



Le débat AFGC: Sécurité incendie : béton et ingénierie de l'évacuation

Prise en compte de la physico- chimie des fibres de polypropylène dans la modélisation de la résistance au feu des bétons

**Par: Van Hieu TRAN
Docteur de l'ATILH - INSA de Rennes**

Paris, 04/2013

PLAN DE PRESENTATION

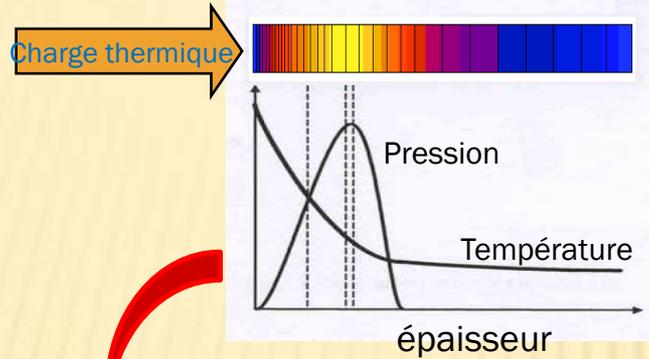
- I. Problématique
- II. Analyse de la percolation
- III. Étude de la perméabilité
- IV. Conclusion et prochain étape

PLAN DE PRESENTATION

- I. Problématique
- II. Analyse de la percolation
- III. Étude de la perméabilité
- IV. Conclusion et prochain étape

1. Problématique

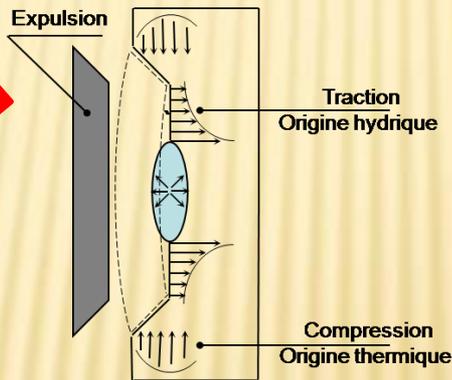
Incendie



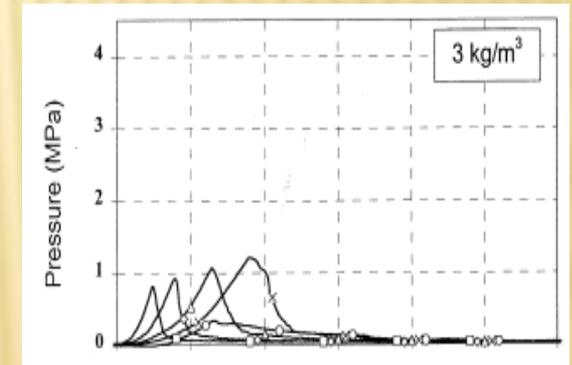
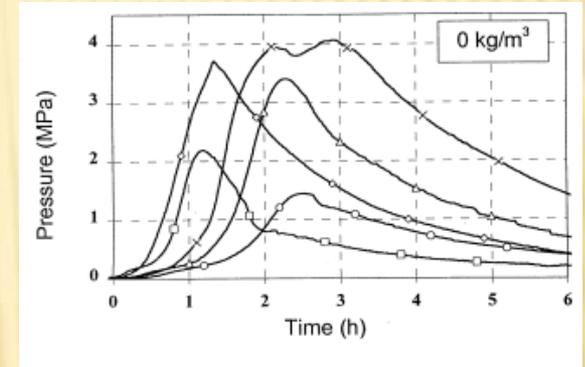
Conséquences très préjudiciables



Tunnel sous la Manche, 1996



Critère d'écaillage



Influence du dosage en fibres sur la pression [Kalifa et al., 2001]

Ajout Fibres PP

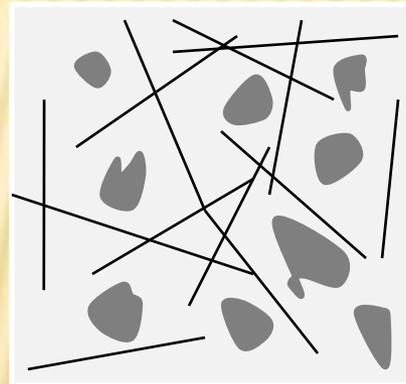
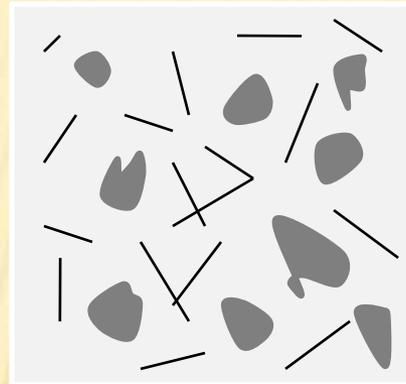


Augmentation perméabilité

Chute pression

1. Problématique

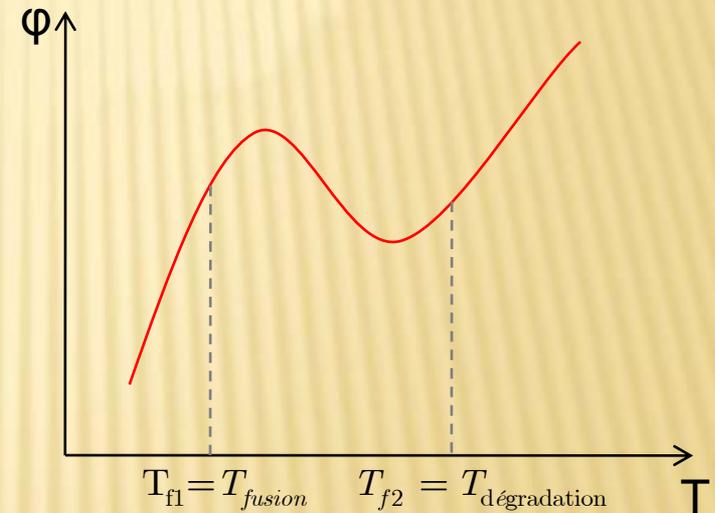
Introduire les paramètres de formulation liés aux fibres dans la modélisation:



