

Modelisation Numerique De L'infiltration De L'eau De Pluie Et De La Degradation Mecanique Du Parpaing Creux: Application A La Region De Boeny, Madagascar

RAMANAMPAMONJY Jean Claude¹, RAMIANDRA Aina Clarc², HERIPINOANARIMANANA Fenomora Evariste³, VELOMISAINA Dorissia⁴, VAVIZARA Sylvie⁵, HARY Jean⁶, MAXWELL Djaffard⁷

¹Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga

Mahajanga-MADAGASCAR

rabotajc@yahoo.fr

²Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga

Mahajanga-MADAGASCAR

clarcaina@gmail.com

³Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga

Mahajanga-MADAGASCAR

herievariste@gmail.com

⁴Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga

Mahajanga-MADAGASCAR

dorissia.aina@gmail.com

⁵Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga

Mahajanga-MADAGASCAR

vavizarasylvie@yahoo.fr

⁶Institut Supérieur des Sciences et Technologies de Mahajanga

Université de Mahajanga

Mahajanga-MADAGASCAR

jjeanhary@yahoo.com

⁷Institut Supérieur des Sciences et Technologies de Mahajanga

Université de Mahajanga

Mahajanga-MADAGASCAR

djafmax@yahoo.fr

Auteur correspondant : RAMANAMPAMONJY Jean Claude. E-mail : rabotajc@yahoo.fr



Résumé : Cette étude s'inscrit dans une démarche de compréhension et de prévision de la durabilité des matériaux de construction soumis aux conditions climatiques tropicales. Elle propose une modélisation couplée de l'infiltration de l'eau de pluie et de la dégradation mécanique du parpaing creux de 20 cm d'épaisseur, matériau couramment utilisé dans la région de Boeny, au nord-ouest de Madagascar. La première étape consiste à simuler la diffusion de l'humidité dans le matériau à l'aide de la loi de Fick et de l'équation de Richards, permettant d'évaluer la dynamique spatio-temporelle de l'eau dans un mur soumis à des épisodes pluvieux continus. La seconde étape repose sur un modèle empirique de dégradation mécanique intégrant l'effet cumulatif de la pluviométrie annuelle observée et projetée sur la période 2006–2100. Les résultats montrent une perte moyenne de résistance mécanique de 29,1 % entre 2006 et 2100, traduisant une altération progressive du matériau sous l'effet des cycles d'humidification et de séchage. Malgré cette dégradation, la résistance résiduelle demeure supérieure au seuil critique de 15 MPa, indiquant une durée de vie utile estimée à environ 129 ans. Ces résultats confirment la résilience du parpaing creux sous climat tropical humide, tout en soulignant l'importance de l'intégration de mesures de protection contre l'humidité dans les pratiques constructives locales.

Mots-clés : Infiltration, Parpaing creux, Pluviométrie, Durabilité, Modélisation numérique

Abstract : This study aims to understand and predict the durability of construction materials exposed to tropical climatic conditions. It presents a coupled modeling approach of rainfall infiltration and mechanical degradation of a 20 cm hollow concrete block, a material commonly used in the Boeny region in northwestern Madagascar. The first stage involves simulating moisture diffusion within the material using Fick's law and the Richards equation to evaluate the spatio-temporal dynamics of water in a wall subjected to continuous rainfall events. The second stage relies on an empirical mechanical degradation model integrating the cumulative effect of observed and projected annual rainfall over the 2006–2100 period. The results show an average mechanical strength loss of 29.1% between 2006 and 2100, indicating a gradual deterioration of the material due to repeated wetting and drying cycles. Despite this degradation, the residual strength remains above the critical threshold of 15 MPa, suggesting a service life of approximately 129 years. These findings confirm the resilience of hollow concrete blocks under tropical humid climates while emphasizing the importance of incorporating moisture protection measures into local construction practices.

Keywords: Infiltration, Hollow concrete block, Rainfall, Durability, Numerical modeling

I. INTRODUCTION

Dans les zones tropicales humides, la durabilité des matériaux de construction représente un enjeu crucial pour la pérennité des infrastructures. Les conditions climatiques extrêmes, notamment la variabilité et l'intensité des précipitations, exercent une influence directe sur le comportement hydrique et la résistance mécanique des matériaux cimentaires. À Madagascar, et plus particulièrement dans la région de Boeny, le parpaing creux constitue le matériau le plus couramment utilisé dans les bâtiments résidentiels et publics. Cependant, sa porosité élevée favorise l'absorption et la diffusion de l'humidité, le rendant particulièrement vulnérable aux cycles répétés de mouillage et de séchage.

Cette sensibilité soulève une problématique essentielle : comment les conditions pluviométriques tropicales affectent-elles l'évolution hydrique et la résistance mécanique du parpaing creux, et quelle en est l'incidence sur sa durabilité structurelle à long terme ?

Pour répondre à cette question, la présente étude propose une approche de modélisation numérique intégrée visant à coupler les phénomènes d'infiltration de l'eau de pluie et de dégradation mécanique du parpaing creux de 20 cm d'épaisseur. Elle s'inscrit dans une démarche de compréhension et de prévision de la durabilité des matériaux de maçonnerie exposés aux contraintes climatiques de la région de Boeny. La méthodologie adoptée repose sur deux volets complémentaires. Dans un premier temps, une modélisation physique de l'infiltration de l'eau de pluie est développée à partir de la loi de Fick (1855) et de l'équation de Richards (1931), permettant d'analyser la dynamique spatio-temporelle de la diffusion et de la rétention de l'humidité au sein du matériau. Dans un second temps, une modélisation empirique de la dégradation mécanique est proposée, fondée sur une loi de perte progressive de résistance en fonction de la pluviométrie annuelle observée et projetée sur la période 2006–2100. Cette approche

intègre également une analyse de corrélation et d'intercorrélation entre les séries temporelles de précipitations et de résistance, afin de mettre en évidence d'éventuels effets différés liés à la mémoire hydrique du matériau.

L'article est structuré en quatre sections principales. La première présente la méthodologie de modélisation de l'infiltration et de la dégradation mécanique, ainsi que les paramètres physiques utilisés. La deuxième expose les résultats numériques obtenus pour les différents scénarios simulés. La troisième propose une discussion approfondie des processus hydriques et mécaniques observés, en les confrontant au contexte climatique de la région étudiée. Enfin, la quatrième section formule les principales conclusions et recommandations pour l'amélioration de la durabilité des ouvrages en parpaing sous climat tropical humide.

II. METHODE

A. Méthodologie de modélisation de l'infiltration de l'eau de pluie dans un mur en parpaing

1) Présentation du modèle

L'analyse de l'infiltration de l'eau de pluie dans un mur en parpaing creux a été réalisée à l'aide d'un modèle numérique unidimensionnel basé sur la loi de diffusion de Fick. Cette approche permet de simuler l'évolution de la teneur en eau au sein du matériau en fonction du temps et de la profondeur. Le choix de cette méthode repose sur sa capacité à représenter efficacement les transferts d'humidité dans les matériaux poreux lorsque les gradients de teneur en eau sont faibles à modérés [1] [2].

Le modèle considère le mur comme un milieu homogène et isotrope, dont la porosité et la diffusivité sont supposées constantes dans le temps et dans l'espace. L'infiltration est initiée à partir d'une face exposée à la pluie, tandis que la face opposée est considérée comme drainante, ce qui correspond à une hypothèse de mur non protégé soumis à un épisode pluvieux intense.

2) Équation de diffusion de l'humidité

La diffusion de l'eau dans le matériau est décrite par l'équation différentielle partielle suivante :

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

où :

- $\theta(x, t)$ représente la teneur en eau volumique (m^3/m^3) au point (x) et au temps (t),
- (D) est le coefficient de diffusion de l'humidité (m^2/s).

Cette équation est discrétisée numériquement à l'aide du schéma explicite aux différences finies, largement utilisé pour la simulation des transferts diffusifs dans les matériaux de construction [3] [4].

