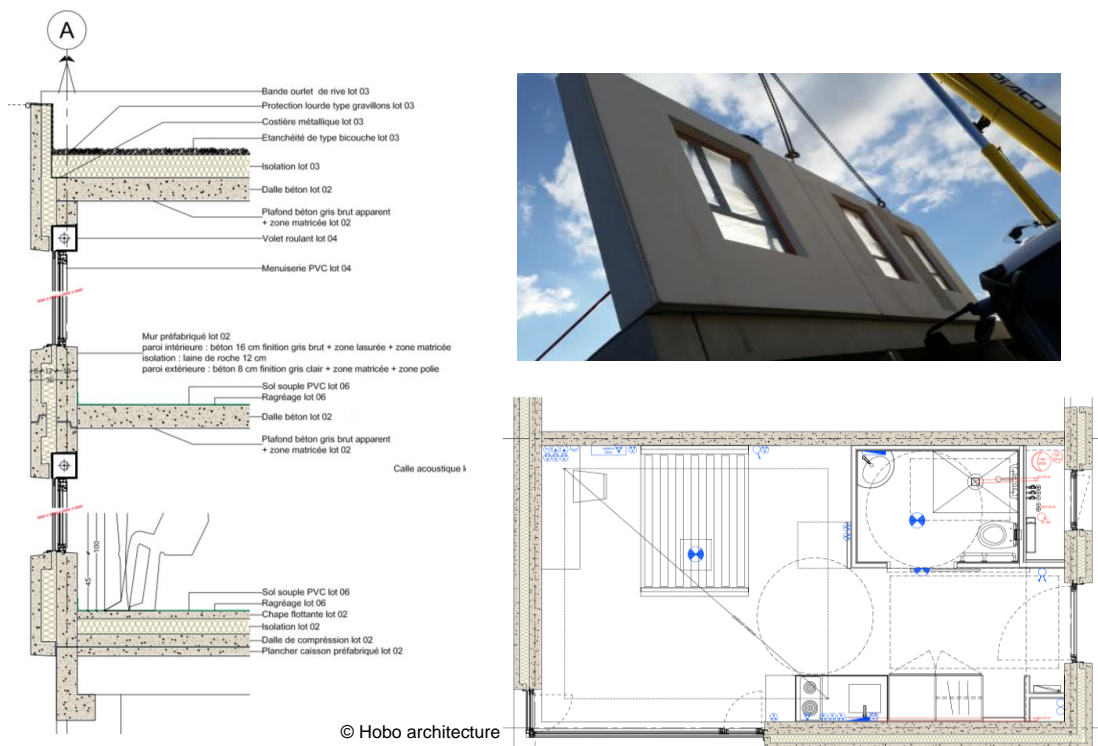
FIGURE 1. Photographies de la résidence AZIYADÉ

## II. PRESENTATION TECHNIQUE DE LA RÉSIDENCE AZIYADÉ

AZIYADÉ est une résidence étudiante composée de 92 studios (18 et 23 m<sup>2</sup>), 180 m<sup>2</sup> de parties communes (une salle de travail, une buanderie et une bagagerie), 700 m<sup>2</sup> de couloirs et un local technique, qui sont tous répartis du premier au cinquième étage. Le rez-de-chaussée est utilisé pour le parking et l'accès aux étages. Le bâtiment a été conçu par HOB0 architecture pour le CROUS de La Rochelle, réalisé par CIR PREFEA et inauguré à la rentrée 2016 pour un budget total de 3 530 000 €. Il s'agit d'une résidence dont l'enveloppe structurelle et les lots techniques ont tous été préfabriqués en usine avant d'être assemblés à sec sur le chantier.

C'est d'ailleurs pour cette particularité que ce chantier a été retenu pour notre étude de cas. Les surfaces de l'enveloppe structurelle de la résidence sont en béton brut, blanc ou gris, matricé ou poli et se trouvent exposées à l'air ambiant aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur et donc sujet à la carbonatation naturelle. Une deuxième particularité est que les 99 panneaux préfabriqués de façade sont constitués de trois éléments assemblés en sandwich (figure 2) : une peau intérieure en béton armé de 16 cm, un noyau isolant de laine de roche de 12 cm et une peau extérieure de parement en béton armé de 8 cm pour un total de 38 cm. Avec une structure de ce type, la surface d'interaction entre le béton et l'air ambiant est donc doublée (figure 3).

En quelques chiffres, l'ouvrage représente : 1500 m<sup>3</sup> de béton, 4100 m<sup>2</sup> de surface horizontale, 223 éléments de plancher en dalles pleines et nervurées en béton armé, des éléments de cloisons intérieurs en béton armé, 99 panneaux-sandwiches et divers éléments structurels tels que les poteaux, les poutres, les escaliers et paliers. Les liaisons entre éléments sont réalisées par des boîtes de clavetage et par scellement chimique d'aciers de liaison.



