

Etude Numérique De La Pénétration Des Chlorures Dans Le Béton Par La Méthode Des Eléments Finis

¹HERIPINOANARIMANANA Fenomora Evariste, ²RAMIANDRA Aina Clarc, ³RAMANAMPAMONJY Jean Claude, ⁴VELOMISAINA Dorissia, ⁵VAVIZARA Sylvie, ⁶HARY Jean, ⁷MAXWELL Djaffard

¹Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
herievariste@gmail.com

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
rabotajc@yahoo.fr

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

⁶Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
jjeanhary@yahoo.com

⁷Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
djafmax@yahoo.fr

Auteur correspondant: HERIPINOANARIMANANA Fenomora Evariste. E-mail : herievariste@gmail.com



Résumé : L'étude présente une modélisation numérique de la pénétration des ions chlorure dans le béton armé exposé en milieu marin, en utilisant la méthode des éléments finis sous MATLAB. Elle vise à analyser la diffusion des chlorures en fonction du temps (1 à 40 ans) et de la porosité du béton, caractérisée par le coefficient de diffusion apparent (D_0). Deux environnements sont simulés : la zone de marnage et la zone submergée. Les résultats montrent que plus la porosité est élevée, plus la pénétration des chlorures est profonde et rapide, augmentant le risque de corrosion des armatures. En zone de marnage, la diffusion reste relativement limitée mais progresse avec le temps ; en zone submergée, la pénétration est plus lente initialement mais s'intensifie sur le long terme, atteignant jusqu'à 10 cm après 40 ans. Les profils obtenus confirment l'importance d'un enrobage suffisant, estimé à 6 cm en marnage et 11 cm en submergé, pour assurer la durabilité des structures en béton armé face à l'agression chlorurée.

Mots-clés : Pénétration des chlorures, Durabilité du béton armé, Méthode des éléments finis, Diffusion-convection, Coefficient de diffusion apparent (D_0), Porosité du béton, Modélisation numérique, Milieu marin, Zone marnage, Zone submergée, Enrobage des armatures, Initiation de la corrosion, Simulation spatio-temporelle, Transport d'ions chlorure.

Abstract: The study presents a numerical modeling of the penetration of chloride ions into reinforced concrete exposed in a marine environment, using the finite element method in MATLAB. It aims to analyze the diffusion of chlorides as a function of time (1 to 40 years) and the porosity of the concrete, characterized by the apparent diffusion coefficient (D_0). Two environments are simulated: the tidal zone and the submerged zone. The results show that the higher the porosity, the deeper and faster the chloride penetration, increasing the risk of corrosion of the reinforcements. In the tidal zone, diffusion remains relatively limited but progresses over time; in the submerged zone, penetration is slower initially but intensifies in the long term, reaching up to 10 cm after 40 years. The profiles obtained confirm the importance of a sufficient cover, estimated at 6 cm in the tidal zone and 11 cm in the submerged zone, to ensure the durability of reinforced concrete structures against chloride aggression.

Keywords: Chloride penetration, Durability of reinforced concrete, Finite element method, Diffusion-convection, Apparent diffusion coefficient (D_0), Concrete porosity, Numerical modeling, Marine environment, Tidal zone, Submerged zone, Reinforcement coating, Corrosion initiation, Spatio-temporal simulation, Transport of chloride ions.

I. INTRODUCTION

La pénétration des ions chlorure dans le béton armé constitue un enjeu majeur pour la durabilité des structures. Ces ions, lorsqu'ils atteignent les armatures en acier, peuvent initier des processus de corrosion qui compromettent la stabilité des ouvrages. Afin de mieux comprendre et prédire ce phénomène, de nombreuses études ont été menées, tant sur le plan expérimental que numérique. Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis. Cette étude se concentre sur la simulation de la diffusion des ions chlorure dans le béton. Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'influence de différents paramètres, tels que la porosité du béton et la concentration en ions chlorure à la surface, sur la vitesse de pénétration. Bien que ce modèle ne rende pas compte de toute la complexité du phénomène réel, il constitue une première étape pour mieux comprendre les mécanismes de transport des ions chlorure dans le béton.

II. MATERIELS ET METHODES

A. Matériels :

Pour réaliser les simulations, nous avons utilisé le logiciel Matlab qui est un logiciel commercial de calcul interactif. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée des équations différentielles, des équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires, par le biais de méthodes itératives et d'algorithmes numériques. Nous avons érigé un programme sous Matlab pour la résolution numérique par la mise en œuvre de la méthode des éléments finis.

B. Méthodes :

La méthode des éléments finis est une méthode numérique permettant d'approximer les solutions des équations aux dérivées partielles (1).

Elle permet de construire une approximation simple des inconnues en transformant ces équations continues en un système d'équations de dimension finie, que l'on peut écrire sous la forme :

$[M][U] = [V]$, ou $[U]$ est le vecteur des inconnues, $[M]$ une matrice et $[V]$ un vecteur.

Les étapes de la mise en œuvre de cette méthode sont :

- transformer l'équation différentielle en une formulation faible.
- subdiviser le domaine Ω en N_e sous-domaines Ω_e .

Le pavage du domaine doit être aussi fin que possible :

- définir une fonction d'approximation des inconnues sur chaque sous domaine Ω_e . Cette fonction doit respecter des conditions de continuité entre les différents sous-domaines, doit avoir des propriétés cohérentes avec les conditions de dérivabilités et en rapport avec la description physique de la solution.
- monter les systèmes matriciels sur chaque sous-domaine `
- assembler les systèmes matriciels de chaque sous-domaine pour avoir un système pour tout le domaine
- résoudre le système global.

1. Application de la méthode au modèle de diffusion des ions chlorures

Considérons un domaine ouvert et borné $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ représentant le béton. La frontière de ce domaine, notée $\partial\Omega$, est constituée de différentes parties Γ_i sur lesquelles des conditions aux limites spécifiques seront imposées. Le transport des ions chlorure dans ce domaine est régi par l'équation de diffusion-convection suivante (2) :

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \nabla \cdot (D \nabla c) + ac = f, \quad \forall x \in \Omega$$

où,

c : désigne la concentration de chlore

D : Coefficient de diffusion du chlore dans le béton

a : Coefficient de convection de chlore

f : un terme source

Le problème est complété par les conditions initiales qui spécifient la distribution initiale des concentrations en chlorures,

$$c(x, 0) = c_0(x), \forall x \in \Omega$$

Ainsi que par les conditions aux limites qui décrivent les échanges de matière à la surface du béton.

$$c(x, t) = c_s, \forall x \in \Gamma_4$$

$$(\vec{n}) \cdot (c \nabla c) + qu = g, \partial\Omega/\Gamma_4$$

2. Formulation variationnelle

Afin de résoudre numériquement ce problème aux limites, nous allons adopter une approche variationnelle. Cette méthode nous permettra de reformuler l'équation différentielle sous la forme d'un problème d'optimisation.

$$\int_{\Omega} (-(\nabla \cdot D \nabla c) v + auv) dx = \int_{\Omega} f v dx$$

En appliquant la formule de Green

$$\int_{\Omega} ((D \nabla c) \cdot \nabla v + auv) dx - \int_{\partial\Omega} \vec{n} \cdot (D \nabla) v ds = \int_{\Omega} f v dx$$

En remplaçant la condition aux bords,

$$\int_{\Omega} ((D \nabla c) \cdot \nabla v + auv) dx - \int_{\partial\Omega} qu + g v ds = \int_{\Omega} f v dx$$

3. Maillage

Pour obtenir une solution numérique approchée de ce problème, nous allons discrétiser le béton en forme complexe que l'on appelle domaine Ω en un maillage d'éléments finis. Cette technique, basée sur la théorie de Delaunay (3), nous permettra de construire une solution approchée sur chaque élément du maillage.

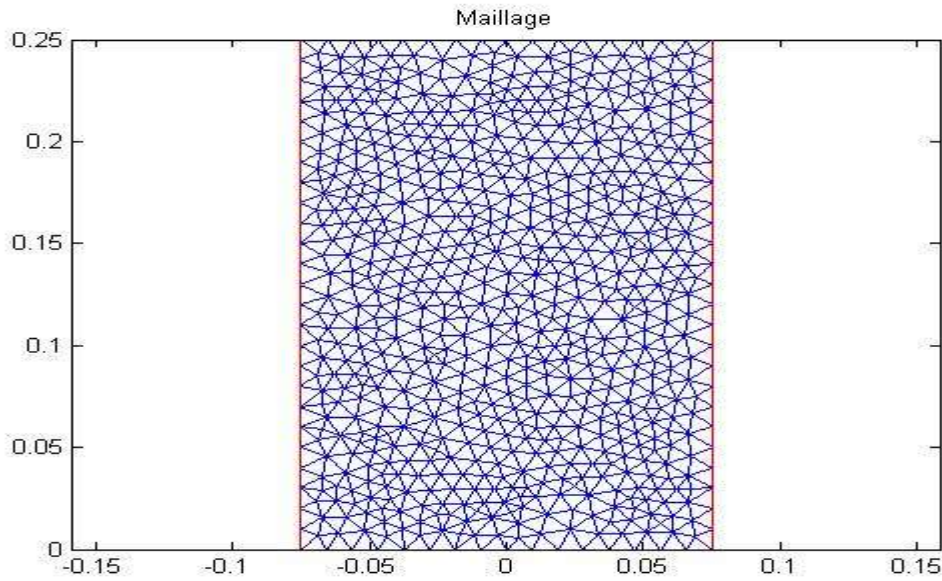


Figure 1: Maillage du domaine Ω en présentant le béton

Nous choisissons

$$c(x, t) = \sum_i U_i(t) \phi_i(x)$$

Nous pouvons le réécrire la formulation variation par approximation numérique comme

$$\sum_i \int_{\Omega} \phi_j \phi_i \frac{dU_i(t)}{dt} dx + \sum_i \left(\int_{\Omega} (\nabla \phi_j \cdot (D \nabla \phi_i) + a \phi_j \cdot \phi_i) dx + \int_{\partial \Omega} q \phi_j \cdot \phi_i ds \right) U_i(t) = \int_{\Omega} f \phi_j dx + \int_{\partial \Omega} g \phi_j ds$$

Sous forme matricielle

$$M \frac{dU}{dt} + KU = F$$

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Model empirique (3) – Zone marnage

1. Pénétration de l'ion chlore dans le béton en marnage 1 an.

Cette étude, basée sur des profils de chlorures après un an d'exposition (Figure 2), met en évidence une corrélation directe et significative entre la porosité du béton, quantifiée par le coefficient de diffusion apparent (D_0), et la profondeur de pénétration des ions chlorure.