3) Conditions initiales et aux limites

L'état initial du mur est défini par une teneur en eau uniforme ($\theta_i = 0,01$), correspondant à un matériau sec avant exposition à la pluie.

Les conditions aux limites sont définies comme suit :

- Surface exposée à la pluie ($x = 0$) : L'apport d'eau en surface est représenté par un flux de pluie constant, noté (q_p), traduisant le ruissellement ou la pénétration d'eau dans les pores de surface. Cette condition est exprimée par :

$$\theta(0, t + \Delta t) = \min \left[\theta(0, t) + \frac{q_p \Delta t}{\Delta x}, \theta_s \right] \quad (2)$$

où ($\theta_s = 0,12$) représente la teneur en eau à saturation.

- Face interne du mur ($x = L$) : La face opposée est supposée perméable au drainage, de sorte que le gradient de teneur en eau est nul :

$$\frac{\partial \theta(L,t)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Cette hypothèse traduit un mur respirant dont la face interne permet l'évacuation progressive de l'humidité vers l'extérieur [5].

4) Discrétisation numérique et paramètres utilisés

Le mur est discrétisé spatialement en ($N_x = 50$) points selon une épaisseur totale ($L = 0,20$ m), soit un pas spatial ($\Delta x = 0,004$ m). Le pas de temps a été fixé à ($\Delta t = 5$ s) afin de respecter le critère de stabilité de la méthode explicite, donné par la condition de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) :

$$D \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$$

Le coefficient de diffusion a été pris égal à $D = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, valeur couramment observée dans la littérature pour des matériaux cimentaires à porosité moyenne [6].

La simulation a été réalisée sur une durée totale de $T_{max} = 43,200$ s ou 12 heures, représentant un épisode pluvieux prolongé. Le flux de pluie incident a été fixé à $q_p = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, correspondant à une intensité équivalente à une précipitation de 36 mm/h.

5) Validation et limites du modèle

Bien que ce modèle simplifié permette de visualiser l'évolution du front d'humidité dans le mur, il présente certaines limites liées aux hypothèses de constance du coefficient de diffusion et à la négligence des effets de capillarité et de sorption. Des modèles plus avancés, tels que ceux développés par Künzle (1995) ou Mendes et al. (2002), intègrent ces phénomènes et permettent une description plus réaliste du comportement hygroscopique des matériaux poreux.

B. Méthodologie de modélisation de l'infiltration bidimensionnelle dans un mur en parpaing

1) Présentation du modèle physique

Afin de représenter plus fidèlement le comportement hydrique réel d'un mur en parpaing exposé à la pluie, la modélisation a été étendue au cas bidimensionnel selon les directions horizontale (épaisseur, x) et verticale (hauteur, z). Cette modélisation est fondée sur l'équation de Richards [7], qui décrit l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux non saturé, en intégrant à la fois la diffusion capillaire et la gravité.

L'équation générale de Richards s'écrit comme suit :

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \Delta \cdot [K(h) \Delta (h + z)] \quad (4)$$

où :

- h : charge capillaire (m),
- t : temps (s),
- $C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$: capacité hydrique spécifique (m^{-1}),
- $K(h)$: conductivité hydraulique dépendant de l'humidité (m/s),
- θ : teneur en eau volumique (m^3/m^3),
- z : coordonnée verticale (m).

Ce modèle permet de représenter la redistribution de l'eau dans le mur en fonction de la gravité et des gradients de succion, contrairement au modèle 1D purement diffusif basé sur la loi de Fick.

2) Caractéristiques géométriques et conditions de simulation

Le mur a été représenté sous forme d'un domaine rectangulaire de 3,0 m de hauteur et 0,20 m d'épaisseur, correspondant à un mur courant de bâtiment. Le maillage spatial comporte 41 points selon l'épaisseur et 97 points selon la hauteur, assurant une bonne résolution numérique. Le pas spatial est défini par :

$$\Delta x = \frac{L_x}{N_x-1} \text{ et } \Delta z = \frac{L_z}{N_z-1} \quad (5)$$

La durée totale de la simulation est fixée à 24 heures, avec un pas de temps de 60 secondes, soit un total de 1440 pas temporels.

3) Propriétés hydriques du matériau

Le comportement hydrique du parpaing est décrit à l'aide de la loi de rétention d'eau de van Genuchten [8] couplée au modèle de conductivité de Mualem [9]. Ces lois permettent de relier la teneur en eau volumique (θ), la succion h et la conductivité hydraulique $K(h)$:

$$S_e(h) = [1 + (\alpha|h|^n)^{-m}] \quad (6)$$

$$\theta(h) = \theta_r + S_e(h)(\theta_s - \theta_r) \quad (7)$$

$$K(h) = K_s S_e(h)^{1/2} [1 - (1 - S_e(h)^m)^m]^2 \quad (8)$$

avec :

- $\theta_s = 0,12$: teneur en eau à saturation,
- $\theta_r = 0,01$: teneur en eau résiduelle,
- $\alpha = 0,5 \text{ m}^{-1}$ ($n = 1,7$), ($m = 1 - 1/n$),
- $K_s = 10^{-8} \text{ m}$: conductivité hydraulique à saturation.

Ces valeurs sont cohérentes avec celles rapportées pour des matériaux cimentaires à porosité moyenne [10][11].

4) Conditions initiales et aux limites

a) Condition initiale

Avant le début de la pluie, le mur est supposé uniformément sec, avec une pression capillaire constante ($h_0 = 2 \text{ m}$), représentant un état partiellement non saturé.

b) Conditions aux limites

- Face extérieure ($x = 0$) : soumise à une pluie simulée de 10 mm/h pendant 4 heures, représentée par un flux de surface (q_{rain}). Lorsque la pluie est active, la succion de surface est ramenée à ($h = 0$), traduisant un état de saturation temporaire.
- Face intérieure $x = L_x$: condition de flux nul, $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$, correspondant à un mur non exposé à la pluie.
- Haut et bas du mur ($z = 0$ et $z = L_z$) : conditions de flux nul vertical, supposant l'absence d'écoulement significatif vers le haut ou vers le bas.

5) Discrétisation numérique

L'équation de Richards a été résolue numériquement par la méthode des différences finies en schéma implicite simplifié, itéré à chaque pas de temps pour garantir la stabilité numérique. Le calcul de la dérivée temporelle est assuré par un schéma d'Euler implicite :

$$h^{t+\Delta t} = h^t + \frac{\Delta t}{c(h)} \nabla \cdot [K(h) \nabla (h + z)] \quad (9)$$

Le processus itératif se poursuit jusqu'à la convergence du champ de pression (h), selon le critère :

$$\max |h^{k+1} - h^k| < 10^{-5}$$

Les profils d'humidité sont enregistrés toutes les 30 itérations pour permettre le post-traitement et la visualisation de l'évolution du front d'infiltration.

6) Validité et limites du modèle

Le modèle de Richards–van Genuchten offre une description réaliste du comportement hydrique des matériaux poreux non saturés, mais suppose un milieu homogène et isotherme. Il ne prend pas explicitement en compte la variation de température, ni les phénomènes de sorption/désorption d'air, ni la microfissuration pouvant influencer la perméabilité du parpaing. Ces aspects pourraient être intégrés dans des travaux ultérieurs à l'aide de modèles couplés hygrothermiques [5] [4].

C. Méthodologie de modélisation de la diffusion unidimensionnelle de l'humidité dans un mur en parpaing

1) Présentation du modèle physique

La modélisation de la diffusion de l'humidité dans un mur en parpaing repose sur l'application de la loi de diffusion de Fick [12], utilisée pour décrire le transfert d'eau ou de vapeur d'eau au sein d'un milieu poreux sous l'effet d'un gradient de concentration. Dans ce cas, le mur est considéré comme un milieu homogène et isotrope, où la diffusion de l'humidité s'effectue uniquement selon la direction horizontale (épaisseur du mur, x).