**FIGURE 2.** Coupe horizontale et verticale des panneaux en BA de l'enveloppe structurelle

Deux ciments ont été utilisés pour fabriquer les éléments en béton armé. Il s'agit d'un ciment blanc produit en Espagne et d'un ciment gris produit en France, tous les deux de type CEM I 52,5 R. Compte tenu du peu d'informations disponibles sur la fiche technique du ciment provenant d'Espagne, nous ne pouvons présenter que la composition élémentaire et minéralogique du ciment gris produit en France. Pour cette étude nous supposons donc que ces deux ciments ont la même composition (tableau 1).

**TABLEAU 1 : Composition chimique du ciment CEM I 52.5R utilisé dans la composition du béton C30/37**

| Composition chimique (%) |                                |                                |      |     | Composition minéralogique du clinker (%) |                  |                  |                   |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|--|------------------|------------------|-------------------|
| SiO <sub>2</sub>         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | C <sub>3</sub> S                         | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| 20.4                     | 5.0                            | 2.7                            | 65.2 | 1.0 | 71                                       | 9                | 8                | 9                 |

Deux compositions de béton ont été formulées pour les éléments préfabriqués et sont présentées dans le tableau 2. Le premier de classe de résistance C30/37 est un béton blanc dosé à 340 kg de ciment par m<sup>3</sup> de béton. Le rapport E/C est de 0,57 et présente une classe d'affaissement S3. Le second béton est un béton autoplaçant, de classe de résistance 35/45 avec un dosage en ciment de 330 kg/m<sup>3</sup> et une addition de filler à raison de 160 kg/m<sup>3</sup>. Le rapport E/C est de 0,56 pour une classe d'étalement F6. Ces deux bétons sont adjuvantés par des fluidifiants et par un accélérateur de prise pour le C35/45. Après coulage, les éléments en béton armé ont subi une cure chauffée pendant les 24 premières heures. Compte tenu des similitudes des formulations et du manque d'information sur le ciment blanc, seul le béton dosé à 330 kg de ciment par m<sup>3</sup> de béton avec un rapport E/C de 0,56 sera utilisé dans les modèles prédictif pour le calcul du CO<sub>2</sub> piégé.

**TABLEAU 2 : Composition des deux bétons formulés pour la résidence AZIYADÉ**

|                                   | Concrete composition (kg/m <sup>3</sup> ) |            |
|-----------------------------------|---|------------|
|                                   | C30/37                                    | C35/45     |
| Ciment CEM I 52.5R                | 340                                       | 330        |
| Eau                               | 194                                       | 185        |
| E/C                               | 0,57                                      | 0,56       |
| Filler                            | -   | 160        |
| Sable                             | (0/2,5) <sup>1</sup> 850                  | (0/4) 760  |
| Gravillon                         | (4/10) 1000                               | (4/8) 270  |
| Gravier                           | -   | (8/16) 665 |
| Adjuvant Viscocrete KRONO 37      | -   | 0,80%      |
| Adjuvant Master X seed 100        | -   | 3,00%      |
| Adjuvant Master Glenium SKY 537   | 0.30%                                     | -          |
| Résistance à la compression à 18h | 19,1 MPa                                  | 23,8 MPa   |
| Résistance à la compression à 18j | 43,4 MPa                                  | 57,7 MPa   |

<sup>1</sup> Fraction granulaire (d/D)

Comme le béton ne se carbonate pas à la même vitesse selon le milieu où il se situe, 2 catégories de surface (verticale et horizontale) pour 3 types d'environnement (intérieur, extérieur et à l'intérieur des panneaux de façade au contact de l'isolant) ont été définies et calculées en réalisant un métré à partir des plans de coffrage (du RDC au niveau R+5) et de la maquette numérique. Aussi, sont

définies les surfaces horizontales et verticales extérieures ( $HS_{out}$  et  $VS_{out}$ ), les surfaces horizontales et verticales intérieures ( $HS_{ins}$  et  $VS_{ins}$ ) et les surfaces verticales à l'intérieur des panneaux de façade, coté extérieur et intérieur ( $VS_{insu,out}$  et  $VS_{insu,ins}$ ) (figure 3). Dans ce découpage, les surfaces ne sont pas différenciées en fonction de l'orientation du bâtiment.