Dosage (kg/m^3)

Caractéristiques géométriques

Rapport d'aspect



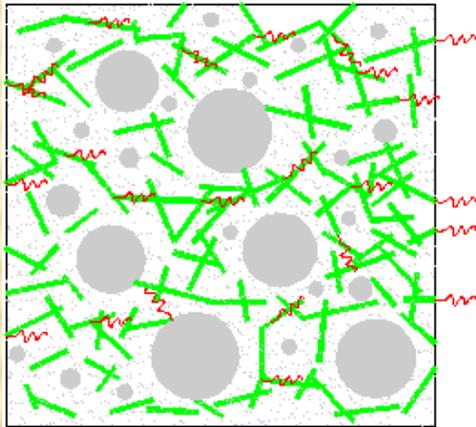
Caractéristiques physiques

Intervalle d'activation de la fibre

Impact sur la perméabilité

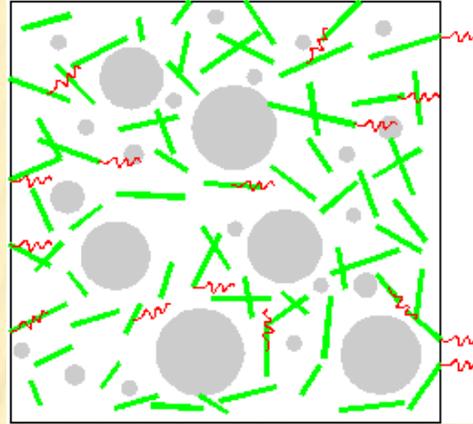
1. Problématique

Mécanisme de transfert hydrique Matrice-Fibre



$$K_{bf}^{\text{sup}} = cK_f + (1-c)K_{iso}$$

(a) Mécanisme en parallèle



$$K_{bf}^{\text{inf}} = \frac{1}{cK_f^{-1} + (1-c)K_{iso}^{-1}}$$

(b) Mécanisme en série

Perméabilité du béton fibré ?

$$K_{bf} = \alpha K_{bf}^{\text{sup}} + (1-\alpha) K_{bf}^{\text{inf}}$$

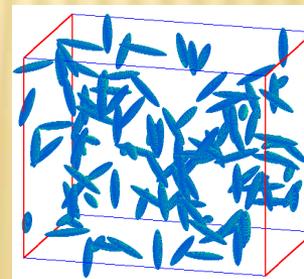
$$\alpha = ?$$

Théorie de percolation

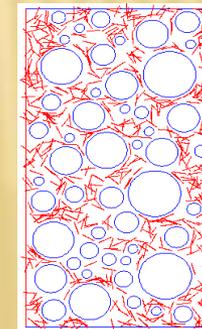
2D -
Homogène



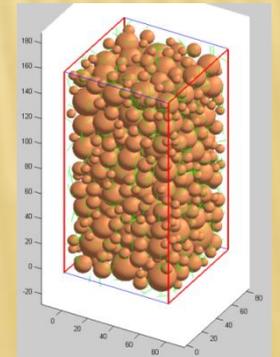
3D -
Homogène



2D -
Hétérogène



3D -
Hétérogène

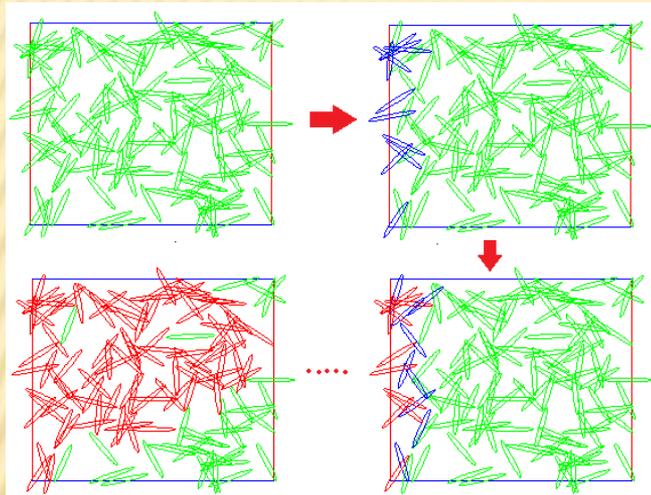


PLAN DE PRESENTATION

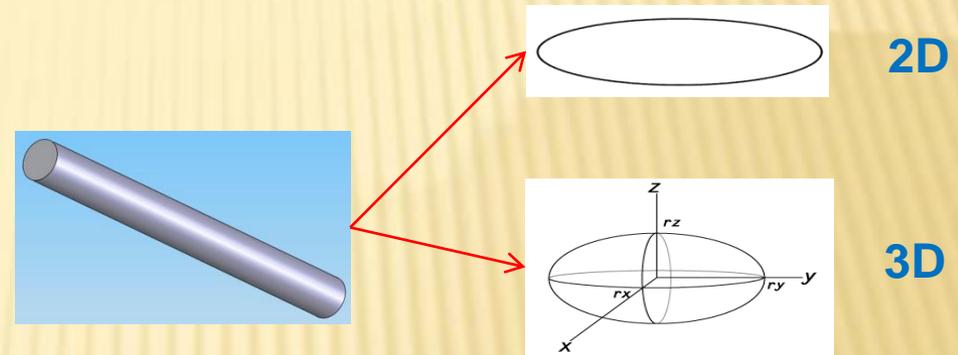
- I. Problématique
- II. Analyse de la percolation
- III. Étude de la perméabilité
- IV. Conclusion et prochain étape