L'équation différentielle gouvernant le phénomène s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \mathcal{D} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (10)$$

Où :

- θ : teneur en eau volumique (m^3/m^3)
- t : temps (s)
- \mathcal{D} est le coefficient de diffusion de l'humidité m^2/s)
- x : coordonnée spatiale (m)

Cette équation exprime que la variation temporelle de la teneur en eau est proportionnelle à la dérivée seconde de cette teneur selon la profondeur, représentant la tendance de l'humidité à se redistribuer pour atteindre un état d'équilibre.

2) Caractéristiques géométriques et conditions de simulation

Le mur étudié présente une épaisseur totale de 0,20 mètre, considérée comme représentative d'un mur de bâtiment en parpaing creux. La simulation a été réalisée pour une durée totale de trois jours (72 heures), correspondant à la période de séchage suivant un épisode pluvieux. Cinq profondeurs ont été sélectionnées pour le suivi de l'évolution de la teneur en eau : 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm. Ces points d'observation permettent d'évaluer la propagation de l'humidité depuis la surface exposée à la pluie jusqu'à la face interne du mur. Le pas de temps est ajusté pour couvrir uniformément la période totale de simulation, soit 500 instants calculés, garantissant une bonne résolution temporelle.

3) Propriétés hydriques du matériau

Les propriétés physiques du matériau sont définies à partir de mesures typiques pour le parpaing creux utilisé dans la construction courante. Les valeurs adoptées sont les suivantes :

- $D = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$: coefficient de diffusion de l'humidité,
- $\theta_{sat} = 0,12$: teneur en eau à saturation,

- $\theta_{min} = 0,01$: teneur minimale correspondant à l'état sec.

Ces valeurs sont cohérentes avec les caractéristiques des matériaux cimentaires à porosité moyenne décrites par Hall et Hoff (2011) et Defraeye et al. (2012) [13] [14].

4) Conditions initiales et aux limites

- Condition initiale :

Au début de la simulation, le mur est supposé uniformément sec avec une teneur en eau $\theta = \theta_{min}$ sur toute son épaisseur.

- Condition à la surface exposée ($x = 0$) :

Lors de l'exposition à la pluie, la teneur en eau en surface atteint la valeur de saturation θ_{min}

- Condition en profondeur ($x = L$) :

La face interne du mur n'est pas exposée à la pluie ; un gradient nul de teneur en eau est supposé ($\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$), traduisant une absence de flux d'humidité à ce niveau.

5) Modélisation et résolution analytique

La diffusion de l'humidité dans le mur est modélisée à l'aide d'une solution analytique simplifiée de l'équation de Fick, exprimée par :

$$\theta(t) = \theta_{min} + (\theta_{sat} - \theta_{min})e^{-\frac{D\pi^2 t}{4L^2}} \quad (11)$$

où (L) représente la profondeur considérée dans le mur.

Cette relation permet de déterminer la variation temporelle de la teneur en eau à chaque profondeur donnée, en supposant une diffusion unidirectionnelle depuis la surface humide vers les zones plus sèches.

D. Méthodologie de simulation de la dégradation mécanique du parpaing sous l'effet de la pluviométrie

1) Contexte et objectif du modèle

La durabilité des matériaux de construction, en particulier les parpaings creux utilisés dans les zones tropicales, est fortement influencée par les conditions climatiques, notamment la pluviométrie annuelle. L'humidité excessive induite par les pluies répétées accélère la dégradation physico-mécanique du matériau à travers des processus tels que la dissolution des liants cimentaires, la microfissuration et l'érosion capillaire. L'objectif de cette modélisation est de simuler l'évolution temporelle de la résistance mécanique du parpaing sur la période 2006–2100, en fonction des variations de la pluviométrie annuelle observées et projetées dans la région étudiée (Boeny, Madagascar). Le modèle développé repose sur une loi empirique de dégradation cumulée, intégrant à la fois l'effet des épisodes pluvieux extrêmes et la tendance moyenne d'humidification du matériau.

2) Modèle conceptuel et formulation mathématique

Le modèle proposé considère que la résistance mécanique $R(t)$ du parpaing diminue progressivement au cours du temps selon deux mécanismes principaux :

- Une dégradation instantanée sous fortes pluies, modélisée par un facteur de réduction proportionnel au dépassement d'un seuil pluviométrique annuel ;
- Une dégradation lente cumulative, liée à l'humidité moyenne annuelle.

La loi d'évolution de la résistance s'exprime ainsi :

$$R_{t+1} = \begin{cases} R_t \times (1 - \alpha - \beta H_t), & \text{si } P_t > P_{seuil} \\ R_t \times \left(1 - \frac{\beta H_t}{2}\right), & \text{si } P_t \leq P_{seuil} \end{cases} \quad (12)$$

où :

- R_t : résistance mécanique à l'année t (MPa),
- α : taux de dégradation instantanée lié aux fortes pluies,
- β : coefficient de dégradation cumulée,
- $H_t = P_t / P_{max}$: humidité normalisée (fraction de la pluviométrie maximale),
- P_t : pluviométrie annuelle observée (mm/an),
- P_{seuil} : seuil pluviométrique au-delà duquel la dégradation s'accélère.

Cette formulation permet d'intégrer la non-linéarité de la réponse du matériau : la résistance chute plus rapidement lorsque les années pluvieuses dépassent un certain seuil, tandis qu'en période plus sèche, la dégradation reste limitée.

3) Paramètres physiques et hypothèses de simulation

Les paramètres du modèle ont été choisis sur la base de données expérimentales et de la littérature sur les matériaux cimentaires soumis à des cycles humidité-séchage [13][14]. Les valeurs retenues sont dans le tableau suivant.

TABLEAU I: Parametre du modèle de parpaing creux simulé

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité	Description
Résistance initiale	R_0	25	MPa	résistance moyenne d'un parpaing neuf
Coefficient de dégradation instantanée	α	0.02	-	perte annuelle sous fortes pluies
Coefficient de dégradation cumulée	β	0.001	-	effet d'humidité moyenne
Seuil pluviométrique	P_{seuil}	1800	mm/an	limite de forte humidité annuelle
Pluviométrie moyenne régionale	P_{moy}	1300	mm/an	typique de la région de Boeny

L'étude porte sur une période de 95 ans (2006–2100), en utilisant les données annuelles de pluviométrie mesurées et prévues.

4) Discussion et limites du modèle

Ce modèle empirique présente l'avantage d'être simple à implémenter et d'intégrer les effets pluviométriques observés localement. Cependant, il repose sur certaines hypothèses simplificatrices :

- le matériau est supposé homogène et ne tient pas compte des hétérogénéités internes du parpaing ;
- l'effet de la température et des cycles d'humidité-séchage n'est pas explicitement modélisé ;
- la dégradation chimique et la carbonatation ne sont pas incluses dans cette version.

Malgré ces limites, ce modèle fournit une base réaliste d'évaluation de la durabilité des parpaings sous climat tropical humide et peut être couplé ultérieurement à des modèles hygrothermiques ou mécaniques plus avancés.

E. Méthodologie d'analyse de la relation entre la pluviométrie et la résistance mécanique du parpaing

1) Corrélation simple entre pluviométrie et perte de résistance

L'effet direct de la pluviométrie annuelle sur la résistance mécanique du parpaing a été évalué à l'aide d'une analyse de corrélation linéaire. Cette méthode consiste à calculer le coefficient de corrélation de Pearson entre la pluviométrie annuelle P et la perte annuelle de résistance ΔR , selon la relation :

$$r = \frac{Cov(P, \Delta R)}{\sigma_P \sigma_{\Delta R}} \quad (13)$$

où $Cov(P, \Delta R)$ représente la covariance entre les deux séries et σ_P sigma, $\sigma_{\Delta R}$ leurs écarts-types respectifs. Le coefficient (r) varie entre -1 et 1 et indique la force et la direction de la relation linéaire. Une valeur positive signifie que les années de forte pluviométrie coïncident avec une perte accrue de résistance du parpaing, tandis qu'une valeur négative traduirait une relation inverse. La p-value associée permet de tester la significativité statistique de cette corrélation [15].