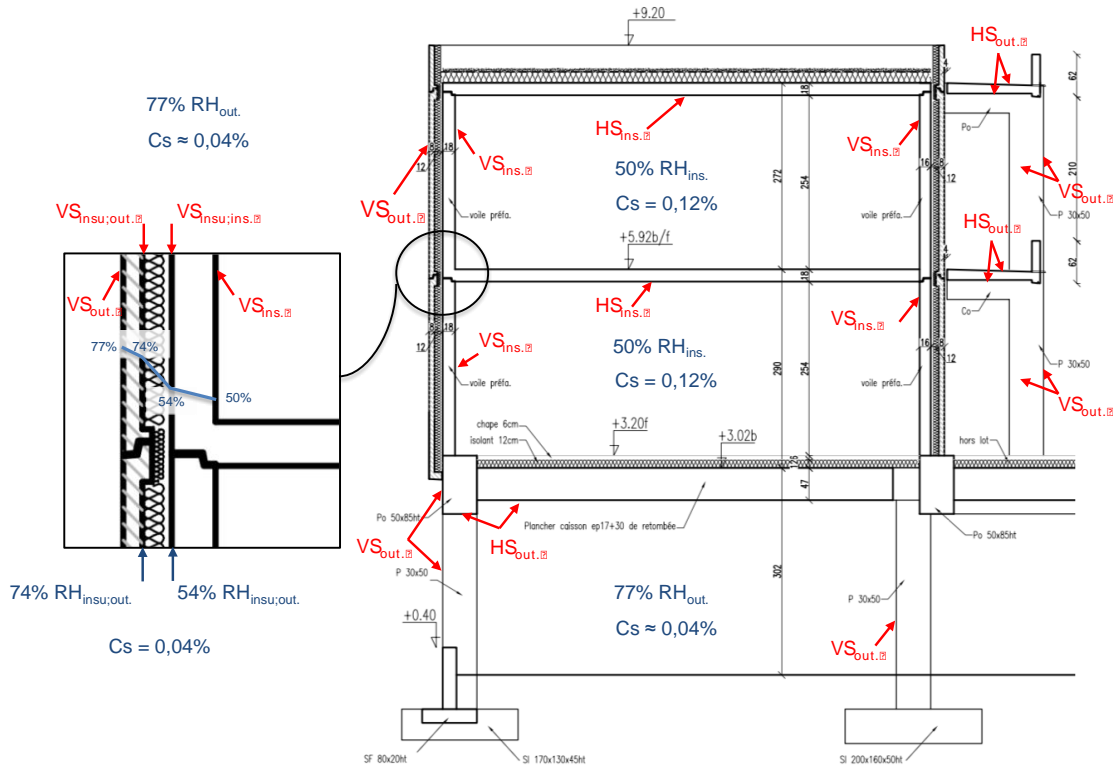


FIGURE 3. Plan de coupe du bâtiment légendé des surfaces d'exposition ( $HS_{ins}$ ,  $HS_{out}$ ,  $VS_{ins}$ ,  $VS_{out}$ ,  $VS_{insu,out}$ ,  $VS_{insu,ins}$ ) et des ambiances retenues (HR et Cs).

Pour les humidités relatives, nous avons considéré une humidité moyenne et constante en extérieur de 77% et une température moyenne de 14,3°C. Cette humidité relative et cette température sont les valeurs moyennes mesurées par une station météorologique située à La Rochelle sur l'année 2018 ([www.infoclimat.fr](http://www.infoclimat.fr)). Pour les espaces intérieurs, nous avons considéré une humidité relative par défaut de 50% et une température constante de 20°C. Un profil d'humidité relative pour les panneaux sandwich a été calculé à l'aide du logiciel UBAKUS. Les humidités relatives à l'interface entre les panneaux de béton armé et l'isolant sont de 74% et 54% pour le coté extérieur et intérieur respectivement.

Pour les concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub>, nous avons considéré une concentration extérieure  $C_{sext}$  de 450 ppm et 630 ppm pour l'intérieur  $C_{sint}$ . Pour cette dernière, nous avons supposé que le taux d'occupation des studios est de 12 heures par jour, 10 mois/an et que le débit de ventilation était de 40 m<sup>3</sup>/h (débit minimum imposé pour des logements avec une salle de bain et une cuisine).

$$C_{sint} = C_{sext} + S/Q \quad (1)$$

Où :  $C_{\text{sint}}$  est la concentration intérieure en mg/m<sup>3</sup>;  $C_{\text{sext}}$  la concentration extérieure de 450 ppm (= 825 mg/m<sup>3</sup>);  $S$  le taux d'émission en CO<sub>2</sub> par l'occupant = 31680 mg/h (adulte avec activité modérée);  $Q$  le débit de ventilation en m<sup>3</sup>/h.