1. Analyse de la percolation

Principe de l'algorithme _ Yi-2002



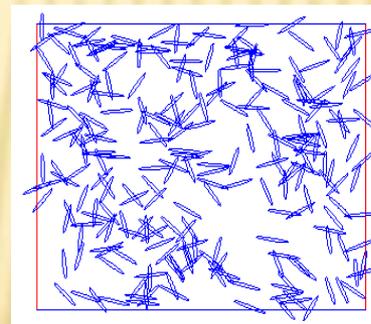
Modélisation des fibres:



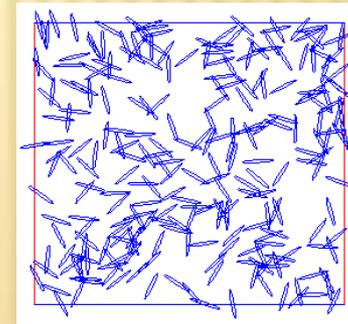
Formule de probabilité :

$$P = \frac{m}{N}$$

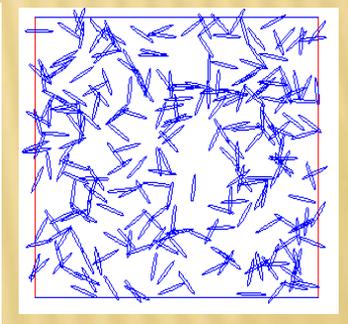
- m: Nombre des cas percolés
- N: Nombre des simulation



Tirage 1



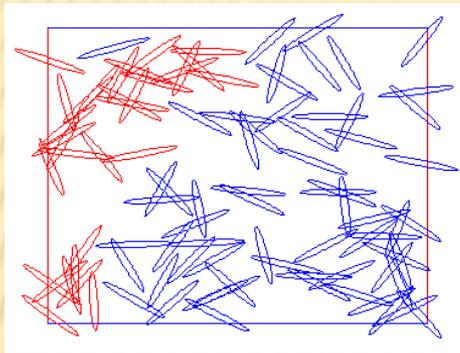
... Tirage i



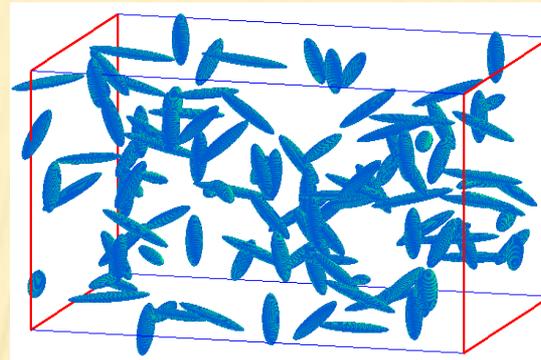
Tirage N

2. Analyse de la percolation

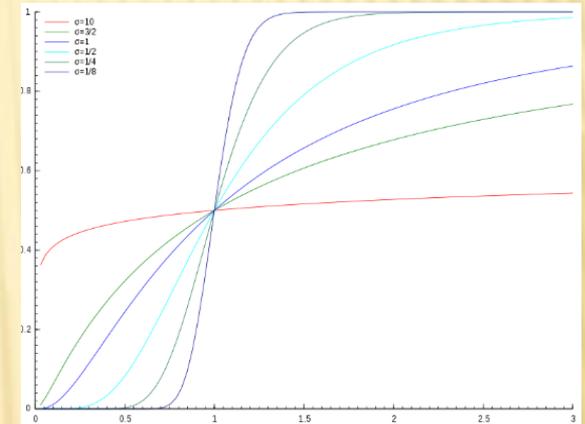
2.1. Cas du milieu homogène:



(a) Cluster 2D



(b) Cluster 3D

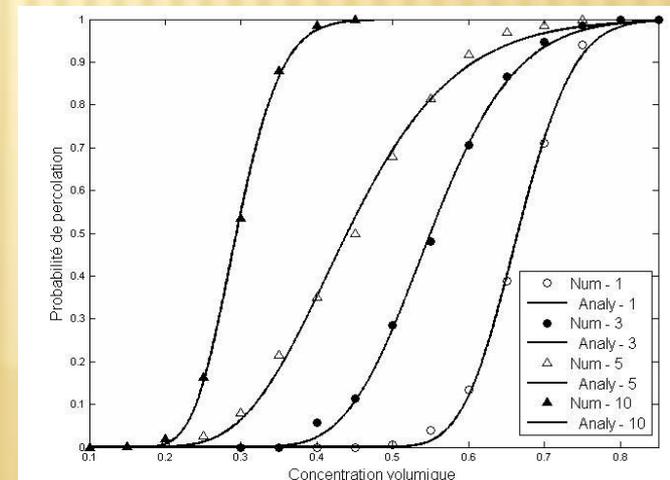


Loi Log-Normale : Fonction de répartition

Probabilités de percolation estimées par l'algorithme développé et interpolation

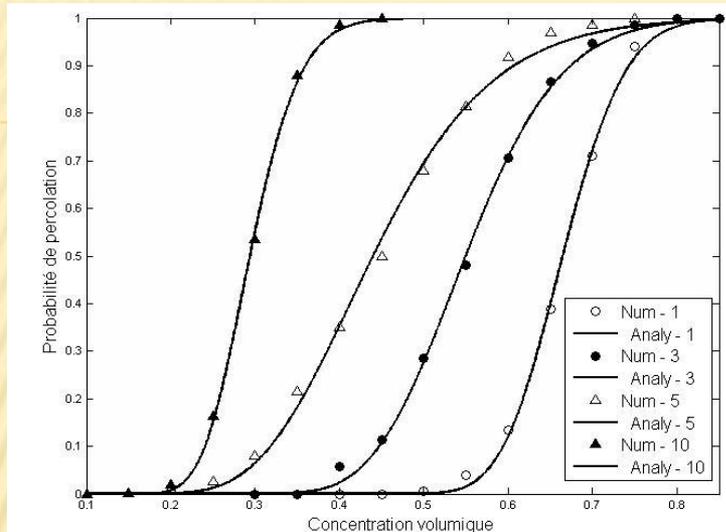
- Fonction d'interpolation : loi Log-Normale

$$p(c) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(c) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right)$$

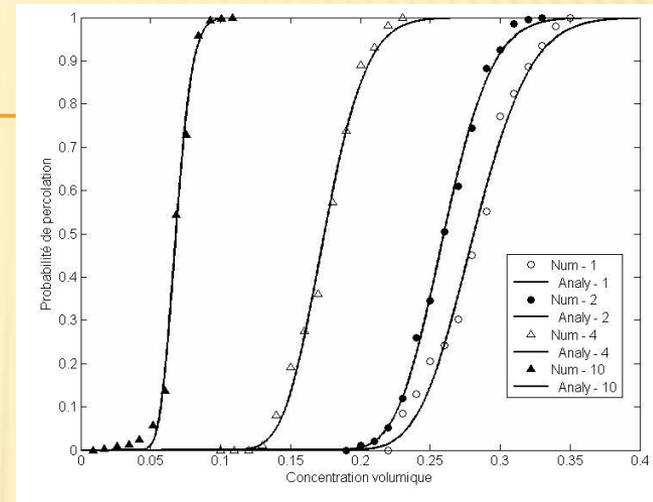


Interpolation – Différents cas tests en 2D

Probabilités de percolation 2D versus 3D – Milieu homogène

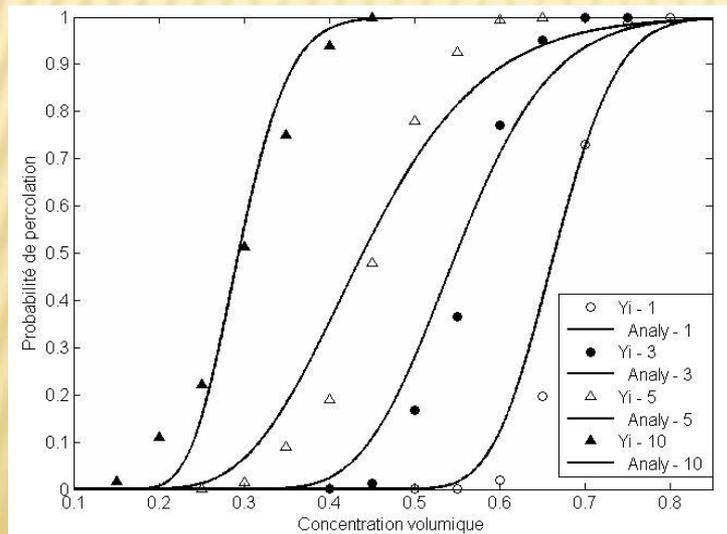


Cas tests 2D – Milieu homogène

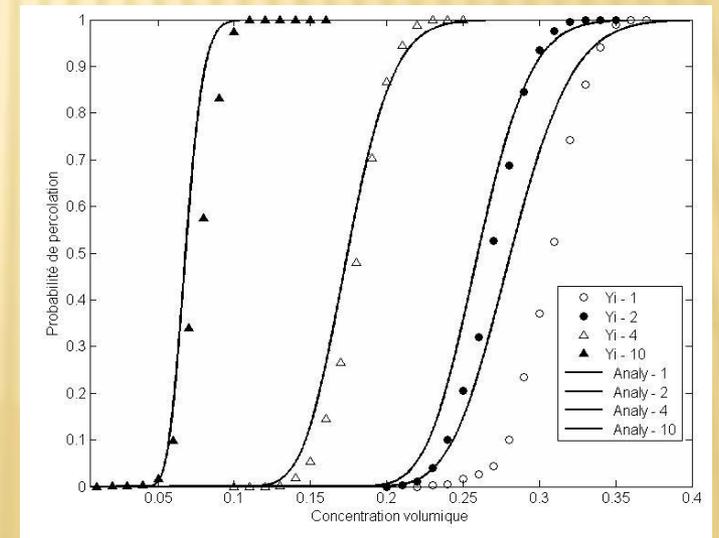


Cas tests 3D - Milieu homogène

Probabilités de percolation – Milieu homogène – Confrontation (Yi, 2002) / (Yi, 2004)