Cette approche présente l'avantage de fournir une quantification directe de l'effet annuel de la pluie sur la résistance, mais elle est limitée par le fait qu'elle ne prend en compte que la relation année par année, ne révélant pas d'éventuels effets retardés ou cumulatifs.

2) Intercorrélation pour détecter les effets retardés

Pour explorer la possibilité que la pluviométrie influence la résistance du parpaing avec un décalage temporel, une analyse d'intercorrélation normalisée a été effectuée. Cette méthode permet d'évaluer la corrélation entre deux séries temporelles décalées, en calculant le coefficient $r_{xy}(k)$ pour différents lags k :

$$r_{xy}(k) = \frac{\sum_t (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_t (x_t - \bar{x})^2 \sum_t (y_{t+k} - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

où x_t correspond à la pluviométrie annuelle et y_t à la résistance du parpaing. Un pic dans la fonction d'intercorrélacion pour un décalage (k) indique que la pluviométrie d'une année influence la résistance (k) années plus tard, révélant ainsi un effet retardé ou cumulé. Cette méthode est particulièrement pertinente pour des matériaux soumis à une dégradation progressive, comme le béton ou le parpaing exposé aux conditions climatiques extrêmes [16].

L'intercorrélacion normalisée présente l'avantage d'identifier la durée du retard et l'intensité de l'effet pluviométrique sur la dégradation du matériau, mais elle nécessite une interprétation prudente pour s'assurer que le retard observé est physiquement plausible et cohérent avec les mécanismes de dégradation.

F. Méthodologie d'estimation de la durée de vie utile du parpaing creux

L'évaluation de la durée de vie utile d'un matériau de construction repose sur la compréhension de ses mécanismes de dégradation en fonction des facteurs environnementaux. Dans le cas du parpaing creux, la résistance mécanique tend à diminuer au fil du temps sous l'effet combiné de la pluviométrie, de l'humidité et des cycles de séchage [17] [18]. La présente méthodologie vise à estimer la période au-delà de laquelle la résistance du parpaing devient inférieure au seuil critique admis pour les éléments structuraux, en intégrant les effets climatiques propres à la zone d'étude. Les données utilisées proviennent des séries chronologiques de pluviométrie annuelle observée et projetée sur la période 2006–2100, ainsi que des essais de résistance à la compression réalisés sur des parpaings creux de 20 cm.

1) Modélisation de la dégradation de la résistance

L'évolution de la résistance du parpaing au cours du temps est modélisée à partir d'une loi de dégradation continue. Selon les approches couramment utilisées en ingénierie des matériaux [19], cette dégradation peut être représentée soit par un modèle linéaire, soit par un modèle exponentiel, selon les conditions d'exposition :

$$R_t = R_0 \times (1 - \alpha t) \quad (15)$$

Où

$$R_t = R_0 \times e^{-\beta t} \quad (16)$$

où :

- R_t est la résistance à l'année (t) ;
- R_0 est la résistance initiale du parpaing ;
- α ou β est le taux moyen annuel de dégradation ;
- t est le temps écoulé depuis le début de l'exposition.

Le choix du modèle dépend de la nature des données expérimentales et de la stabilité des conditions environnementales. Le modèle linéaire est généralement privilégié lorsque la dégradation est progressive et régulière, tandis que le modèle exponentiel s'applique mieux aux matériaux soumis à des conditions climatiques fluctuantes.

2) Estimation de la durée de vie utile

La durée de vie utile T_v correspond à la période au terme de laquelle la résistance mécanique du parpaing devient inférieure à une valeur seuil R_c , fixée en fonction des exigences structurelles. En isolant T_v dans les équations précédentes, on obtient :

$$T_v = \frac{R_0 - R_c}{R_0 \alpha} \quad (\text{modèle linéaire}) \quad (17)$$

ou

$$T_v = -\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R_c}{R_0}\right) \quad (\text{modèle exponentiel}) \quad (18)$$

Ces expressions permettent d'estimer la durée de vie théorique du matériau à partir du taux de dégradation moyen, obtenu par ajustement des données expérimentales. La méthodologie adoptée repose sur une approche intégrée combinant l'analyse statistique, la modélisation du vieillissement du matériau et la validation empirique. Elle offre un cadre rigoureux pour estimer la durabilité du parpaing creux dans des environnements soumis à une forte variabilité pluviométrique. Ce type d'approche contribue à la planification de la maintenance des ouvrages, à l'adaptation des matériaux aux conditions locales et à l'amélioration de la résilience des constructions face aux effets du climat.

III. RESULTATS

A. Infiltration simple d'eau de pluie dans un mur en parpaing (1d)

La Figure 1 illustre l'évolution temporelle des profils de teneur en eau à travers l'épaisseur d'un mur en parpaing soumis à une pluie continue. Aux temps initiaux, l'humidité est principalement concentrée à la surface du mur, avec une teneur maximale proche de 0,12, tandis que le cœur du matériau reste pratiquement sec. Cette répartition met en évidence une infiltration limitée aux premiers centimètres, caractéristique d'une phase de mouillage superficiel. Après environ six heures, l'humidité progresse significativement en profondeur : la teneur en eau devient perceptible jusqu'à 0,15 m, traduisant une diffusion progressive du front d'humidité à l'intérieur du mur. À douze heures, la teneur en eau tend à s'uniformiser, oscillant entre 0,113 et 0,12 sur l'ensemble de l'épaisseur. Le gradient initial s'atténue, indiquant que la diffusion atteint un état quasi équilibré entre la surface et le cœur du mur. Après vingt-quatre heures de pluie continue, le profil devient presque plat avec une teneur uniforme avoisinant 0,12, signe d'une saturation généralisée du matériau. Cette homogénéisation traduit l'atteinte d'un état stationnaire, où la capacité d'absorption du mur est épuisée.