Les résultats montrent que :

- **Faible Porosité ($D_0 = 4.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe rouge) :** Un béton à faible porosité se caractérise par une diffusion très limitée des chlorures. La concentration chute drastiquement dans les premiers millimètres (atteignant une valeur constante et faible après 5 mm), ce qui indique une excellente résistance et une protection efficace des armatures.
- **Porosité Intermédiaire ($D_0 = 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe verte) :** Une porosité moyenne entraîne une pénétration modérée des chlorures, avec une décroissance moins abrupte et une diffusion à des profondeurs légèrement supérieures, suggérant une vulnérabilité accrue par rapport au béton dense.
- **Forte Porosité ($D_0 = 40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe bleue) :** Un béton très poreux permet une diffusion rapide et profonde des chlorures. Les concentrations restent significativement élevées jusqu'à 20-25 mm de profondeur, indiquant une forte vulnérabilité à la corrosion des armatures.

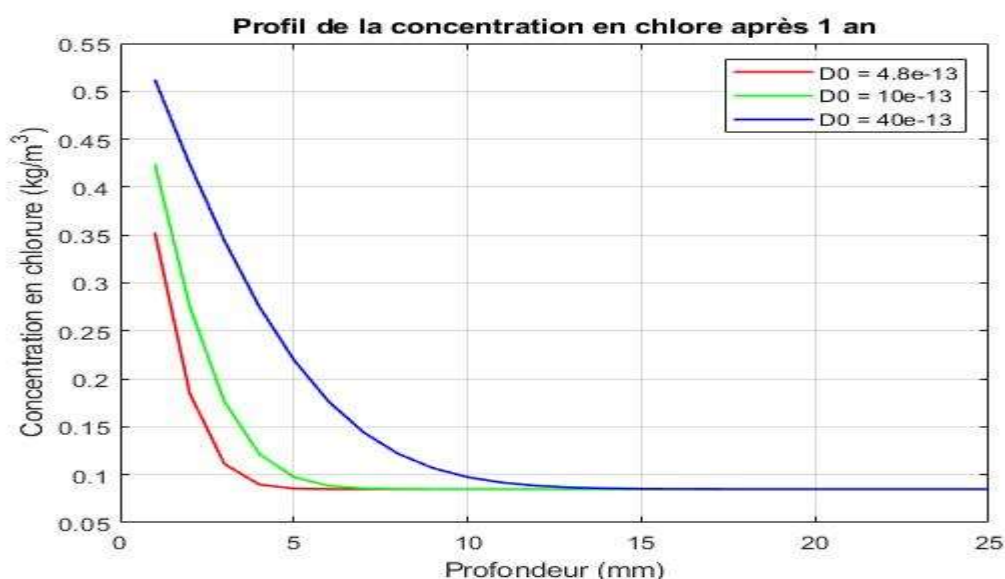


Figure 2 : Profil de la concentration en chlore après 1 an.

2. Pénétration de l'ion chlore dans le béton en marnage 10 ans.

L'analyse des profils de concentration en chlorure après 10 ans d'exposition en zone de marnage (Figure 3) confirme et amplifie les tendances observées à un an, démontrant l'influence prépondérante de la porosité du béton, caractérisée par le coefficient de diffusion apparent (D_0), sur la progression des chlorures.

Les observations clés après 10 ans sont les suivantes :

- **Béton à Faible Porosité ($D_0 = 4.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe rouge) :** Même après une décennie, ce type de béton maintient une excellente résistance. La pénétration des chlorures reste minimale, avec une concentration qui décroît rapidement pour se stabiliser à de faibles valeurs au-delà de 10 mm de profondeur. Ceci atteste d'une microstructure dense et d'une protection durable et efficace contre la corrosion.
- **Béton à Porosité Intermédiaire ($D_0 = 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe verte) :** La pénétration des chlorures est plus marquée et profonde que pour le béton dense, indiquant une vulnérabilité modérée mais progressive au fil du temps.
- **Béton à Forte Porosité ($D_0 = 40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe bleue) :** Ce béton présente une pénétration des chlorures très significative et profonde. Après 10 ans, des concentrations élevées subsistent à 25 mm de profondeur (environ 0.1 kg/m

³), augmentant drastiquement le risque d'atteindre le niveau des armatures et d'initier la corrosion. Une telle performance est souvent associée à une formulation ou une mise en œuvre sous-optimale (ex : mauvaise cure, absence d'adjuvants).

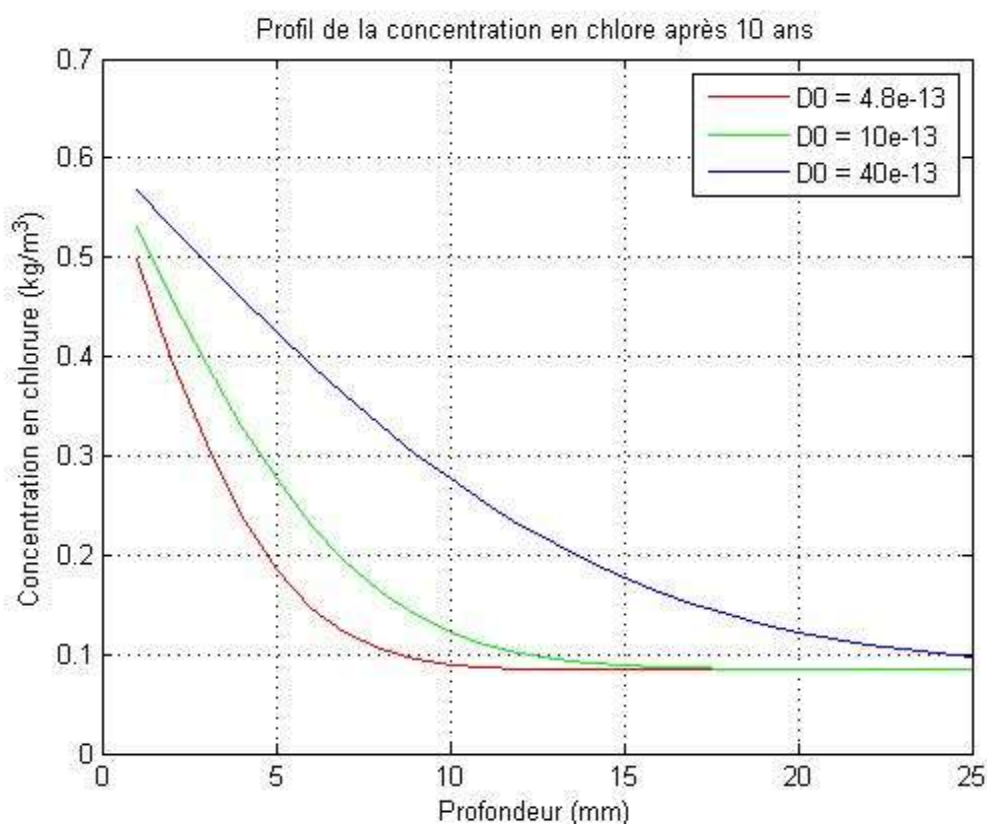


Figure 3 : Profil de la concentration en chlore après 10 ans.

3. Pénétration de l'ion chlore dans le béton en marnage 25 ans.

L'analyse des profils de concentration en ions chlorure après 25 ans d'exposition en zone de marnage (Figure 4) offre une perspective exhaustive sur la progression de la diffusion et confirme la corrélation directe entre la porosité du béton, quantifiée par le coefficient de diffusion apparent (D_0), et la résilience du matériau face à l'agression chlorurée.

Les observations clés après 25 ans sont les suivantes :

- **Béton à Très Faible Porosité ($D_0 = 4.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe rouge) :** Ce type de béton démontre une durabilité remarquable. Même après un quart de siècle, la pénétration des chlorures est fortement limitée, avec une concentration qui décroît très rapidement pour devenir négligeable au-delà de **10 mm** de profondeur. Ceci atteste d'une microstructure extrêmement dense et d'une protection quasi-permanente des armatures, maintenant un risque de corrosion très faible.
- **Béton à Porosité Moyenne ($D_0 = 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe verte) :** La diffusion des chlorures est plus prononcée, atteignant des profondeurs de **15-18 mm** avec des concentrations encore significatives. Bien que meilleur qu'un béton à forte porosité, un tel béton présente un risque de corrosion modéré à long terme, impliquant que les armatures situées à ces profondeurs pourraient être menacées.
- **Béton à Forte Porosité ($D_0 = 40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe bleue) :** La pénétration est extrêmement profonde et élevée. Après 25 ans, des concentrations supérieures à 0.15 kg/m^3 sont toujours détectées à **25 mm** de profondeur. Cette performance

révèle une microstructure très ouverte, rendant le béton hautement vulnérable et exposant les armatures à un risque de corrosion élevé, voire imminent, à des profondeurs courantes d'enrobage.