2D : Estimée versus Yi, 2002



3D : Estimée versus Yi, 2004

Critères d'équivalence

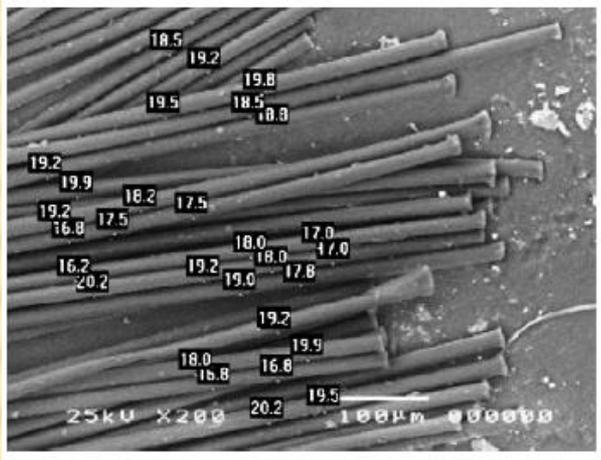
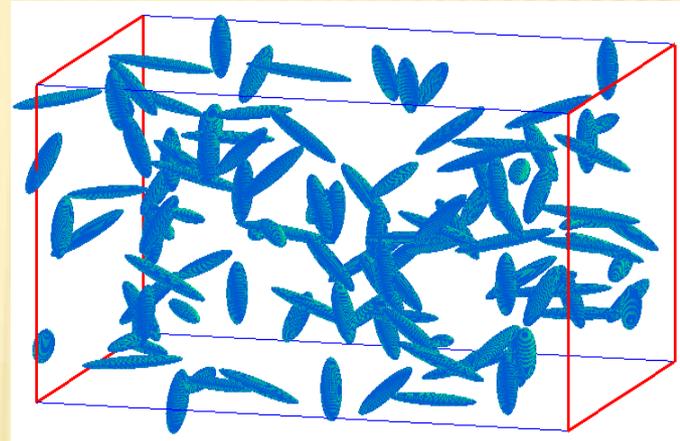


Image de fibres PP



Réalisation aléatoire de fibres en 3D
(Milieu homogène)



Fibre réelle : cylindre

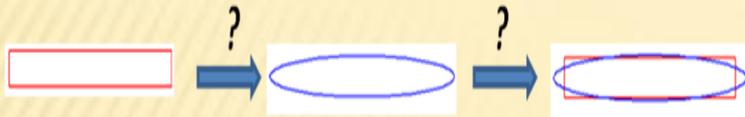


Fibre équivalente : Ellipsoïde



Des critères d'équivalences sont nécessaires

Critères d'équivalence – Cas 2D



Approximation 2D :

Fibre réelle : Rectangle

Fibre équivalente : Ellipse

Passage avec différents critères d'équivalence

- Cas 1 : Même volume – ratio Longueur-

Diamètre fibre conservé

- Cas 2 : Même volume – Longueur fibre

conservée

- Cas 3 : Même Longueur et Diamètre – Nombre

de fibres augmenté

Comparaison des probabilités de percolation

estimées dans chaque cas pour différents

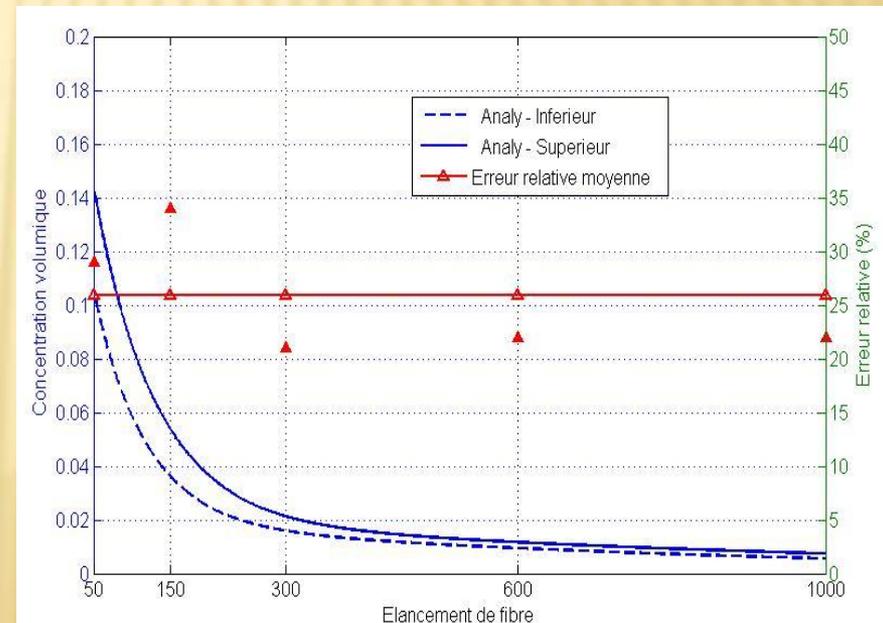
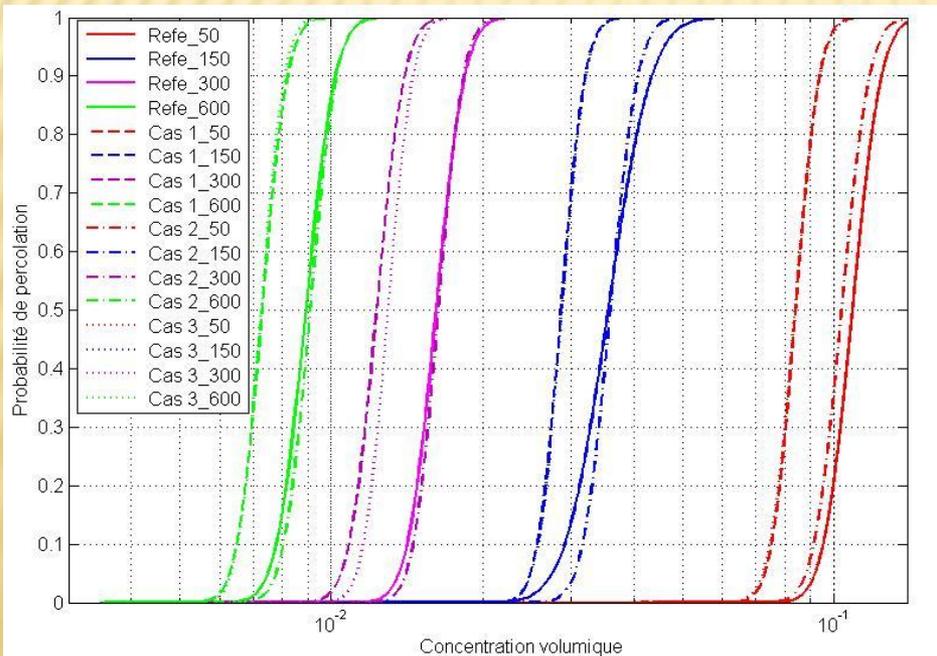
éclancements