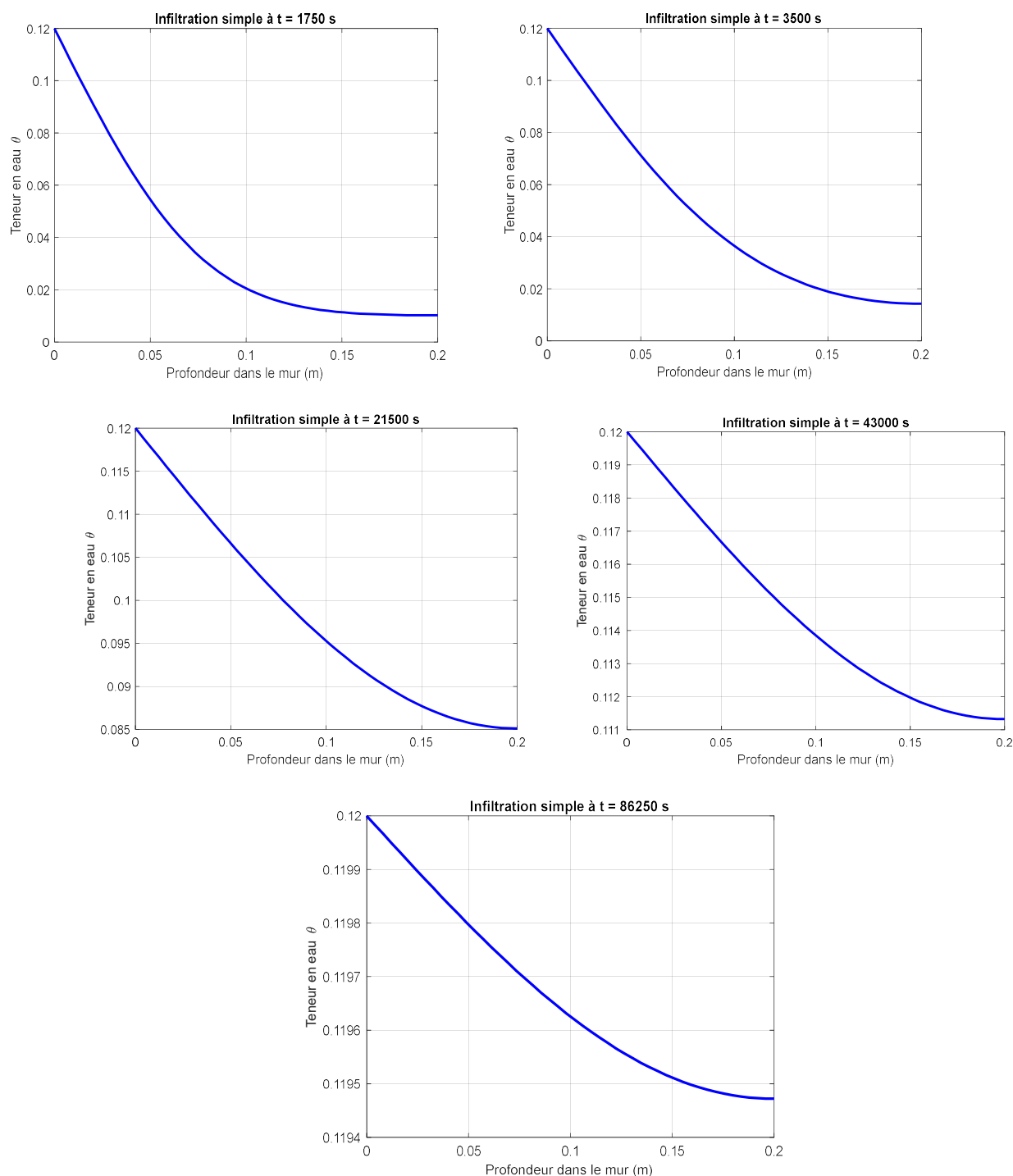


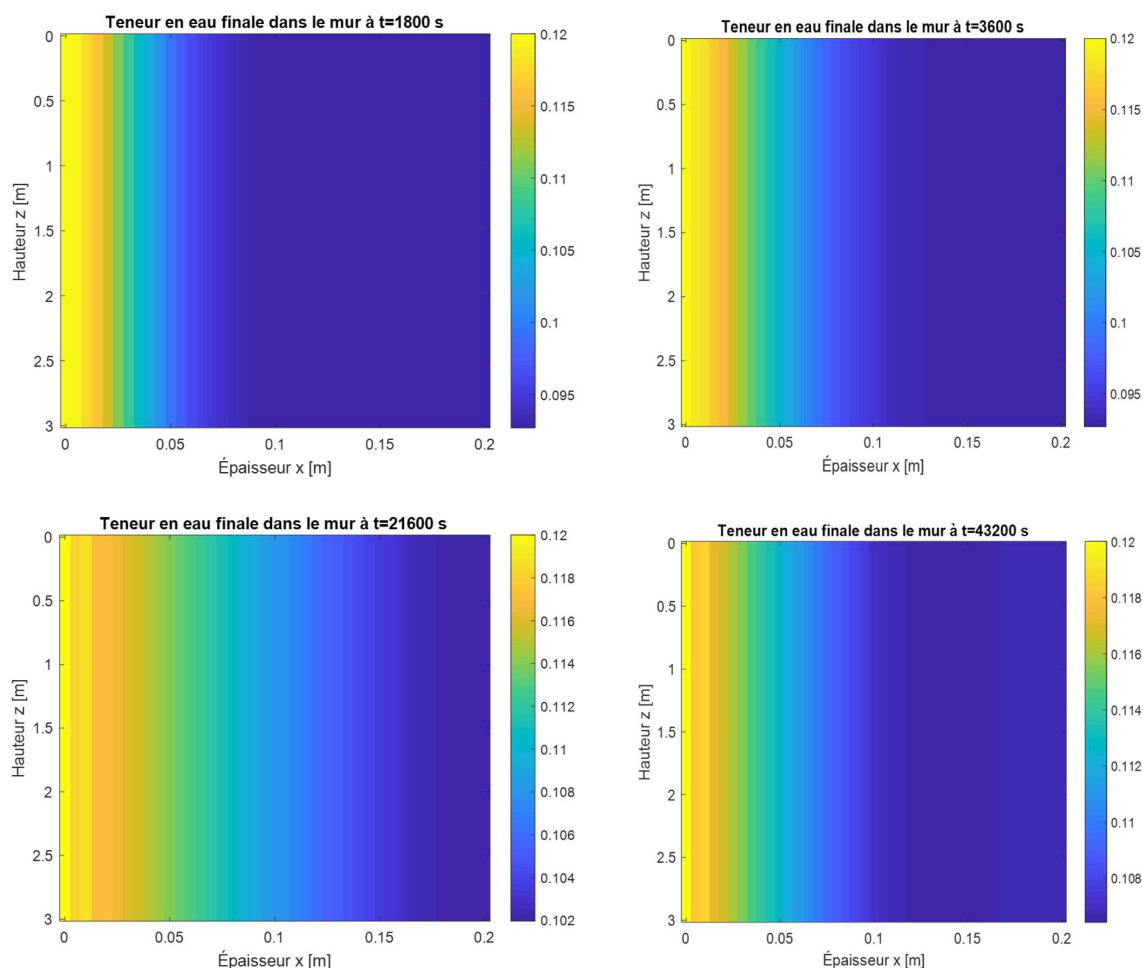
Fig 1. Evolution temporelle des profils de teneur en eau à travers l'épaisseur d'un mur en parpaing

B. Infiltration simple d'eau de pluie dans un mur en parpaing (2d)

La figure 2 présente l'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau dans un mur en parpaing au cours d'une infiltration simple d'eau de pluie, simulée en deux dimensions. Chaque sous-figure correspond à un instant donné ($t = 1800$ s, 7200 s, 21600 s, 43200 s).

s et 24 h) et illustre la distribution de l'humidité selon l'épaisseur (axe x) et la hauteur (axe z) du mur. Au début de l'infiltration ($t = 1800$ s), l'humidité est concentrée dans la zone proche de la surface exposée à la pluie ($x = 0$ m). La teneur en eau y atteint sa valeur maximale (environ 0,12), tandis que le reste du mur demeure encore sec. Cette répartition traduit une pénétration initiale rapide de l'eau dans la première couche du matériau, dominée par la capillarité superficielle. À $t = 7200$ s et $t = 21600$ s, on observe une progression du front d'humidité vers l'intérieur du mur. La diffusion de l'eau reste toutefois limitée, avec une décroissance progressive de la teneur en eau en fonction de l'épaisseur. La distribution de l'humidité conserve une forme quasi-linéaire, typique d'un transfert diffusif en régime transitoire. À $t = 43200$ s et après 24 heures, le profil d'humidité tend vers un état quasi-stationnaire : le front d'infiltration s'est stabilisé, et la teneur en eau atteint un gradient plus faible entre la face externe et la face interne. Cette stabilisation indique que le mur a atteint un équilibre hygroscopique entre l'apport d'eau en surface et la diffusion interne. L'humidité résiduelle reste concentrée dans la zone superficielle, confirmant la faible perméabilité du parpaing et sa capacité de rétention modérée.