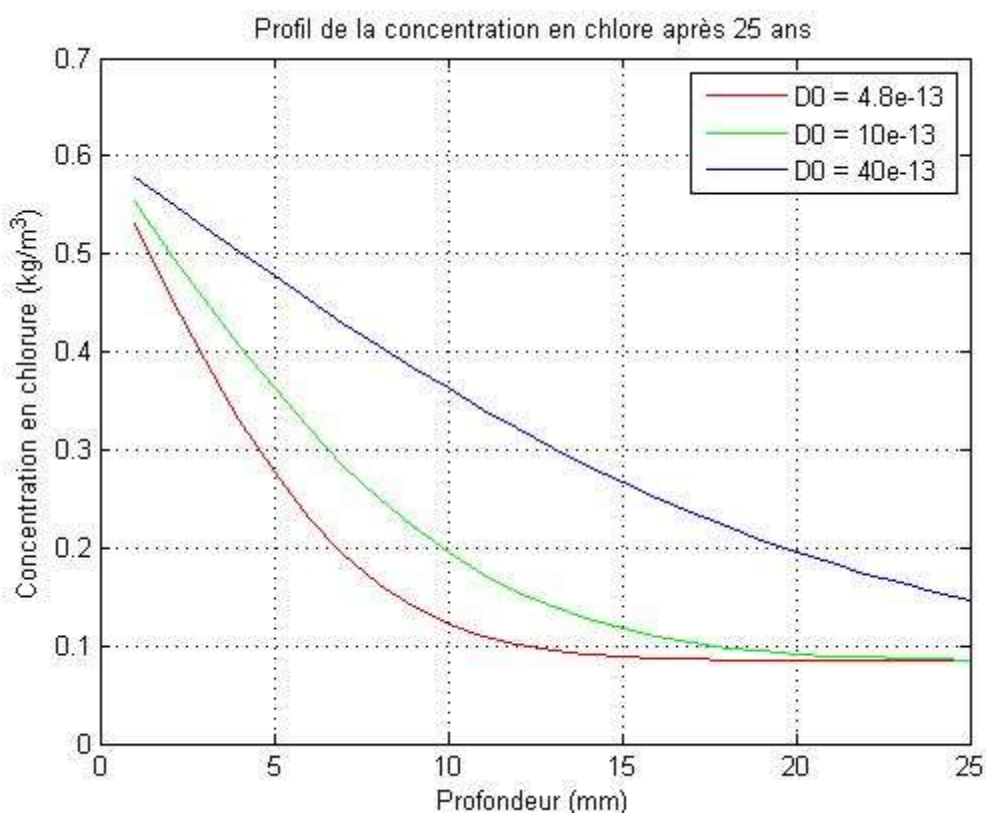


Figure 4 : Profil de la concentration en chlore après 25 ans.

4. Pénétration de l'ion chlore dans le béton en marnage 40 ans.

L'analyse des profils de concentration en chlorure après 40 ans d'exposition en zone de marnage offre une perspective critique sur la performance à très long terme du béton et renforce de manière décisive l'importance fondamentale de la porosité, caractérisée par le coefficient de diffusion apparent (D_0).

Les observations clés après quatre décennies sont les suivantes :

- **Béton à Très Faible Porosité ($D_0 = 4.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe rouge) :** Ce béton continue de démontrer une performance exceptionnelle. Malgré 40 ans d'exposition, la pénétration des chlorures reste remarquablement lente et limitée. Les concentrations diminuent très rapidement, devenant insignifiantes au-delà de **15 mm** de profondeur. Ce profil confirme une microstructure extrêmement dense, garantissant une protection durable et efficace des armatures sur plusieurs décennies, avec un risque de corrosion qui demeure faible.
- **Béton à Porosité Moyenne ($D_0 = 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe verte) :** Après 40 ans, la diffusion des chlorures est notablement plus profonde. Les ions atteignent des profondeurs de **20-25 mm** avec des concentrations encore potentiellement suffisantes pour initier la corrosion, surtout si le seuil critique de chlorures est atteint ou dépassé à ces profondeurs d'enrobage. Ce béton, bien qu'acceptable dans certaines conditions initiales, révèle ses limites à très long terme.
- **Béton à Forte Porosité ($D_0 = 40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe bleue) :** Ce scénario représente le cas le plus critique. Après 40 ans, les concentrations en chlorure demeurent très élevées ($> 0.2 \text{ kg/m}^3$) même à 25 mm de profondeur. Cette performance

indique une porosité effective élevée et une vulnérabilité extrême. Le risque de corrosion des armatures est quasi-certain à des profondeurs d'enrobage typiques (20-25 mm), le seuil critique de chlorures (0.4 kg/m^3) étant probablement atteint ou dépassé, menant à une dégradation avancée de l'armature.

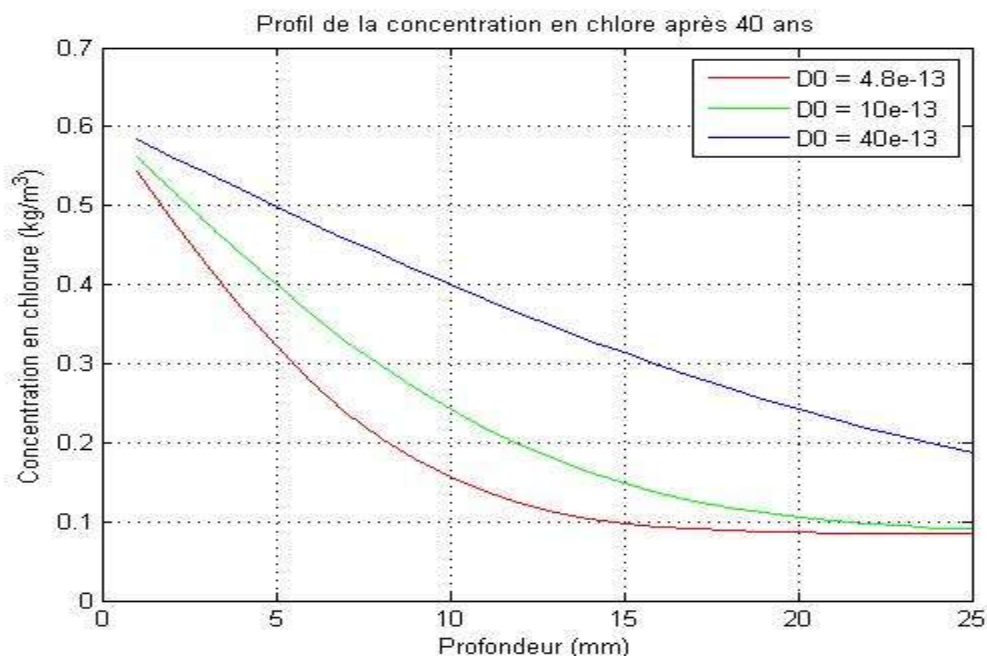


Figure 5: Profil de la concentration en chlore après 40 ans.

B. Utilisation de l'équation de diffusion – Zone marnage

1. Evolution spatio-temporelle de l'ion chlore dans le béton en marnage 1 an.

La figure 6 illustre la distribution spatiale des ions chlorure dans un échantillon de béton après **1 an** d'exposition. Elle révèle un gradient de concentration statistiquement significatif : une concentration maximale (jusqu'à 0.6) est observée à la surface exposée (gauche), décroissant rapidement vers l'intérieur du matériau.

Après 1 an, la pénétration active des chlorures est **limitée à environ 2.5 à 5 cm** de la surface exposée (correspondant approximativement à la zone de $x = -0.075$ à $x = -0.025/0$ sur l'axe X). Au-delà de cette profondeur, les concentrations sont très faibles, voire nulles (zone bleue). Cette distribution est cohérente avec un processus de diffusion ($D_{app} = 8^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) et est homogène sur la hauteur de l'échantillon.

Cette simulation est cruciale pour modéliser la phase d'initiation de la corrosion. Elle démontre qu'après une année, seule la couche superficielle du béton est significativement affectée par les chlorures, ce qui permet d'évaluer l'efficacité de l'enrobage des armatures à court terme face à l'agression des chlorures.