Critères d'équivalence	Forme	L_E	d_E	α	Nombre de particules
Cas Référence	Rectangle	$L_E = L_f$	$d_E = d_f$		$n_{rec} = n_f$
Critère volumique 1	Ellipse	$L_E = \alpha L_f$	$d_E = \alpha d_f$	1.12	$n_E = n_f$
Critère volumique 2	Ellipse	$L_E = L_f$	$d_E = \alpha d_f$	1.27	$n_E = n_f$
Critère d'éclancement	Ellipse	$L_E = L_f$	$d_E = d_f$		$n_E = 1,5n_f$

Probabilité médiane de percolation

Erreur relative / Erreur relative moyenne sur la concentration

Estimation supérieure versus Estimation inférieure



Critères d'équivalences en 3D

Approximation 3D :

Fibre réelle : Cylindre

Fibre équivalente : Ellipsoïde

Passage avec différents critères d'équivalence

- Cas 1 : Même volume – ratio Longueur-

Diamètre fibre conservé

- Cas 2 : Même volume – Longueur fibre

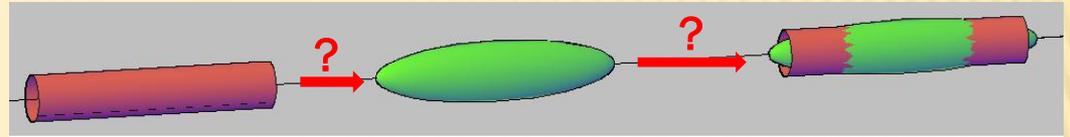
conservée

- Cas 3 : Même surface spécifique

- Cas 4 : Même Longueur et Diamètre – Nombre

de fibres augmenté

Comparaison des probabilités de percolation estimées dans chaque cas pour différents élançements

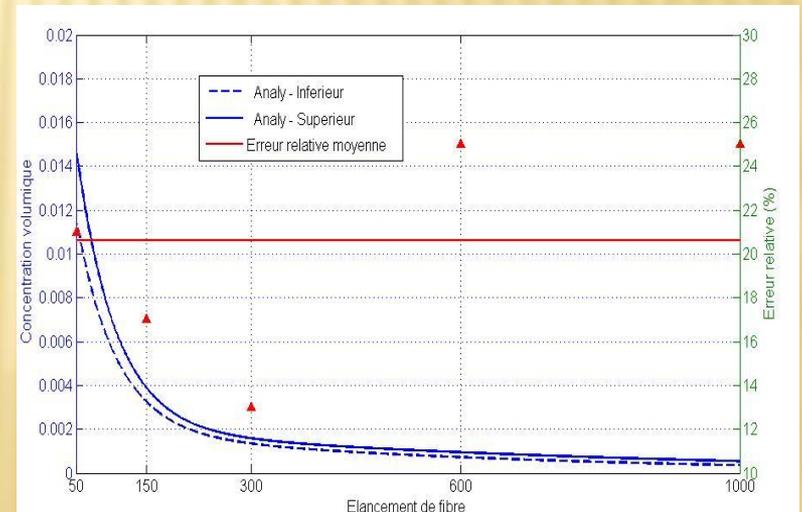
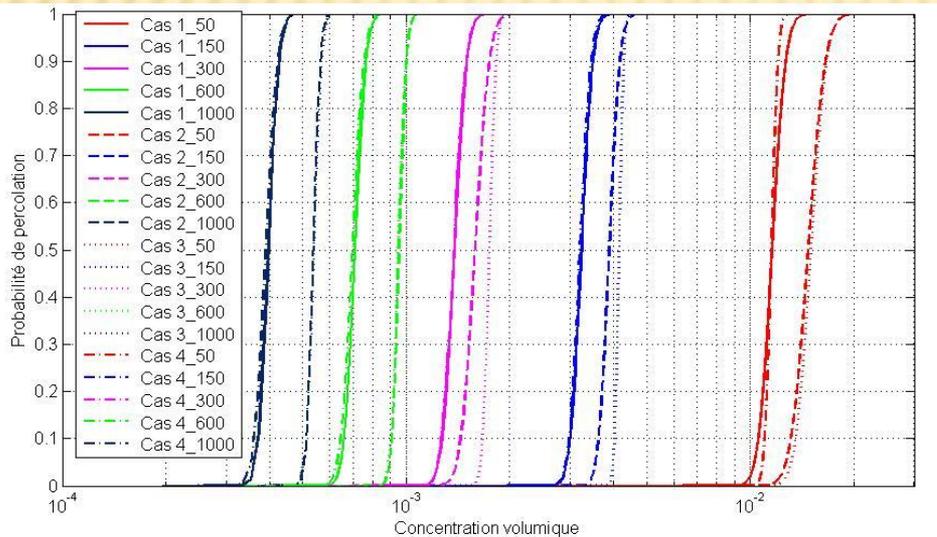