### III. PRÉDICTION DES FRONTS DE CARBONATATION À 50 ANS

#### A. Modèle NF EN 16757

Sur la base de certains rapports de recherche, la norme européenne (NF EN 16757, 2017) en vigueur propose un guide sur le piégeage naturel de CO<sub>2</sub> par carbonatation du béton, depuis la préfabrication des éléments en béton armé jusqu'au recyclage des granulats de béton de démolition dans le béton. Selon l'approche de (Papadakis et al., 1991), l'évolution de la profondeur de carbonatation  $X_c(t)$ , en mm, est proposée en fonction de la racine carrée du temps (équation 2) où un coefficient de carbonatation  $k_i$ , exprimé en mm/an<sup>1/2</sup>, permet de prendre en compte les propriétés du béton (c'est-à-dire la classe de résistance), les propriétés de l'élément en béton armé et l'environnement dans lequel il est exposé. Dans cette étude de cas, trois coefficients de carbonatation ont été choisis en fonction des classes d'exposition. Pour un environnement extérieur exposé à la pluie, le coefficient de carbonatation  $k_1$  est pris égal à 1,1 mm/an<sup>1/2</sup>. Pour un second milieu extérieur abrité des précipitations, le coefficient de carbonatation  $k_2$  est égal à 2,77 mm/an<sup>1/2</sup>. À l'intérieur, il existe un environnement où les éléments en béton armé ne sont pas recouverts d'un enduit. Dans ce cas, le coefficient de carbonatation  $K_3$  est égal à 3,8 mm/an<sup>1/2</sup>.

$$X_c(t) = k_{i \rightarrow 3} \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Où :  $X_c$  est la profondeur de carbonatation en mm;  $k$  est le coefficient de carbonatation en mm/an<sup>1/2</sup>;  $i$  les expositions atmosphériques (conditions non abritées et abritées à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment);  $t$  le temps en année.

#### B. Modèle FIB

La FIB propose un modèle physique permettant d'accéder à l'évolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps, en tenant compte de la nature, des propriétés et de la proportion du ciment utilisé pour le béton, ainsi que des conditions environnementales. La profondeur de carbonatation  $X_c(t)$  au temps  $t$ , en mm, peut être déterminée par l'équation suivante :

$$X_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot R_{NAC,0}^{-1} \cdot C_s \cdot W(t) \cdot \sqrt{t}} \quad (3)$$

Où :  $k_e$  est une fonction environnementale;  $k_c$  est un paramètre de transfert d'exécution;  $R_{NAC,0}^{-1}$  est la résistance effective inverse à la carbonatation du béton, en mm<sup>2</sup>/an/(kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), obtenue sur des éprouvettes de béton sec en laboratoire dans des conditions naturelles;  $C_s$  est la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et  $W(t)$  est la fonction météorologique.

Les commentaires suivants et le tableau 3 fournissent des informations supplémentaires sur les paramètres utilisés dans cette étude de cas pour déterminer les profondeurs de carbonatation du béton à 50 ans.

La fonction environnementale  $k_e$ , donnée par l'équation 4, prend en compte l'effet de l'humidité relative  $RH$  sur le coefficient de diffusion du CO<sub>2</sub> par rapport à l'humidité relative de référence  $RH_{\text{ref}}$  égale à 65%. La moyenne de l'humidité relative externe est de 77%. La moyenne de l'humidité

relative intérieure est de 50% et correspond à cette valeur recommandée pour un confort hygrothermique intérieur. Au contact de l'isolant, l'humidité relative est de 74% sur le panneau extérieur et de 54% sur le panneau intérieur (figure 3). Le profil d'humidité relative est calculé à partir de la température extérieure moyenne annuelle égale à 14,3°C en 2018, d'une température moyenne de confort intérieur de 20°C, de la composition et de la géométrie des panneaux sandwich en béton armé.

$$k_e = \left\{ \frac{\left(1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^5\right)}{\left(1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^5\right)} \right\}^{2.5} \quad (4)$$

Compte tenu de la préfabrication des éléments en béton armé et du soin apporté à la cure après le coulage du béton, l'exécution est considérée comme optimale et le paramètre d'exécution  $k_e$  pris égal à 1.

En l'absence de résultats d'essais de carbonatation accélérée sur des bétons conçus et coulés pour cette résidence, la résistance effective inverse à la carbonatation du béton  $R_{NAC,0}^{-1}$  est prise égale à 2995,9 mm<sup>2</sup>/an/(kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>). Elle est déterminée à partir de la résistance effective inverse à la carbonatation du béton sec, prescrite par le bulletin Fib 34 pour un béton avec un CEM I 42,5R et un rapport eau-ciment égal à 0,56.  $\varepsilon_t$  est un terme d'erreur égal à 315,5 mm<sup>2</sup>/an/(kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), selon l'équation 5 suivante :

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t \quad (5)$$

Les concentrations externe et interne de CO<sub>2</sub> (Cs) sont respectivement de 450 ppm et 630 ppm. Dans l'isolation, la concentration en CO<sub>2</sub> est considérée comme identique à la concentration externe, soit 450 ppm.