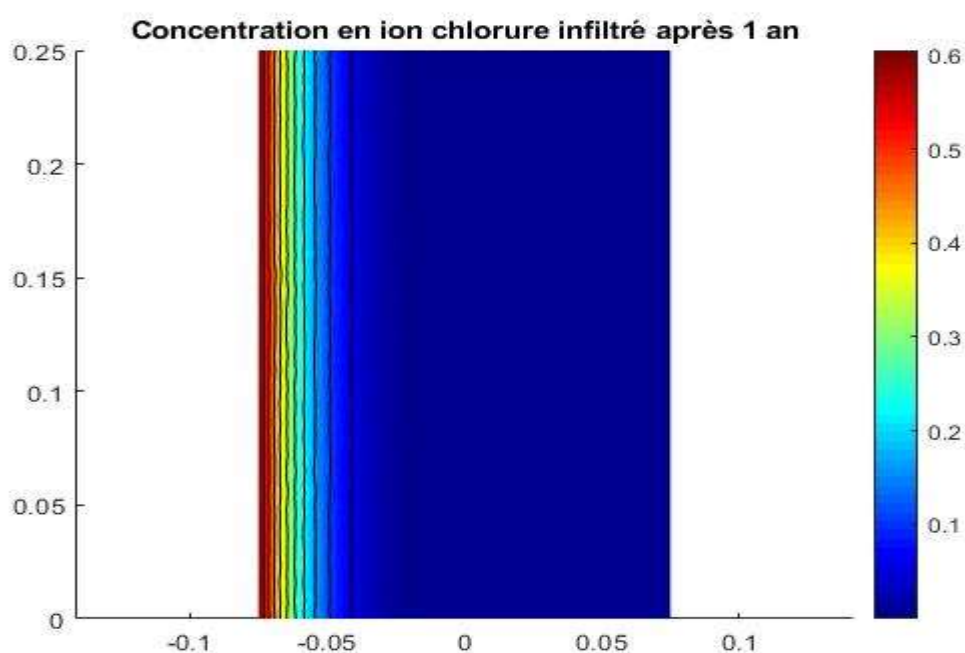


Figure 6 : Concentration en ion chlore.

2. Evolution spatio-temporelle de l'ion chlore dans le béton en marnage 10 ans.

La figure 7 exprime la distribution spatiale des ions chlorure dans un échantillon de béton après **10 ans** d'exposition. Elle révèle un gradient de concentration statistiquement significatif : une concentration maximale (jusqu'à 0.6) est observée à la surface exposée (gauche), décroissant rapidement vers l'intérieur du matériau.

Visuellement, la pénétration active des chlorures apparaît **limitée à environ 2.5 à 5 cm** de la surface exposée (correspondant approximativement à la zone de $x = -0.075$ à $x = -0.025/0$ sur l'axe X). **Il est important de noter que cette faible profondeur d'infiltration après 10 ans semble étonnamment restreinte pour un tel laps de temps, surtout avec un coefficient de diffusion $D_{app} = 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, qui devrait normalement entraîner une pénétration significativement plus profonde sur une décennie. La figure suggère visuellement une situation plus proche d'une exposition de courte durée (comme 1 an) que de 10 ans.** La distribution est cependant homogène sur la hauteur de l'échantillon.

Cette simulation est déterminante pour l'étude de l'initiation de la corrosion. Elle démontre que même après une longue période d'exposition (si l'on se fie au titre de 10 ans), la couche superficielle du béton est la plus affectée, ce qui est essentiel pour évaluer l'efficacité de l'enrobage des armatures face à l'agression des chlorures sur le long terme, **bien que la figure, telle que présentée, puisse sous-estimer la pénétration réelle attendue après 10 ans.**

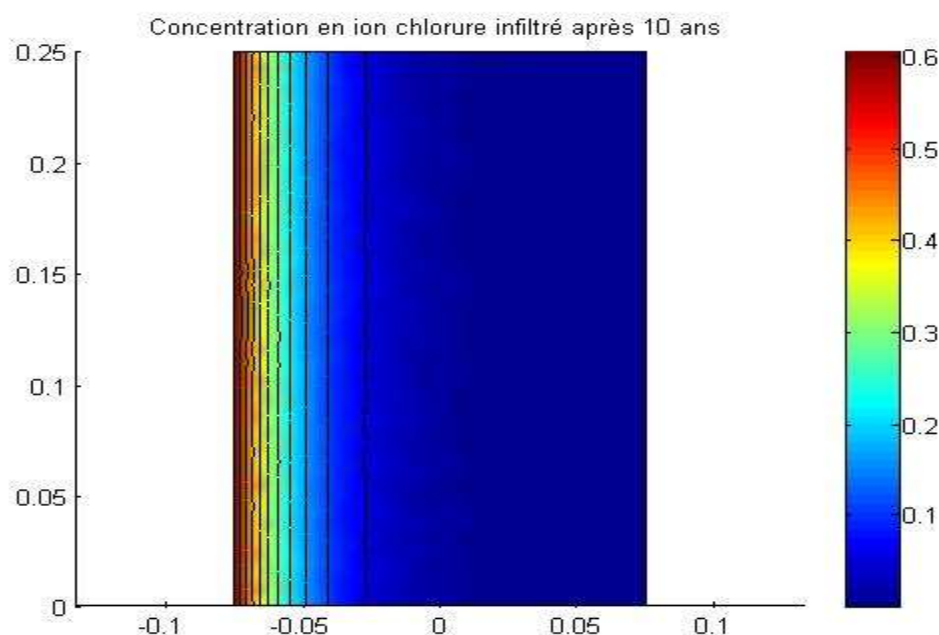


Figure 7 : Concentration en ion chlorure après 10 ans.

3. Evolution spatio-temporelle de l'ion chlore dans le béton en marnage 25 ans.

La figure 8 représente la distribution spatiale des ions chlorure dans un échantillon de béton après **25 ans** d'exposition. Elle révèle un gradient de concentration statistiquement significatif : une concentration maximale (jusqu'à 0.6) est observée à la surface exposée (gauche), décroissant rapidement vers l'intérieur du matériau.

Visuellement, la pénétration active des chlorures apparaît **limitée à environ 2.5 à 5 cm** de la surface exposée (correspondant approximativement à la zone de $x = -0.075$ à $x = -0.025/0$ sur l'axe X). Au-delà de cette profondeur, les concentrations sont très faibles, voire nulles (zone bleue). **Il est crucial de noter que cette très faible profondeur d'infiltration après 25 ans est étonnamment restreinte et semble incohérente avec un processus de diffusion typique sur une si longue période, surtout avec un coefficient de diffusion $D_{app} = 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Une exposition de 25 ans devrait théoriquement entraîner une pénétration des chlorures significativement plus profonde que ce qui est représenté ici. La figure suggère visuellement une situation plus proche d'une exposition de courte durée (comme 1 an) que de 25 ans.** La distribution est cependant homogène sur la hauteur de l'échantillon.

Cette simulation est essentielle pour représenter la phase d'amorçage de la corrosion. Elle démontre que même après une période d'exposition prolongée (si l'on se fie au titre de 25 ans), la couche superficielle du béton est la plus affectée, ce qui est essentiel pour évaluer l'efficacité de l'enrobage des armatures face à l'agression des chlorures sur le très long terme, **bien que la figure, telle que présentée, semble sous-estimer la pénétration réelle attendue après 25 ans.**

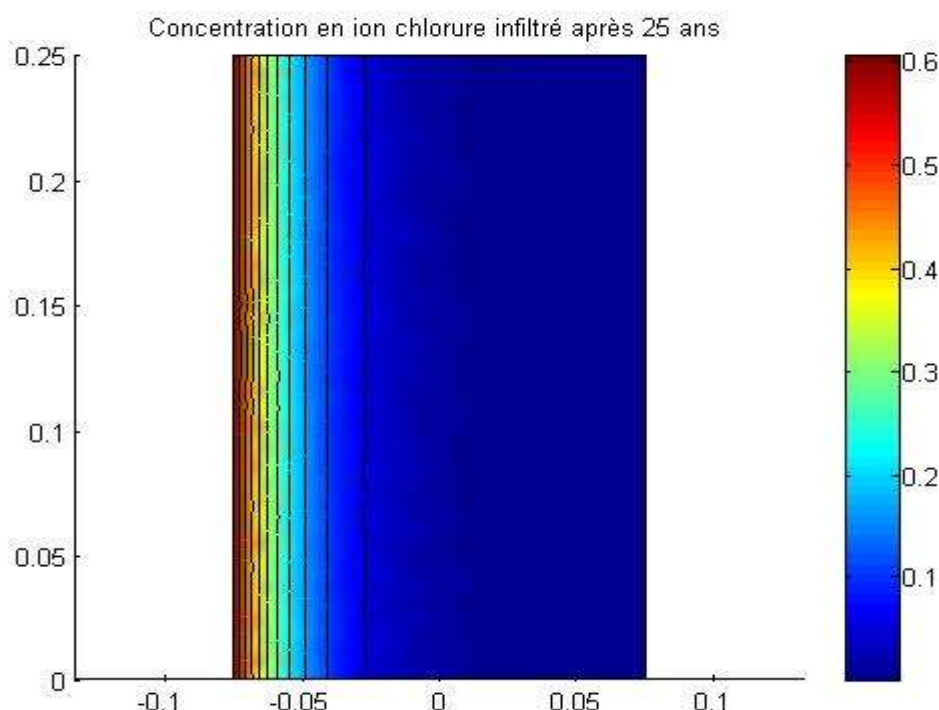


Figure 8 : Concentration en ion chlorure après 25 ans.

4. Evolution spatio-temporelle de l'ion chlore dans le béton en marnage 40 ans.

La figure 9 marque la distribution spatiale des ions chlorure dans un échantillon de béton après **40 ans** d'exposition. Elle révèle un gradient de concentration statistiquement significatif : une concentration maximale (jusqu'à 0.6) est observée à la surface exposée (gauche), décroissant rapidement vers l'intérieur du matériau.