Ce comportement est caractéristique d'un matériau poreux à porosité moyenne, où les transferts d'eau se font principalement par diffusion capillaire lente. Dans le contexte climatique du Boeny, cette simulation met en évidence la vulnérabilité des murs en parpaing aux épisodes pluvieux répétés : l'eau s'infiltre peu en profondeur, mais la rétention superficielle peut favoriser la dégradation des parements extérieurs, notamment sous l'effet de cycles successifs de mouillage et de séchage



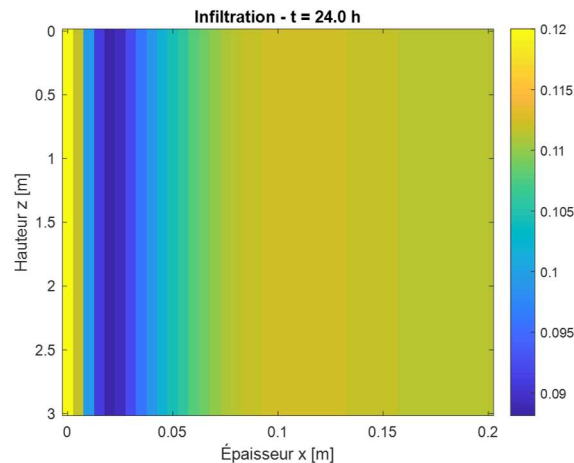


Fig 2. Evolution spatio-temporelle de la teneur en eau dans un mur en parpaing

C. Analyse de l'évolution temporelle de la teneur en eau

La Figure 3 illustre l'évolution de la teneur en eau, exprimée en fraction volumique, en fonction du temps et de la profondeur dans le mur étudié. Les profils simulés pour différentes profondeurs (0, 5, 10, 15 et 20 cm) mettent en évidence une diminution progressive de l'humidité au fil du temps, traduisant un processus d'assèchement consécutif à une phase d'humidification initiale. La décroissance est particulièrement rapide à la surface (0 cm), où la teneur en eau chute presque instantanément vers une valeur proche de zéro. Ce comportement traduit un gradient d'humidité élevé entre la surface du matériau et l'air ambiant, favorisant une évaporation intense. Aux profondeurs de 5 cm et 10 cm, la baisse d'humidité demeure marquée mais légèrement retardée, témoignant d'une diffusion capillaire du front d'assèchement vers les couches internes du mur. En revanche, à 15 cm et surtout à 20 cm, la diminution devient plus lente et progressive. L'humidité résiduelle y persiste plus longtemps, indiquant un transfert hydrique plus atténué en profondeur et une capacité de rétention plus élevée du matériau à ces niveaux.

Ce comportement illustre un processus de diffusion non linéaire de l'humidité dans un milieu poreux, où la vitesse de transfert dépend fortement de la teneur en eau locale et des propriétés hydrauliques internes du parpaing.

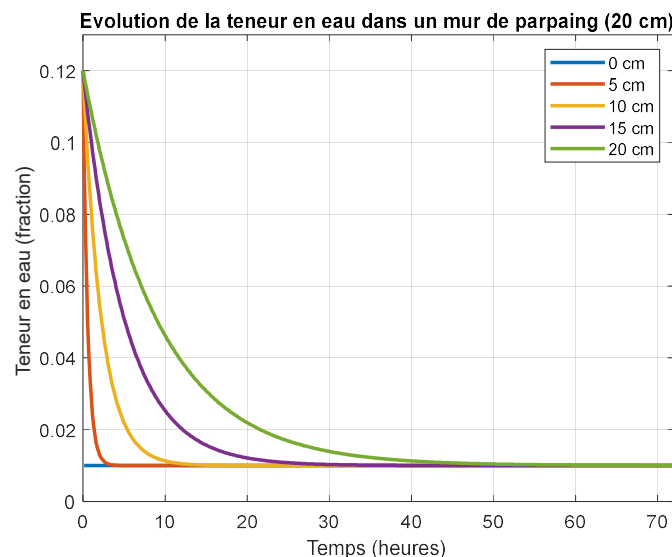


Fig 3. Évolution de la teneur en eau, exprimée en fraction volumique, en fonction du temps et de la profondeur dans le mur

D. Simulation de l'évolution de la résistance mécanique du parpaing creux (épaisseur 20 cm) de 2006 à 2100

La Figure 4 présente l'évolution simulée de la résistance mécanique moyenne d'un parpaing creux de 20 cm d'épaisseur sur la période 2006–2100, à partir des données climatiques projetées et corrigées de biais issues du modèle CanESM2. La résistance initiale, estimée à 25 MPa en 2006, diminue progressivement pour atteindre 17,34 MPa en 2100, soit une perte relative de 29,1 % sur la période étudiée.

La courbe présente une forme en paliers successifs, traduisant une dégradation progressive et discontinue de la résistance mécanique. Chaque palier de diminution correspond à une phase d'endommagement liée à des épisodes pluvieux intenses, suivie d'une phase de stabilisation où le matériau retrouve un équilibre temporaire. Cette évolution met en évidence l'effet cumulé des cycles d'humidification et de séchage, qui entraînent l'apparition de microfissures et l'altération du liant cimentaire.

L'ensemble des résultats indique que les précipitations annuelles projetées exercent une influence significative sur la dégradation mécanique du parpaing creux, en raison de sa forte porosité et de sa capacité d'absorption élevée.

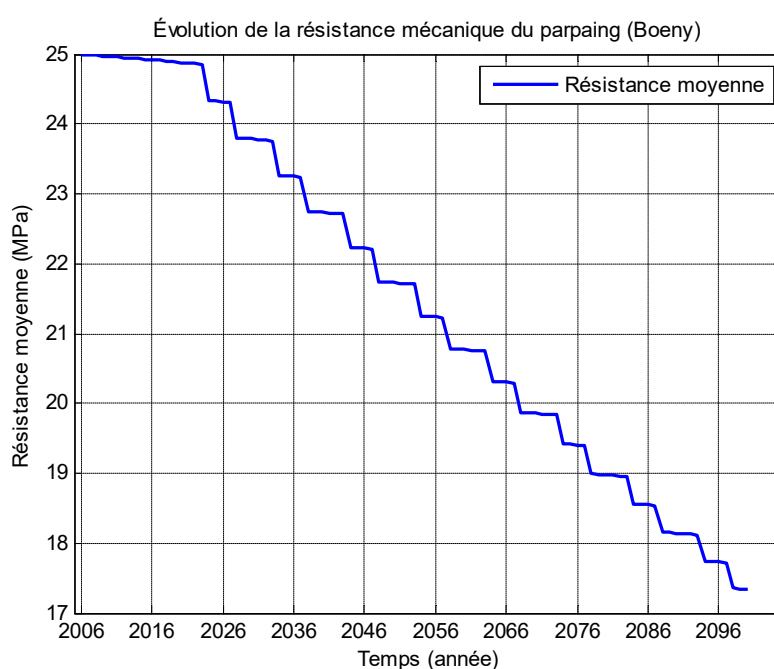


Fig 4. Evolution simulée de la résistance mécanique moyenne d'un parpaing creux

E. Correlation entre la pluviométrie annuelle et la perte de resistance du parpaing creux

La Figure 5 présente les résultats de l'analyse de corrélation entre la pluviométrie annuelle et la perte de résistance mécanique du parpaing creux. Le coefficient de corrélation obtenu est de -0,790, accompagné d'une valeur p égale à 0, soit $p < 0,01$.

Le signe négatif du coefficient indique l'existence d'une relation inverse entre les deux variables : lorsque la pluviométrie augmente, la résistance du parpaing diminue. L'amplitude du coefficient, proche de 0,8, traduit une corrélation relativement forte, suggérant une dépendance marquée entre les conditions hydriques et les propriétés mécaniques du matériau.

La valeur p extrêmement faible confirme que cette corrélation est hautement significative au seuil de 1 %, ce qui exclut la possibilité que la relation observée soit due au hasard. Ces résultats mettent donc en évidence une interaction statistiquement robuste entre la variabilité des précipitations et la dégradation mécanique du matériau.