La fonction météorologique  $W(t)$  (équation 6) est exprimée comme une fonction climatique, qui prend en compte les événements pluvieux et les conditions d'exposition, c'est-à-dire les types de surface dans notre cas.  $T_0$  est un temps de référence lorsque le test de carbonatation accélérée est effectué, c'est-à-dire une valeur par défaut de 28 jours (0,047 an),  $p_{SR}$  est la probabilité de pluie battante sur les éléments et elle est considérée égale à 0,25 ou 1 respectivement pour les éléments verticaux et horizontaux.  $T_0W$  est le temps d'immersion, c'est-à-dire la fréquence annuelle des jours avec plus de 2,5 mm de précipitations. À La Rochelle, en 2018, il y a eu 18 jours de précipitations supérieures à 2,5 mm, soit une fréquence annuelle égale à 0,049.  $B_w$  est l'exposant de la régression égale à 0,446.

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} \cdot T_0 W)^{B_w}}{2}} \quad (6)$$

**TABLEAU 3 : Paramètres d'entrée pour le modèle de carbonatation de la FIB**

| Catégories  | Surfaces                 | RH (%) | $k_e$ (-) | $C_s$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $p_{sr}$ (-) | ToW (-) | W(t) (-) |
|-------------|--------------------------|--------|-----------|----------------------------|--------------|---------|----------|
| Verticale   | VS <sub>out.</sub>       | 77     | 0,62      | $8,85.10^{-4}$             | 0,25         | 0,049   | 0,63     |
|             | VS <sub>ins.</sub>       | 50     | 1,26      | $1,23.10^{-3}$             | 0            | 0       | 1        |
|             | VS <sub>insu, out.</sub> | 74     | 0,73      | $8,85.10^{-4}$             | 0            | 0       | 1        |
|             | VS <sub>insu, ins.</sub> | 54     | 1,21      | $8,85.10^{-4}$             | 0            | 0       | 1        |
| Horizontale | HS <sub>out.</sub>       | 77     | 0,62      | $8,85.10^{-4}$             | 1            | 0,049   | 0,43     |
|             | HS <sub>ins.</sub>       | 50     | 1,26      | $1,23.10^{-3}$             | 0            | 0       | 1        |

#### IV. MASSE DE CO<sub>2</sub> PIÉGÉ À 50 ANS

Les résultats présentés dans le tableau 4 résument la démarche de calcul préconisée par la norme européenne NF EN 16757, à savoir les surfaces d'exposition, les profondeurs de carbonatation  $X_c$ , les volumes de béton carbonaté, les degrés de carbonatation  $\alpha_c$  et la masse de CO<sub>2</sub> piégé pour les 50 ans de vie utile de ce bâtiment.

**TABLEAU 4 : Fronts de carbonatation à 50 ans, volumes de béton carbonaté, degré de carbonatation et masses de CO<sub>2</sub> piégé en fonction des surfaces exposées (NF EN 16757)**

| Surfaces exposées (m <sup>2</sup> ) | Front de carbonatation $X_c$ (10 <sup>-3</sup> m) | Volume de béton carbonaté (m <sup>3</sup> ) | Degré de carbonatation $\alpha_c$ (%) | Masse de CO <sub>2</sub> piégé (t) |      |
|-------------------------------------|---|---|---------------------------------------|------------------------------------|------|
| VS <sub>out.</sub>                  | 2490  | 8   | 19,9                                  | 85                                 | 2.8  |
| HS <sub>out.</sub>                  | 2550  | 19  | 48,4                                  | 75                                 | 6.1  |
| VS <sub>ins.</sub>                  | 7240  | 27  | 195,4                                 | 40                                 | 13.1 |
| HS <sub>ins.</sub>                  | 2400  | 27  | 64,8                                  | 40                                 | 4.3  |
| VS <sub>insu, out.</sub>            | 1620  | 19  | 30,7                                  | 75                                 | 3.9  |
| VS <sub>insu, ins.</sub>            | 1620  | 19  | 30,7                                  | 40                                 | 2.1  |
| $\Sigma=17\ 920$                    |   | $\Sigma=389,9$                              |                                       | $\Sigma=32,3$                      |      |

Comme prévu, les profondeurs de carbonatation les plus avancées sont obtenues à l'intérieur du bâtiment (27 mm). Cependant, même si les prédictions sont supérieures aux distances d'enrobages recommandée de 20 mm pour la classe d'exposition XC1 (béton à l'intérieur des bâtiments avec une faible humidité de l'air), le risque de corrosion reste faible compte tenu de la faible humidité relative.