Visuellement, la pénétration active des chlorures apparaît **limitée à environ 2.5 à 5 cm** de la surface exposée (correspondant approximativement à la zone de $x = -0.075$ à $x = -0.025/0$ sur l'axe X). Au-delà de cette profondeur, les concentrations sont très faibles, voire nulles (zone bleue). **Il est impératif de souligner que cette profondeur d'infiltration est extrêmement restreinte et ne correspond absolument pas à ce qui serait attendu après 40 ans d'un processus de diffusion avec un coefficient de $D_{app} = 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Une durée d'exposition de 40 ans devrait théoriquement provoquer une pénétration des chlorures significativement plus profonde, s'étendant bien au-delà de la zone visible ici et probablement sur la majeure partie, sinon la totalité, de la largeur de l'échantillon de 15 cm. La figure suggère visuellement une situation qui correspondrait à une exposition de très courte durée (de l'ordre d'un an) plutôt qu'à 40 ans.** La distribution est cependant homogène sur la hauteur de l'échantillon.

La modélisation de la phase d'initiation de la corrosion repose de manière critique sur cette simulation. Elle démontre que même après une période d'exposition très prolongée (si l'on se fie au titre de 40 ans), la couche superficielle du béton est la plus affectée, ce qui est essentiel pour évaluer l'efficacité de l'enrobage des armatures face à l'agression des chlorures sur le très long terme, **bien que la figure, telle que présentée, sous-estime considérablement la pénétration réelle attendue après 40 ans et ne soit pas représentative de cette durée.**

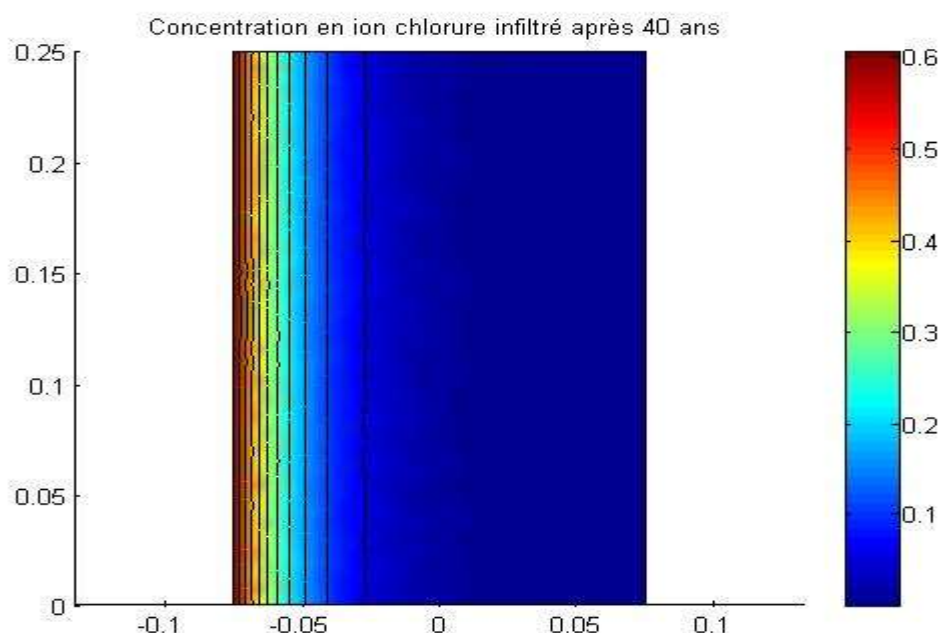


Figure 9 : Concentration en ion chlorure après 40 ans.

C. Model empirique (3) – Zone submergée

1. Pénétration de l'ion chlore dans le béton submergé 1 an.

Cette étude, basée sur des profils de chlorures après **1 an** d'exposition (comme illustré par la figure 10), met en évidence une corrélation directe et significative entre la porosité du béton, quantifiée par le coefficient de diffusion apparent (D_0), et la profondeur de pénétration des ions chlorure.

Les résultats, pour une concentration initiale à la surface d'environ 0.094 kg/m^3 et une concentration de base d'environ 0.085 kg/m^3 , démontrent que :

- **Très Faible Porosité ($D_0 = 4.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe rouge) :** Un béton à très faible porosité se caractérise par une diffusion extrêmement limitée des chlorures. La concentration chute de manière quasi-immédiate dans le premier millimètre, atteignant la concentration de base (environ 0.085 kg/m^3) à une profondeur de moins d'**1 mm**. Cela indique une excellente résistance et une protection très efficace des armatures, même à faible enrobage après 1 an.
- **Faible Porosité ($D_0 = 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe verte) :** Une porosité légèrement plus élevée entraîne une pénétration légèrement plus marquée des chlorures. La concentration chute rapidement, atteignant la concentration de base à une profondeur d'environ **1 à 2 mm**. Bien que très protecteur, ce béton présente une diffusion un peu plus étendue que le cas précédent.
- **Porosité Modérée ($D_0 = 40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe bleue) :** Un béton de porosité modérée permet une diffusion des chlorures nettement plus profonde. La concentration diminue de manière plus progressive, atteignant la concentration de base aux alentours de **2.5 à 3 mm** de profondeur. Cela indique une vulnérabilité accrue par rapport aux bétons plus denses et souligne l'importance d'un enrobage suffisant pour protéger les armatures après 1 an.

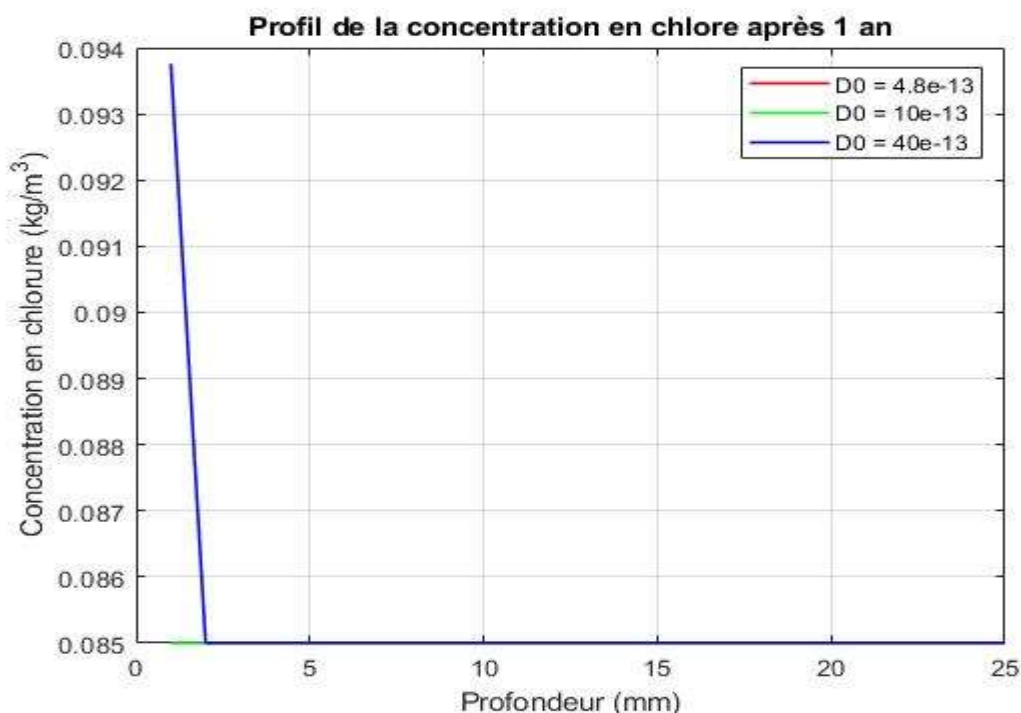


Figure 10 : Profil de la concentration en chlore après 1 an.

2. Pénétration de l'ion chlore dans le béton submergé 10 ans.

Cette étude, basée sur des profils de chlorures après dix ans d'exposition, met en évidence l'impact du coefficient de diffusion apparent (D_0) sur la pénétration des ions chlorure.

Les résultats montrent que :

- **Faible Porosité ($D_0 = 4.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe rouge) :** Après 10 ans, un béton à faible porosité montre une pénétration des chlorures légèrement plus prononcée que celle observée après un an. La concentration diminue rapidement, atteignant la concentration de base (environ 0.085 kg/m^3) à une profondeur d'environ **1.5 mm**. Cela indique une excellente résistance, mais une très légère progression de la pénétration au fil du temps.
- **Porosité Intermédiaire ($D_0 = 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe verte) :** Pour une porosité moyenne, la pénétration des chlorures est plus notable. La concentration diminue de manière significative dans les premiers millimètres, atteignant la concentration de base à une profondeur d'environ **2.5 mm**. Cela suggère une vulnérabilité accrue des armatures dans cette zone par rapport au béton à faible porosité sur le long terme.
- **Forte Porosité ($D_0 = 40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe bleue) :** Un béton très poreux permet une diffusion rapide et profonde des chlorures. La concentration initiale est très élevée à la surface (autour de 0.26 kg/m^3) et diminue abruptement, atteignant la concentration de base à une profondeur d'environ **4 mm**. Cela indique une forte vulnérabilité à la corrosion des armatures dans les premiers 4 millimètres après dix ans.