Critères d'équivalences	Forme	L_E	d_E	α	Nombre de particules
Critère volumique 1	Ellipsoïde	$L_E = \alpha L_f$	$d_E = \alpha d_f$	1.14	$n_E = n_f$
Critère volumique 2	Ellipsoïde	$L_E = L_f$	$d_E = \alpha d_f$	1.22	$n_E = n_f$
Critère de surface spécifique	Ellipsoïde	$L_E = L_f$	$d_E = \alpha d_f$	1.16	$n_E = n_f$
Critère d'élançement	Ellipsoïde	$L_E = L_f$	$d_E = d_f$		$n_E = 1,5n_f$

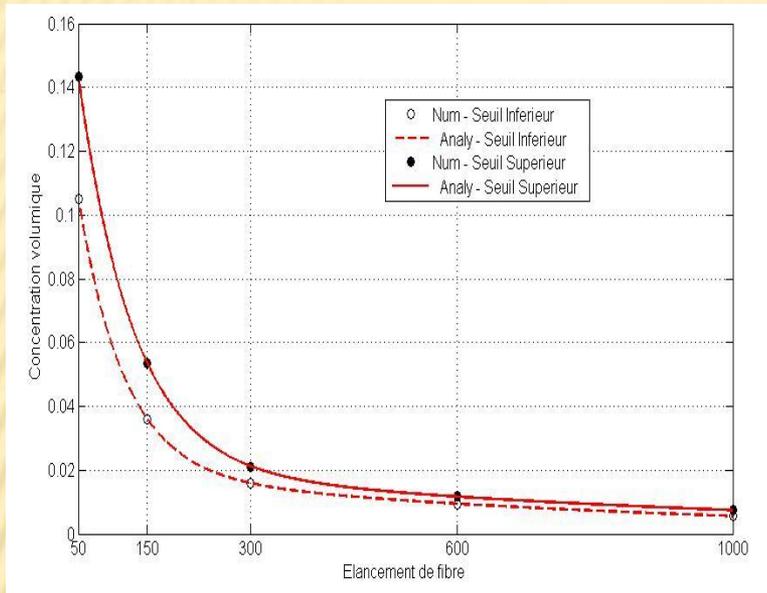
Probabilité médiane de percolation

Erreur relative / Erreur relative moyenne sur la concentration

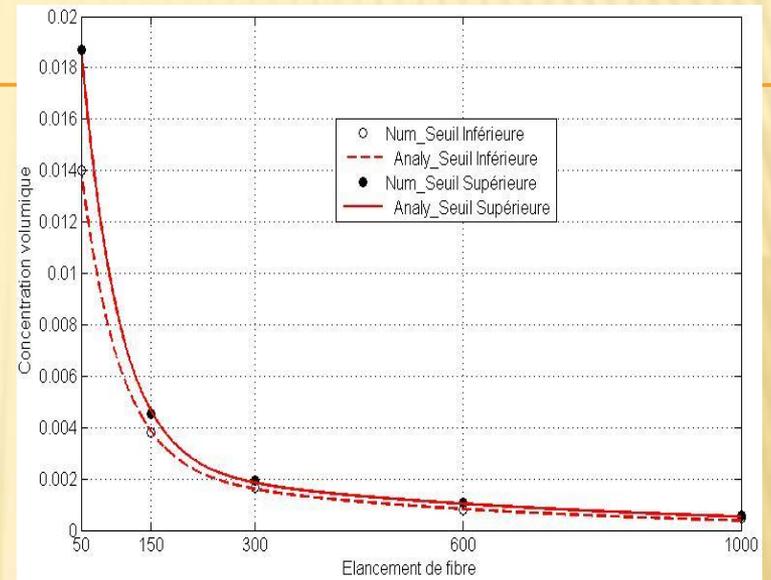
Estimation supérieure versus Estimation inférieure



Les dosages critiques du milieu homogène

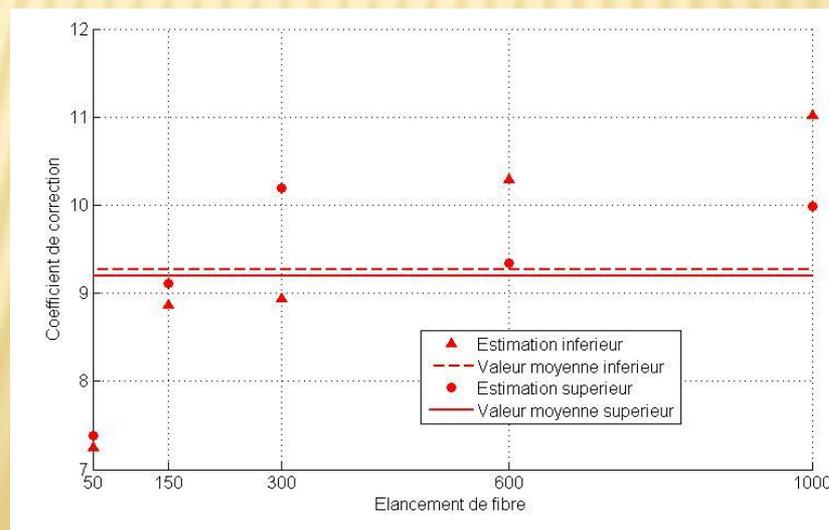


Dosage critique des fibres en 2D homogène.