Comme pour le coefficient de carbonatation  $k_i$ , trois classes d'exposition ont été retenues pour le degré de carbonatation  $\alpha_c$ , selon les exigences de la norme. Pour un élément directement en contact avec la pluie,  $\alpha_c$  est considéré comme égal à 85%. Pour un élément situé à l'extérieur mais abrité, le



degré de carbonatation est égal à 75%. Enfin, à l'intérieur du bâtiment, le degré de carbonatation est plus faible avec une valeur égale à 40%.

Le piégeage total de CO<sub>2</sub> dans cette structure par surface exposée peut être calculée avec l'équation 7 suivante :

$$CO_2 \text{ uptake} = \left( \sum X_{ci} \cdot \alpha_{ci} \cdot A_i \right) \cdot U_{tcc} \cdot C \quad (7)$$

$$U_{tcc} = w \cdot c \left( \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right) \quad (8)$$

Où : w est une partie de CaO réactif (kgCaO/kg de ciment) ; c est la masse de clinker en kg ; M<sub>CO<sub>2</sub></sub> est la masse molaire de CO<sub>2</sub> (44 g/mol) ; M<sub>CaO</sub> est la masse molaire de CaO (56 g/mol).

D'après l'équation 8, le paramètre U<sub>tcc</sub> représente l'absorption théorique maximale de CO<sub>2</sub> et il est corrélé avec la quantité totale de CaO réactif contenue dans le liant hydraulique. Dans le cas du béton C35/45, U<sub>tcc</sub> est calculé à 0,49 kg CO<sub>2</sub>/kg de ciment CEM I, qui contient 65,2% d'oxyde de calcium et 96% de clinker (Tableau 1).

Sur la base de ces calculs, la masse globale de CO<sub>2</sub> piégé pendant 50 ans de durée de vie théorique est estimée à 32 t eq. CO<sub>2</sub>, soit 82 kg eq. CO<sub>2</sub> par m<sup>3</sup> de béton carbonaté. Selon le volume global de béton utilisé pour cette construction (1500 m<sup>3</sup>), la masse de CO<sub>2</sub> piégé par m<sup>3</sup> de béton pourrait être égale à 21 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

Pour comparer cette première approche de prédiction, les résultats obtenus avec le modèle de carbonatation de la FIB sont présentés dans le tableau 5, c'est-à-dire les surfaces exposées à la carbonatation selon les environnements choisis, les profondeurs de carbonatation X<sub>c</sub>, les volumes de béton carbonaté et la masse de CO<sub>2</sub> absorbée dans le béton carbonaté.

**TABLEAU 5 : Fronts de carbonatation à 50 ans, volumes de béton carbonaté, degré de carbonatation et masses de CO<sub>2</sub> piégé en fonction des surfaces exposées (FIB).**

| Surfaces exposées<br>(m <sup>2</sup> ) | Front de carbonatation<br>X <sub>c</sub> (10 <sup>-3</sup> m) | Volume de béton<br>carbonaté<br>(m <sup>3</sup> ) | Masse de CO <sub>2</sub><br>piégé<br>(t) |
|--|---|---|--|
| VSout.                                 | 2490  | 9   | 22,4                                     |
| HSout.                                 | 2550  | 7   | 17,8                                     |
| VSins.                                 | 7240  | 25  | 181,0                                    |
| HSins.                                 | 2400  | 25  | 60,0                                     |
| VSinsu,out.                            | 1620  | 16  | 25,9                                     |
| VSinsu,ins.                            | 1620  | 21  | 34,0                                     |
|  | <u>Σ=17920</u>  | <u>Σ=341,1</u>                                    | <u>Σ=23,1</u>                            |

Comme pour le modèle précédent, les profondeurs de carbonatation les plus importantes se situent à l'intérieur du bâtiment avec une prédiction équivalente à l'approche proposée par la norme NF EN 16757.

Avec cette approche, le volume total de béton carbonaté est d'environ 340 m<sup>3</sup>, soit près de 23% du volume total de béton utilisé pour cette construction. Le volume de béton carbonaté sur les parois verticales intérieures est prédominant compte tenu de la surface exposée et de la cinétique de la carbonatation.