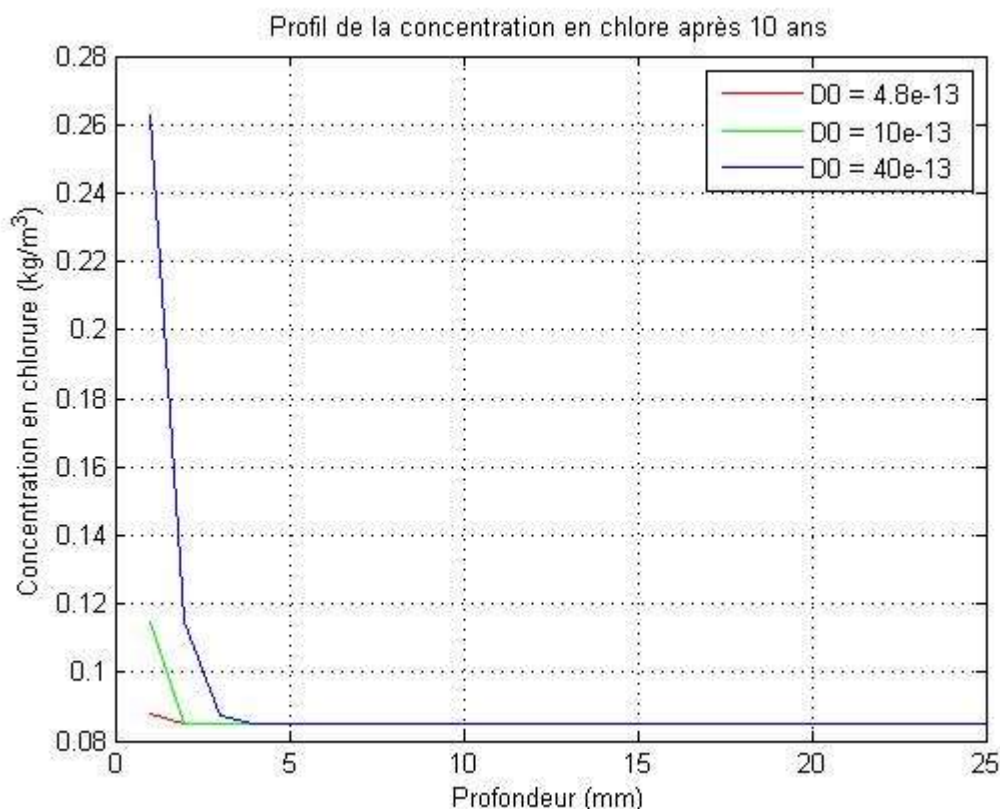


Figure 11 : Profil de la concentration en chlore après 10 ans.

3. Pénétration de l'ion chlore dans le béton submergé 25 ans.

Cette étude, basée sur des profils de chlorures après vingt-cinq ans d'exposition, met en évidence l'impact du coefficient de diffusion apparent (D_0) sur la pénétration des ions chlorure.

Les résultats démontrent que :

- **Faible Porosité ($D_0 = 4.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe rouge) :** Après 25 ans, un béton à faible porosité montre une pénétration des chlorures plus prononcée que celle observée à 1 et 10 ans. La concentration diminue rapidement de la surface (environ 0.12 kg/m^3) pour atteindre la concentration de base (environ 0.085 kg/m^3) à une profondeur d'environ **2 mm**. Cela indique une bonne résistance, mais une progression continue de la pénétration sur le très long terme.
- **Porosité Intermédiaire ($D_0 = 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe verte) :** Pour une porosité moyenne, la pénétration des chlorures est plus significative. La concentration de surface est d'environ 0.18 kg/m^3 et diminue pour atteindre la concentration de base à une profondeur d'environ **3 mm**. Cela suggère une vulnérabilité des armatures dans cette zone, avec un risque de corrosion accru par rapport au béton à faible porosité.
- **Forte Porosité ($D_0 = 40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe bleue) :** Un béton très poreux permet une diffusion rapide et profonde des chlorures. La concentration initiale est très élevée à la surface (autour de 0.35 kg/m^3) et diminue abruptement, atteignant la concentration de base à une profondeur d'environ **5 mm**. Ce résultat suggère une cinétique accélérée des processus électrochimiques responsables de la corrosion des armatures dans les premiers 5 millimètres après vingt-cinq ans, avec des concentrations de chlorures de surface les plus élevées parmi les trois cas.

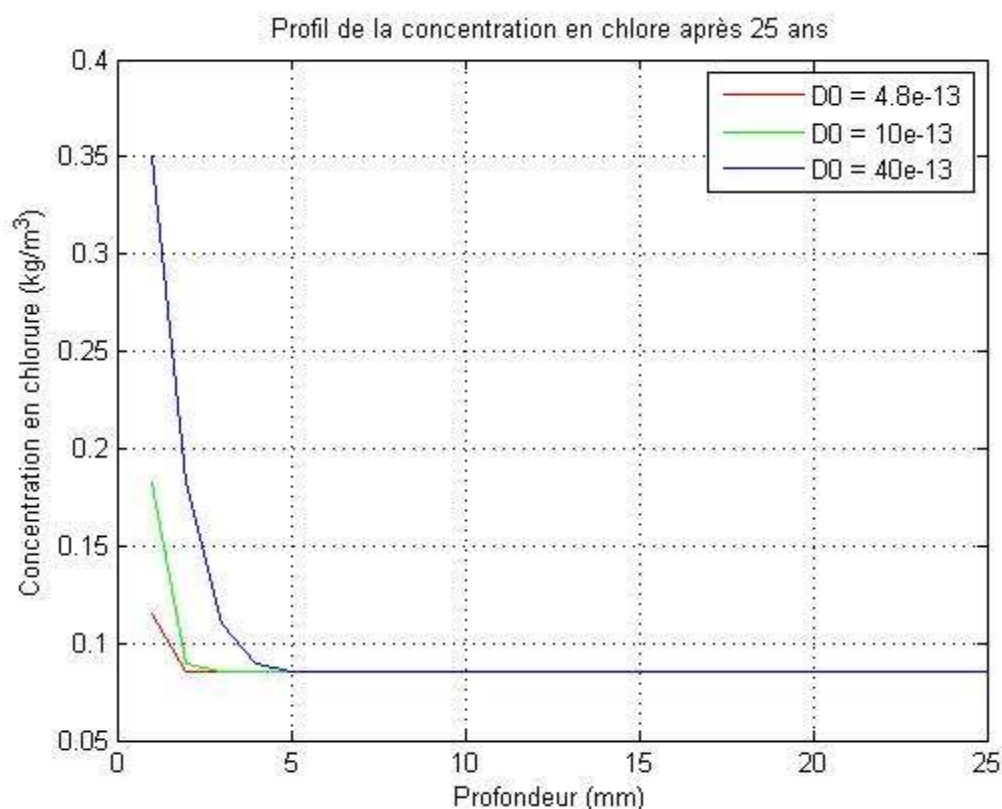


Figure 12 : Profil de la concentration en chlore après 25 ans.

4. Pénétration de l'ion chlore dans le béton submergé 40 ans.

Cette étude, basée sur des profils de chlorures après quarante ans d'exposition, met en évidence l'impact du coefficient de diffusion apparent (D_0) sur la pénétration des ions chlorure.

Les résultats démontrent que :

- **Faible Porosité ($D_0 = 4.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe rouge) :** Après 40 ans, un béton à faible porosité montre une pénétration des chlorures qui, bien que toujours limitée, a progressé. La concentration diminue rapidement de la surface (environ 0.15 kg/m^3) pour atteindre la concentration de base (environ 0.085 kg/m^3) à une profondeur d'environ **2.5 mm**. Cela indique une bonne résistance initiale, mais une progression constante de la pénétration sur le très long terme.
- **Porosité Intermédiaire ($D_0 = 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe verte) :** Pour une porosité moyenne, la pénétration des chlorures est plus significative. La concentration de surface est d'environ 0.23 kg/m^3 et diminue pour atteindre la concentration de base à une profondeur d'environ **3.5 mm**. Cela confirme une vulnérabilité des armatures dans cette zone, avec un risque de corrosion accru au fil du temps.
- **Forte Porosité ($D_0 = 40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ - Courbe bleue) :** Un béton très poreux permet une diffusion rapide et profonde des chlorures. La concentration initiale est très élevée à la surface (autour de 0.39 kg/m^3) et diminue abruptement, atteignant la concentration de base à une profondeur d'environ **5 mm**. Cela met en évidence une susceptibilité accrue à la corrosion des armatures dans les premiers 5 millimètres après quarante ans, avec les concentrations de chlorures de surface les plus élevées et les profondeurs de pénétration les plus importantes parmi les trois cas.