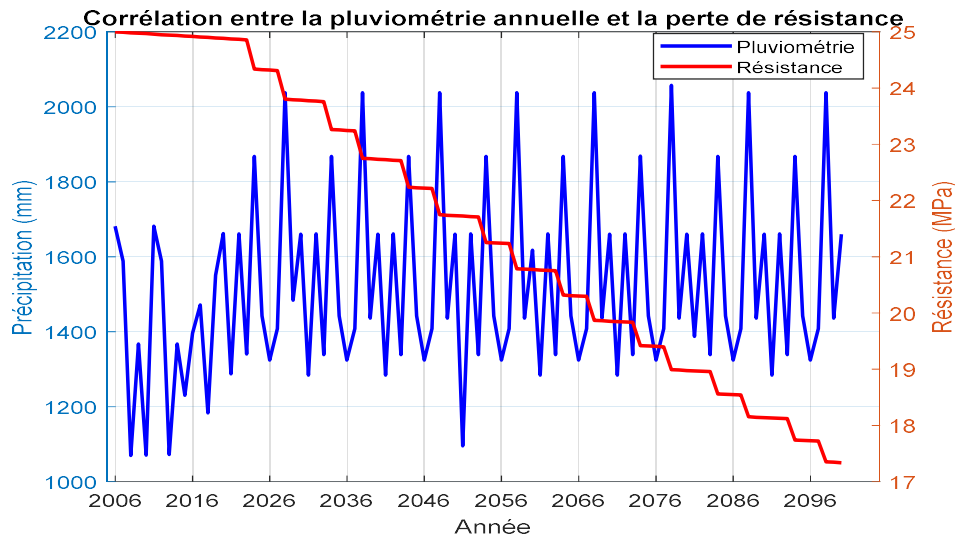


Fig 5. Résultats de l'analyse de corrélation entre la pluviométrie annuelle et la perte de résistance

F. Analyse de la fonction d'intercorrélation entre la pluviométrie et la résistance du parpaing

La Figure 6 illustre la fonction d'intercorrélation entre la pluviométrie annuelle et la résistance mécanique du parpaing creux sur la période 2006–2100. Les résultats montrent que le coefficient d'intercorrélation le plus élevé est observé pour un décalage temporel de -7 ans, avec une valeur de -0,3807. Le signe négatif du coefficient indique une relation inverse entre les deux séries temporelles : une augmentation de la pluviométrie au cours d'une année donnée tend à être suivie, après un certain décalage temporel, d'une diminution de la résistance mécanique du matériau. Ce retard de sept ans traduit un effet différé de l'humidité sur la dégradation du parpaing, correspondant au temps nécessaire pour que les phénomènes de saturation, de diffusion de l'eau et d'altération du liant cimentaire se manifestent pleinement à l'échelle du matériau. La présence d'un coefficient significatif pour ce décalage confirme que la dégradation mécanique du parpaing ne résulte pas uniquement d'une exposition instantanée à la pluie, mais d'une accumulation d'effets hydriques dans le temps.

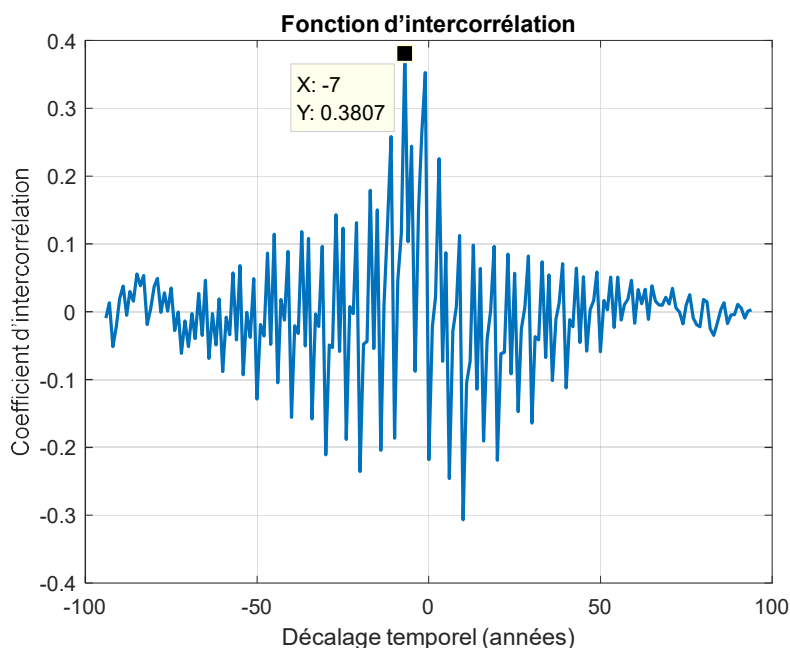


Fig 6. Courbe de fonction d'intercorrélation entre la pluviométrie annuelle et la résistance mécanique du parpaing creux

G. Estimation de la période de vie utile résiduelle du matériau

L'évaluation de la dégradation mécanique du parpaing creux de 20 cm d'épaisseur sous l'effet des conditions climatiques locales montre une diminution progressive de la résistance au cours de la période 2006–2100. La résistance initiale, estimée à 25 MPa en 2006, chute à environ 17,7 MPa à l'horizon 2100, ce qui correspond à une perte relative de 29,1 %. Cette baisse graduelle traduit l'effet cumulatif des précipitations et de l'humidité ambiante sur la performance mécanique du matériau. La résistance résiduelle obtenue demeure toutefois supérieure au seuil critique de 15 MPa, considéré comme la limite de performance structurelle minimale. Ce résultat indique que, malgré les contraintes hydriques auxquelles le matériau est soumis, le parpaing conserve une capacité portante acceptable à la fin de la période d'étude. L'extrapolation linéaire du processus de dégradation suggère que le seuil critique serait atteint vers l'année 2135, soit après environ 129 ans d'exposition. Cette tendance met en évidence une durabilité appréciable du parpaing creux dans les conditions climatiques spécifiques de la zone d'étude, marquées par une alternance entre saisons humides et sèches.

IV. DISCUSSION

L'analyse des différents résultats obtenus permet de mieux comprendre le comportement hydrique et mécanique du parpaing creux soumis aux conditions climatiques de la région de Boeny. Dans un premier temps, l'évolution observée sur la Figure 1 met en évidence la cinétique de diffusion de l'humidité au sein du matériau lorsqu'il est exposé à un apport hydrique continu. La saturation rapide constatée témoigne d'une forte porosité ouverte, favorisant la migration de l'eau par capillarité et diffusion hygroscopique. À mesure que le gradient de teneur en eau s'atténue, l'humidité pénètre progressivement dans l'ensemble du mur, ce qui se traduit par une réduction du potentiel d'isolation thermique et une augmentation de la masse volumique apparente. Ces transformations physiques ne sont pas anodines, puisqu'elles participent, à long terme, à la dégradation mécanique du matériau par altération du liant cimentaire et apparition de microfissures sous l'effet répété des cycles d'humidification et de séchage. Ainsi, les résultats de la Figure 1 confirment qu'en l'absence de protection, un mur en parpaing peut atteindre un état de saturation quasi totale en moins d'une journée, soulignant la nécessité d'adopter des dispositifs de protection hydrique tels que les enduits étanches, les peintures hydrofuges ou encore des systèmes de drainage adaptés.

Dans un second temps, l'examen des résultats de la Figure 2 met en évidence la nature différenciée du processus de séchage. En effet, si la surface du mur s'assèche rapidement sous l'effet combiné du gradient hygrométrique et des températures élevées, l'humidité persiste en profondeur, révélant un transfert diffusif limité dans les zones internes. Ce phénomène s'explique par la présence d'une porosité partiellement fermée et d'une faible conductivité hydraulique. Le séchage se déroule donc selon une cinétique non uniforme, dépendante à la fois de la profondeur et de la teneur initiale en eau. Dans le contexte climatique de la région de Boeny, caractérisé par une forte évapotranspiration, cette dynamique entraîne un assèchement rapide des couches superficielles mais une rétention d'humidité en profondeur. Cette hétérogénéité d'humidité influence directement les transferts thermiques à travers le mur et favorise la formation de contraintes internes susceptibles d'altérer la microstructure du matériau à long terme.