Pour évaluer le piégeage total de CO<sub>2</sub> dans le béton carbonaté à partir du modèle de carbonatation Fib code 2010, plusieurs étapes calculatoires ont été utilisées, à savoir :

- Les masses CSH ( $m_{\text{CSH}}$ ) et CH ( $m_{\text{CH}}$ ) pour 1 m<sup>3</sup> de béton sont calculées pour une hydratation complète des silicates de calcium C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S, selon l'équation 9. Le rapport stœchiométrique CaO/SiO<sub>2</sub> est pris égal à 1,7 pour les CSH, compte tenu de la nature du ciment (CEM I),
- Les masses de CSH ( $m_{\text{CSHc}}$ ) et de CH ( $m_{\text{CHc}}$ ) carbonatées sont déduites selon l'équation 10 en considérant un degré d'hydratation  $\alpha_{\text{H}}$  égal à 80% et un degré de carbonatation  $\alpha_{\text{c}}$  de 80% pour l'extérieur. A l'intérieur du bâtiment, le degré de carbonatation est réduit à 50% compte tenu de la faible humidité relative considérée dans le modèle, tout comme les panneaux de façade au contact de l'isolation.
- La masse de CO<sub>2</sub> piégé est calculée à partir de la masse de CaCO<sub>3</sub> formée et du volume de béton carbonaté par l'équation 11.



$$m_{\text{CSH}} = \left( \frac{m_{\text{C}_3\text{S}}}{M_{\text{C}_3\text{S}}} + \frac{m_{\text{C}_2\text{S}}}{M_{\text{C}_2\text{S}}} \right) \cdot M_{\text{CSH}}$$

$$m_{\text{CH}} = \left( 1,3 \frac{m_{\text{C}_3\text{S}}}{M_{\text{C}_3\text{S}}} + 0,3 \frac{m_{\text{C}_2\text{S}}}{M_{\text{C}_2\text{S}}} \right) \cdot M_{\text{CH}}$$

$$m_{\text{CSHc}} = \alpha_{\text{H}} \cdot \alpha_{\text{c}} \cdot m_{\text{CSH}} \quad (10)$$

$$m_{\text{CHc}} = \alpha_{\text{H}} \cdot \alpha_{\text{c}} \cdot m_{\text{CH}}$$

$$m_{\text{CaCO}_3} = \left( 1,7 \frac{m_{\text{CSHc}}}{M_{\text{CSH}}} + \frac{m_{\text{CHc}}}{M_{\text{CH}}} \right) \cdot M_{\text{CaCO}_3} \quad (11)$$

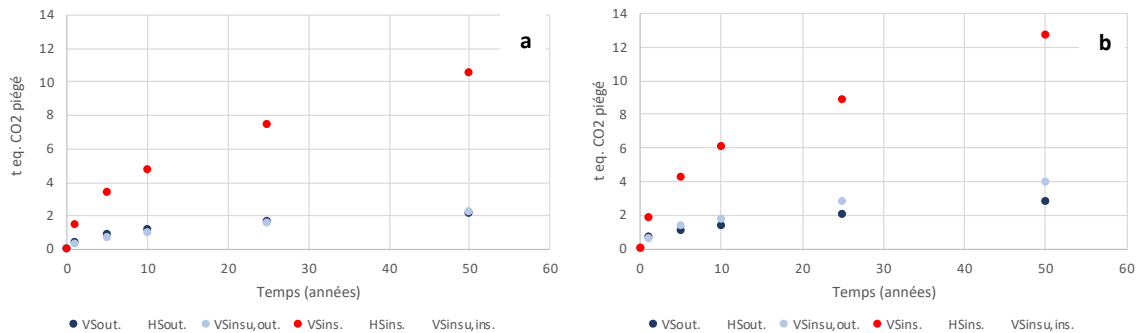
Où :  $M_{\text{C}_3\text{S}}$  est la masse molaire de silicate tricalcique ;  $M_{\text{C}_2\text{S}}$  est la masse molaire de silicate dicalcique ;  $M_{\text{CH}}$  est la masse molaire de portlandite ;  $M_{\text{CSH}}$  est la masse molaire de silicate de calcium hydraté.

La masse de CO<sub>2</sub> absorbée pendant 50 ans par ce bâtiment est estimée par le modèle FIB à plus de 23 t eq. CO<sub>2</sub>, soit 67 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton carbonaté. Pour l'ensemble de la quantité de béton utilisée pour cette construction, la masse de CO<sub>2</sub> absorbée est de 15 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

## V. DISCUSSION

Le potentiel de piégeage de CO<sub>2</sub> de la résidence AZIYADE est significatif et estimé, selon les deux modèles utilisés, entre 23 et 32 tonnes à 50 ans (durée de vie théorique du bâtiment). Seules les masses estimées sur les éléments extérieurs horizontaux ( $HS_{\text{out}}$ , figure 1) divergent significativement entre les deux modèles. Le paramètre  $p_{\text{st}}$  de la fonction météo  $W(t)$  dans le modèle de la FIB semble bien moins impactant que le coefficient de carbonatation  $k_2$  (conditions abritées à

l'extérieur) du modèle préconisé par la norme NF EN 16757. Quant aux cinétiques de piégeages présentées sur les figures 4a et 4b, elles sont comparables puisque les deux modèles sont exprimés en racine carré du temps.