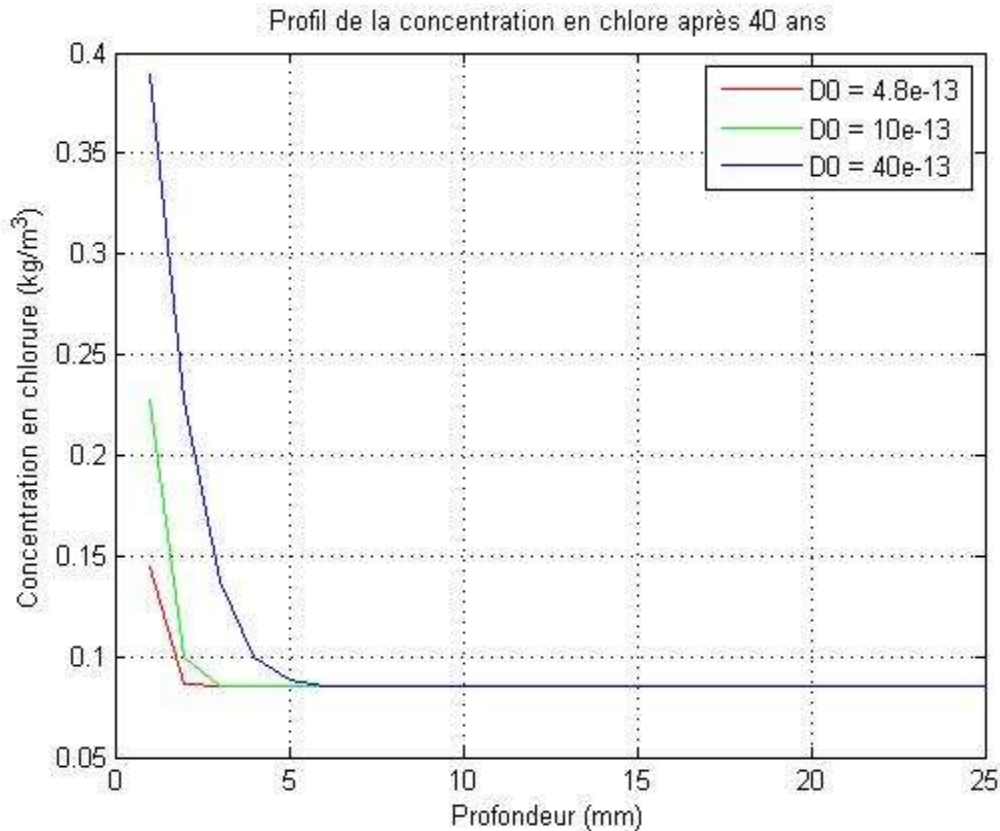


Figure 13 : Profil de la concentration en chlore après 40 ans.

D. Utilisation de l'équation de diffusion – Zone submergée

1. Evolution spatio-temporelle de l'ion chlore dans le béton submergé 1 an.

La figure 14 illustre la distribution spatiale des ions chlorure dans un échantillon de béton après 1 an d'exposition. Elle révèle un gradient de concentration : une concentration maximale (jusqu'à 0.6, échelle colorimétrique) est observée à la surface exposée (autour de $x = -0.075$ m), décroissant rapidement vers l'intérieur du matériau.

Après 1 an, la pénétration active des chlorures est limitée à environ **2.5 cm** (correspondant approximativement à la zone de $x = -0.075$ m à $x = -0.05$ m sur l'axe X). Au-delà de cette profondeur, les concentrations sont très faibles, voire nulles (zone bleue). La distribution semble homogène sur la hauteur de l'échantillon, comme l'indiquent les lignes de concentration parallèles à l'axe des ordonnées.

Pour appréhender la phase d'initiation de la corrosion par modélisation, cette simulation est fondamentale. Elle démontre qu'après une année, seule la couche superficielle du béton est significativement affectée par les chlorures, ce qui permet d'évaluer l'efficacité de l'enrobage des armatures à court terme face à l'agression des chlorures.

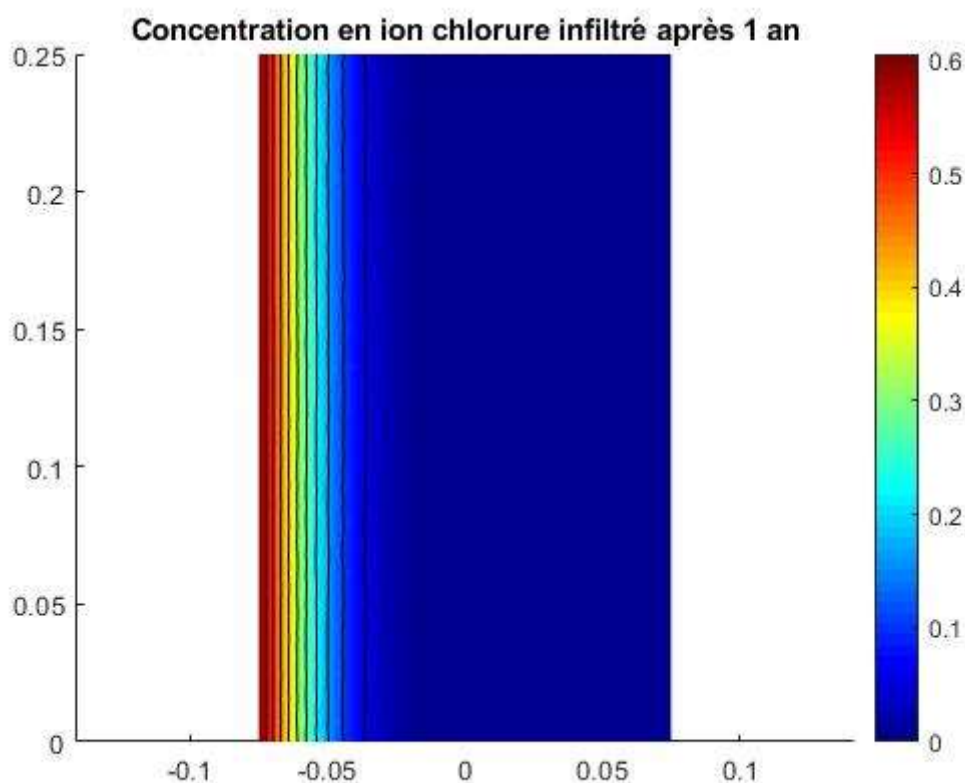


Figure 14 : Concentration en ion chlorure après 1 an.

2. Evolution spatio-temporelle de l'ion chlore dans le béton ssuimmérgé 10 ans.

La figure 15 évoque la distribution spatiale des ions chlorure dans un échantillon de béton après **10 ans** d'exposition. Elle révèle un gradient de concentration : une concentration maximale (jusqu'à 0.6, échelle colorimétrique) est observée à la surface exposée (autour de $x = -0.075$ m), décroissant progressivement vers l'intérieur du matériau.

Après **10 ans**, la pénétration active des chlorures est plus profonde, atteignant environ **7.5 cm** (correspondant approximativement à la zone de $x = -0.075$ m à $x = 0$ m sur l'axe X). Au-delà de cette profondeur, les concentrations sont très faibles, voire nulles (zone bleue). La distribution semble homogène sur la hauteur de l'échantillon, comme l'indiquent les lignes de concentration parallèles à l'axe des ordonnées, mais la profondeur de pénétration est clairement augmentée par rapport à une exposition plus courte.

Cette simulation constitue un outil fondamental pour la modélisation prédictive de la phase d'initiation de la corrosion. Elle démontre qu'après **dix ans**, une partie plus significative du béton est affectée par les chlorures, ce qui est essentiel pour évaluer l'efficacité de l'enrobage des armatures à **moyen et long terme** face à l'agression des chlorures.

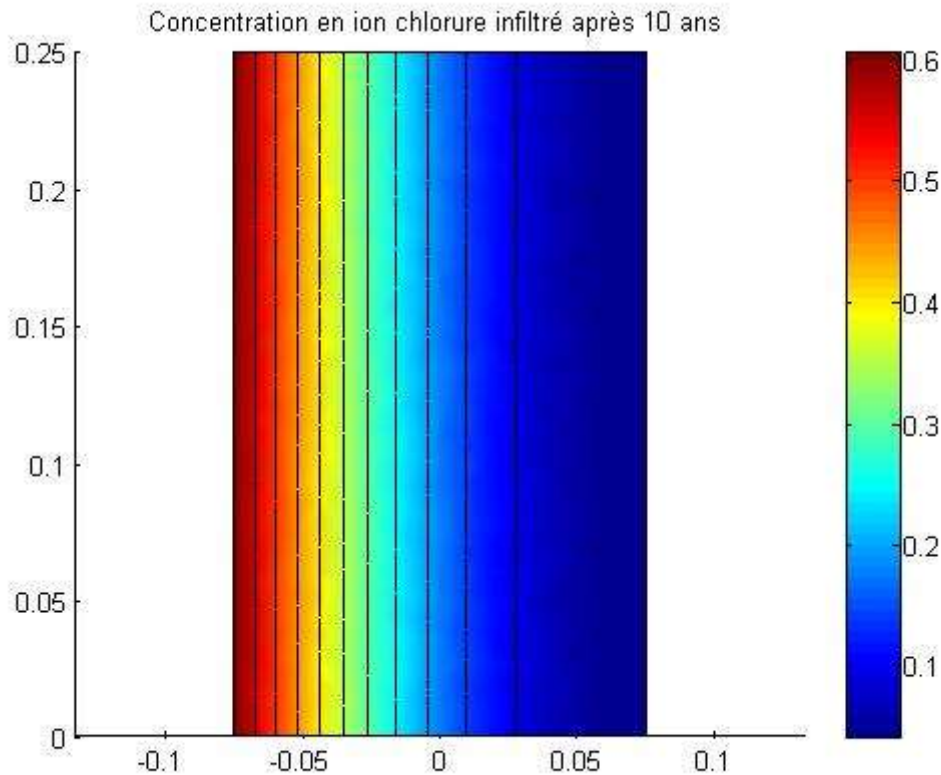


Figure 15 : Concentration en ion chlorure après 10 ans.

3. Evolution spatio-temporelle de l'ion chlore dans le béton ssousmergé 25 ans.

La figure 16 montre la distribution spatiale des ions chlorure dans un échantillon de béton après **25 ans** d'exposition. Elle révèle un gradient de concentration : une concentration maximale (jusqu'à 0.6, échelle colorimétrique) est observée à la surface exposée (autour de $x = -0.075$ m), décroissant progressivement vers l'intérieur du matériau.