Par ailleurs, les résultats présentés à la Figure 3 illustrent la vulnérabilité du parpaing creux face aux variations hydriques saisonnières typiques du climat tropical humide. L'alternance entre saisons pluvieuses et périodes sèches crée des gradients d'humidité répétés, à l'origine de contraintes internes et de microfissurations du réseau poreux. Ces phénomènes induisent une dégradation progressive du liant cimentaire et une diminution de la cohésion interne, ce qui se traduit par une baisse graduelle de la résistance mécanique du matériau. À long terme, cette perte, estimée à près du tiers de la résistance initiale, met en évidence le rôle prépondérant des conditions climatiques dans la durabilité des matériaux de construction. Il est donc essentiel d'adopter des stratégies constructives adaptées, telles que l'amélioration de la compacité du matériau, l'incorporation d'adjuvants hydrofuges, l'application de revêtements protecteurs étanches ou la mise en place de systèmes de drainage efficaces, afin de limiter les effets cumulatifs des cycles hydriques.

En complément, l'analyse de la Figure 4 met en évidence une relation inverse entre la pluviométrie annuelle et la résistance mécanique du parpaing. L'augmentation des précipitations intensifie les cycles d'humidification et de séchage, accélérant la détérioration du liant cimentaire et la microfissuration du matériau. Dans le contexte de la région de Boeny, cette relation met en lumière la vulnérabilité structurelle des constructions non protégées face aux fluctuations climatiques. Dès lors, la mise en œuvre de solutions préventives apparaît indispensable, notamment par l'emploi de formulations cimentaires plus denses, l'ajout d'adjuvants hydrofuges, la protection des surfaces exposées par des revêtements imperméables ou encore une meilleure gestion des eaux de ruissellement. Ces mesures contribueraient à renforcer la résistance mécanique du matériau et à prolonger la durée de vie des ouvrages dans des environnements à forte humidité.

Enfin, les résultats de la Figure 5 révèlent l'existence d'une corrélation temporelle différée entre la pluviométrie et la résistance mécanique, traduisant une véritable mémoire hydrique du matériau. Le décalage temporel observé, estimé à environ sept ans, suggère que les effets des précipitations ne se manifestent pas immédiatement, mais s'accumulent lentement jusqu'à atteindre un seuil critique de dégradation. Ce comportement peut être attribué à des processus d'endommagement progressifs, tels que l'altération du liant cimentaire, l'augmentation de la porosité ouverte et la propagation de microfissures internes. Dans ce contexte, il devient essentiel d'intégrer la dimension temporelle dans les analyses de durabilité, car la dégradation du parpaing creux ne résulte pas d'un événement isolé, mais d'une succession d'expositions climatiques répétées au fil des années.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus confirment la relative résistance à long terme du parpaing creux face aux conditions tropicales humides. La lenteur du processus de dégradation observée peut être attribuée à la compacité du matériau, à sa faible perméabilité capillaire ainsi qu'à la qualité du liant cimentaire, qui limitent la pénétration de l'eau et ralentissent l'altération interne. Bien que les précipitations intenses de la région de Boeny puissent provoquer des phénomènes de dégradation, elles n'entraînent pas une perte accélérée de performance, ce qui confirme la stabilité structurelle du matériau à moyen et long terme. Toutefois, pour garantir une durabilité optimale, il apparaît nécessaire d'intégrer des considérations climatiques dès la conception des bâtiments. L'amélioration de la formulation du parpaing, l'usage d'adjuvants hydrofuges, l'optimisation de la granulométrie et l'application de revêtements protecteurs constituent des leviers essentiels pour prolonger la durée de vie utile des ouvrages et renforcer leur résilience face aux agressions hydriques propres aux zones tropicales humides.

V. CONCLUSION

L'étude menée a permis de caractériser de manière intégrée l'impact de la pluviométrie sur le comportement hydrique et la dégradation mécanique du parpaing creux utilisé dans la région de Boeny. Les simulations numériques d'infiltration montrent que

sous une pluie continue, la saturation du mur intervient en moins de vingt-quatre heures, traduisant une diffusion rapide de l'humidité à travers la matrice poreuse du matériau. Ce processus d'humidification accélérée constitue un facteur clé de dégradation progressive des propriétés mécaniques au fil du temps. La modélisation empirique de la résistance mécanique a révélé une perte moyenne de 29,1 % sur la période 2006–2100, correspondant à une résistance résiduelle de 17,7 MPa en 2100. Cette valeur demeure supérieure au seuil critique de 15 MPa, indiquant que le matériau conserve une capacité portante acceptable. L'extrapolation du modèle de dégradation suggère une durée de vie utile d'environ 129 ans, ce qui témoigne d'une résilience notable du parpaing creux sous climat tropical humide. Ces résultats confirment que la dégradation du matériau n'est pas instantanée mais progressive, résultant de l'effet cumulé des cycles d'humidification et de séchage. Ils concordent avec les observations de Lubeck et al. (2012) et d'Ahmad et al. (2015), qui ont montré que les matériaux cimentaires soumis à des environnements tropicaux humides subissent une altération lente, dominée par la dissolution des hydrates et la microfissuration. En outre, les analyses de corrélation et d'intercorrélation ont mis en évidence l'existence d'un effet différé d'environ sept ans entre la pluviométrie et la résistance du matériau, traduisant une mémoire hydrique à long terme. Ce comportement souligne la nécessité de prendre en compte la dimension temporelle dans les études de durabilité des matériaux de maçonnerie.

Sur le plan pratique, les résultats obtenus plaident en faveur de l'intégration de mesures préventives dans les pratiques constructives locales. Parmi les plus pertinentes figurent l'amélioration de la compacité du parpaing, l'utilisation d'adjuvants hydrofuges, l'application de revêtements protecteurs étanches et la mise en place de dispositifs de drainage efficaces. La méthodologie proposée constitue un outil fiable d'évaluation prévisionnelle de la durabilité des matériaux sous climat tropical humide. Elle offre des perspectives concrètes pour la conception de bâtiments plus durables et résilients face aux variations climatiques, contribuant ainsi à la promotion d'une construction adaptée et durable dans la région Boeny. 55

REFERENCES

- [1] Philip, J. R., & de Vries, D. A. (1957). *Moisture movement in porous materials under temperature gradients*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(2), pp.222–232.
- [2] Luikov, A. V. (1966). *Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies*. Pergamon Press.
- [3] Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press.
- [4] Mendes, N., Philippi, P. C., & Lamberts, R. (2002). *A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(3), pp.509–518.
- [5] Künzeli, H. M. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Fraunhofer IRB Verlag.
- [6] Hall, C., & Hoff, W. D. (2011). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*. CRC Press.
- [7] Richards, L. A. (1931). *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. *Physics*, 1(5), 318–333.
- [8] van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- [9] Mualem, Y. (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. *Water Resources Research*, 12(3), 513–522.
- [10] Hall, C., & Hoff, W. D. (2011). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*. CRC Press.
- [11] Defraeye, T., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2012). *Convective heat and mass transfer coefficients for exterior building surfaces: Simulations versus correlations*. *Building and Environment*, 56, 150–158.

- [12] Fick, A. (1855). *Ueber Diffusion*. *Annalen der Physik*, 170(1), 59–86.
- [13] Hall, C., & Hoff, W. D. (2011). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*. CRC Press.
- [14] Defraeye, T., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2012). *Convective heat and mass transfer coefficients for exterior building surfaces: Simulations versus correlations*. *Building and Environment*, 56, 150–158.
- [15] Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.
- [16] Goswami, B., Singh, R., & Kumar, P. (2017). *Durability of concrete structures under cyclic rainfall conditions: Modeling and prediction*. *Construction and Building Materials*, 136, 374–384.
- [17] Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- [18] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- [19] Basheer, P. A. M., Long, A. E., & Montgomery, F. R. (2001). *The assessment of durability of concrete from its permeation properties: A review*. *Construction and Building Materials*, 15(2–3), 93–103.