**FIGURE 4.** Cinétique de piégeage du CO<sub>2</sub> en fonction des catégories d'exposition selon le modèle de la norme NF EN 16757 (a) et selon le modèle de la FIB (b).

D'après les résultats, si l'on estime que la quantité de CO<sub>2</sub> piégé est comprise entre 67 et 83 kg/m<sup>3</sup> de béton carbonaté, alors on peut supposer que plus de 40% du CaO réactif sera carbonaté au cours de la durée de vie de l'ouvrage. Ce point est intéressant car cette proportion pourrait réellement augmenter lors du processus de démolition et de production des granulats de béton recyclés.

Plus globalement, le fait de trouver entre 15 et 21 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton est également cohérent avec les exemples présentés dans la norme européenne. Pour une étude de cas similaire en termes de volume de béton (près de 1400 m<sup>3</sup>), mais avec près de la moitié moins de surfaces exposées, la quantité de CO<sub>2</sub> absorbée est égale à 13 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton. Ces résultats montrent les avantages d'un bâtiment entièrement préfabriqué composé d'éléments en béton armé non revêtus et d'un système d'isolation intégré, puisque la quantité de CO<sub>2</sub> absorbée est presque doublée pour un volume de béton équivalent.

Enfin, si l'on considère que le volume de béton utilisé pour la résidence est de 1500 m<sup>3</sup> avec 330 kg de ciment par m<sup>3</sup> de béton, la quantité de clinker utilisée pour la résidence peut être estimée à 490 tonnes. Considérant que la production d'une tonne de clinker génère 0,9 t eq. CO<sub>2</sub> dont 0,5 tonne pour la décarbonatation du calcaire, la quantité de CO<sub>2</sub> émise pour produire le clinker est de 441 t eq. CO<sub>2</sub>, dont 245 t eq. CO<sub>2</sub> provenant de la décarbonatation. Par rapport à l'estimation de 32 t de CO<sub>2</sub> piégé au maximum au cours du cycle de vie de cette structure, on peut donc estimer que la réduction de l'empreinte carbone par la carbonatation naturelle est d'environ 7% dans l'ensemble ou de 12% si l'on se concentre uniquement sur le processus de décarbonatation-carbonatation du CaO.

## VI. CONCLUSION

La résidence étudiante AZIYADÉ est un bâtiment particulier dans le paysage urbain car il est totalement préfabriqué en usine et assemblé à sec sur le chantier. La particularité de l'enveloppe structurelle est qu'elle est composée de béton brut à l'extérieur comme à l'intérieur avec un panneau sandwich, ce qui présente l'avantage de doubler l'interaction des éléments en béton armé avec les ambiances atmosphériques.

A partir des plans de coffrage et des prédictions des fronts de carbonatation par le modèle de carbonatation du FIB code 2010 et le modèle proposé dans la norme NF EN 16757, nous avons estimé que le bâtiment était en mesure de piéger entre 23 et 32 t de CO<sub>2</sub> pendant sa durée de vie théorique, ce qui revient à réduire l'empreinte carbone liée à la production du ciment de plus de 7%. Ces chiffres ne sont pas négligeables et montrent qu'au-delà des leviers traditionnels utilisés pour réduire l'empreinte carbone des structures en béton, la fixation du CO<sub>2</sub> par carbonatation naturelle peut être un facteur déterminant pour la réglementation environnementale RE2020.

## REMERCIEMENTS

La recherche présentée est réalisée dans le cadre du Projet National FastCarb soutenu par le Ministère de la Transition écologique et solidaire.

## REFERENCES

- Fib Bulletin 34. (2006). Model code for service life design. The International Federation for structural concrete, Task Group 5.6, Lausanne (Switzerland).
- Habert, G., Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, *Cement and Concrete Composites*, 31, 397–402.
- Lagerblad, B. (2005). Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – state of the art. *Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI report 2*.
- NF EN 16757. (2017). Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Product category rules for concrete and concrete elements, 2017.
- Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., Fardis, M.N. (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, 88, 363-373.
- Solutions béton. (2017). Bétons et empreinte carbone des bâtiments. *Guide de recommandation et d'aide à la prescription à l'attention des maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre*.
- Younsi, A., Turcry, Ph., Aït-Mokhtar, A., Staquet, S. (2013). Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying. *Cement and Concrete Research*, 43, 25-33.