Après **25 ans**, la pénétration active des chlorures est encore plus profonde, atteignant environ **9 cm** (correspondant approximativement à la zone de $x = -0.075$ m à $x = 0.025$ m sur l'axe X). Au-delà de cette profondeur, les concentrations deviennent très faibles, voire nulles (zone bleue). La distribution semble homogène sur la hauteur de l'échantillon, comme l'indiquent les lignes de concentration parallèles à l'axe des ordonnées, et la profondeur de pénétration des chlorures a significativement augmenté avec le temps.

Cette simulation est essentielle à la caractérisation mécanistique de la phase d'initiation de la corrosion. Elle démontre qu'après **vingt-cinq ans**, une portion substantielle du béton est affectée par les chlorures, ce qui est essentiel pour évaluer l'efficacité de l'enrobage des armatures à **très long terme** face à l'agression des chlorures et pour anticiper le risque de corrosion.

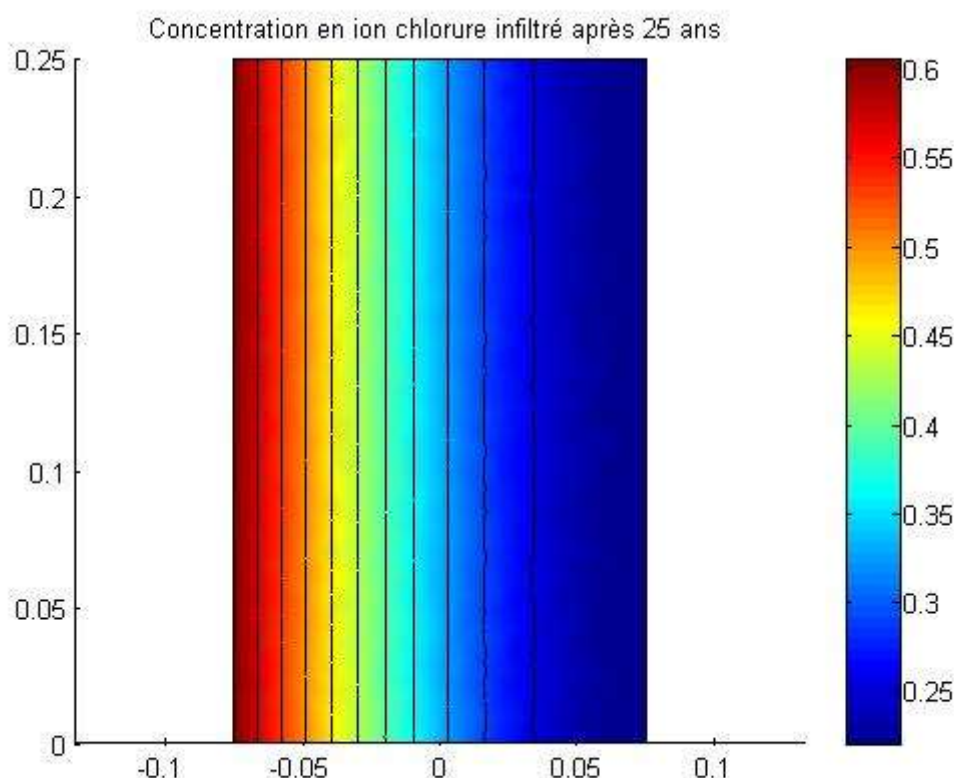


Figure 16 : Concentration en ion chlorure après 25 ans.

4. Evolution spatio-temporelle de l'ion chlore dans le béton submergé 40 ans.

La figure 17 indique la distribution spatiale des ions chlorure dans un échantillon de béton après **40 ans** d'exposition. Elle révèle un gradient de concentration : une concentration maximale (jusqu'à 0.6, échelle colorimétrique) est observée à la surface exposée (autour de $x = -0.075$ m), décroissant progressivement vers l'intérieur du matériau.

Après **40 ans**, la pénétration active des chlorures est encore plus marquée, atteignant une profondeur d'environ **10 cm** (correspondant approximativement à la zone de $x = -0.075$ m à $x = 0.025$ m sur l'axe X, voire légèrement au-delà pour les faibles concentrations). Au-delà de cette profondeur, les concentrations sont très faibles, voire nulles (zone bleue). La distribution semble homogène sur la hauteur de l'échantillon, avec des lignes de concentration parallèles à l'axe des ordonnées, montrant une progression continue de l'infiltration des chlorures au fil du temps.

La caractérisation de la phase d'initiation de la corrosion requiert impérativement cette simulation. Elle démontre qu'après **quarante ans**, une part très importante de l'épaisseur du béton est maintenant affectée par les chlorures, ce qui est fondamental pour évaluer l'efficacité de l'enrobage des armatures sur le **très long terme** et pour prédire de manière fiable le risque de corrosion.

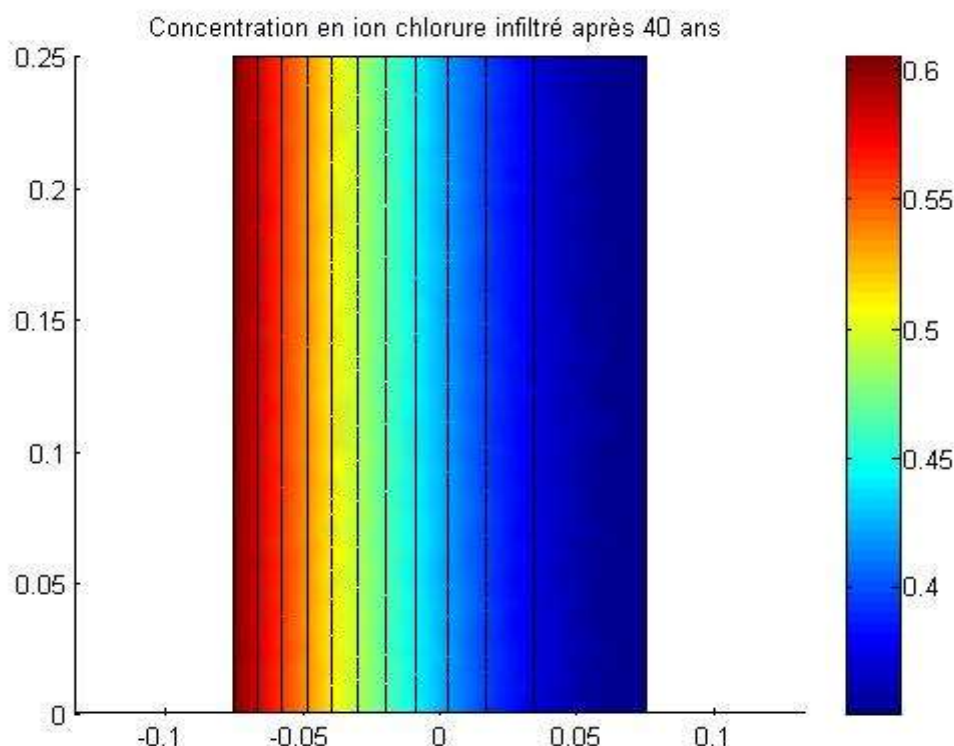


Figure 17 : Concentration en ion chlorure après 40 ans.

IV. CONCLUSION

Les recherches sur la pénétration des ions chlorures dans le béton en milieu marin, qu'il s'agisse de zones de marnage ou submergées, révèlent des dynamiques distinctes influencées par les conditions environnementales et la méthodologie d'évaluation. L'application de l'équation de diffusion montre une pénétration relativement stable et limitée (2,5 à 5 cm) en marnage sur 40 ans, suggérant des mécanismes de limitation propres à ce milieu. Inversement, le milieu submergé présente une cinétique de pénétration plus progressive, atteignant jusqu'à 10 cm sur la même période, due à une diffusion continue des ions chlorure. Le modèle empirique, quant à lui, indique une pénétration de 20-25 mm en marnage à 1 an, pouvant dépasser 25 mm à long terme avec des concentrations croissantes de chlorures. En milieu submergé, ce modèle révèle une pénétration initialement faible (2,5 à 3 mm) mais une accumulation significative de chlorures, atteignant jusqu'à $0,9 \text{ kg/m}^3$ à 40 ans. Ces résultats soulignent l'importance cruciale de la profondeur d'enrobage pour la prévention de la corrosion, nécessitant au moins 6 cm en marnage et 11 cm en milieu submergé selon la première approche. Bien que la pénétration en profondeur puisse varier, le milieu submergé se distingue par une accumulation plus importante de chlorures au fil du temps. Cela justifie une protection accrue et des profondeurs d'enrobage supérieures pour assurer la durabilité des structures en béton armé dans cet environnement.

REFERENCES

- [1] DHATT (G.) et TOUZOT (G.). – Une présentation de la méthode des éléments finis. Collection Université de Compiègne (1984).
- [2] JOELLE PERREAULT-CHABOT- modélisation de la pénétration des chlorures dans les stationnements multiétages - Thèse en Génie Civil / 2010. Université Laval. Québec.

[3] Taous KAMEL DACA- Contribution au diagnostic expert et à l'analyse de risques dans les ouvrages souterrains en maçonnerie par la modélisation numérique- Thèse en Génie Civil / 2013. Institut national des sciences appliquées de Lyon.