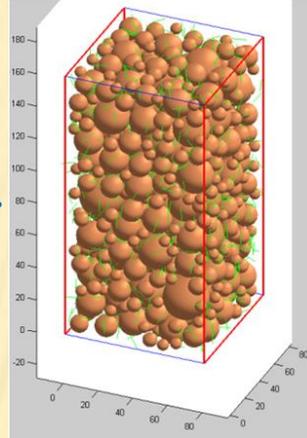
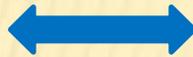
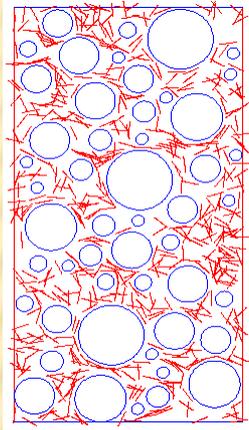
Dosage critique des fibres en 3D homogène.

Coefficient de correction : Passage 2D-3D – Cas homogène



2. Analyse de la percolation

2.2. Cas du milieu hétérogène

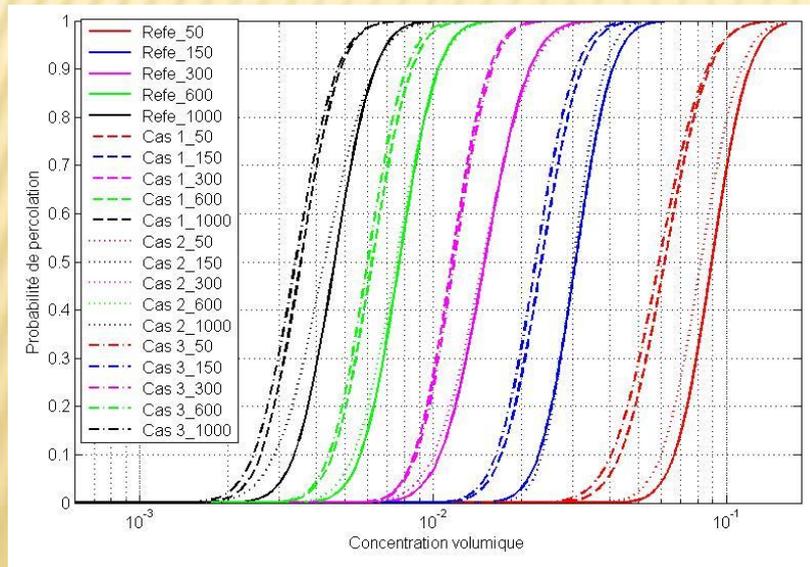


(a) Cluster 2D

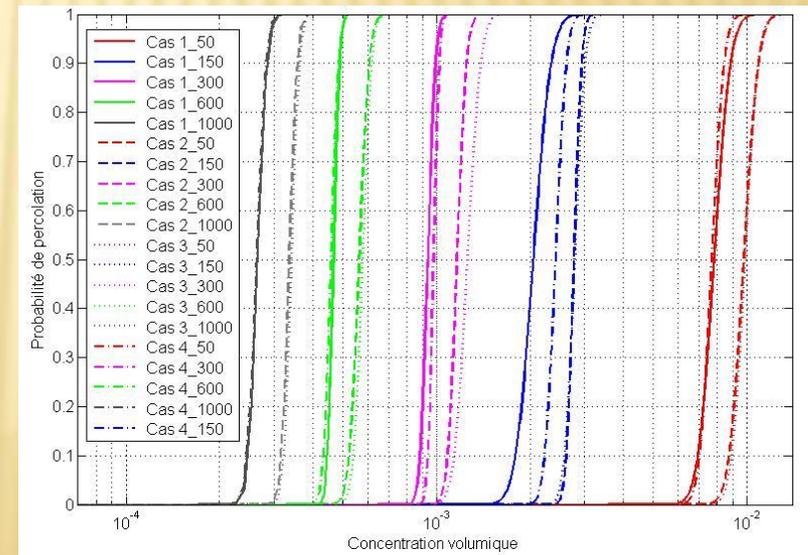
(b) Cluster 3D

Granulométrie du béton

Diamètre (mm)	6.3	8	10	12.5	16	20	25
Fraction volumique (%)	0.0345	0.030	0.04	0.068	0.1157	0.103	0.103

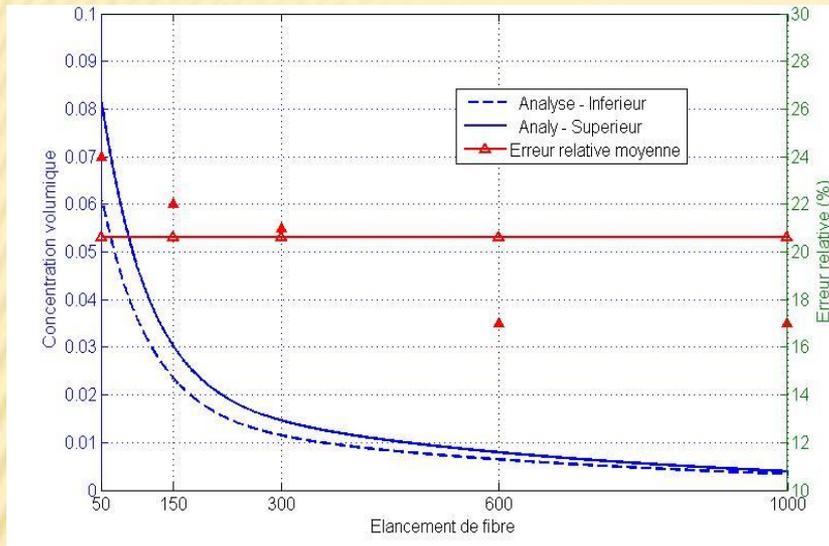


Probabilité de percolation en 2D

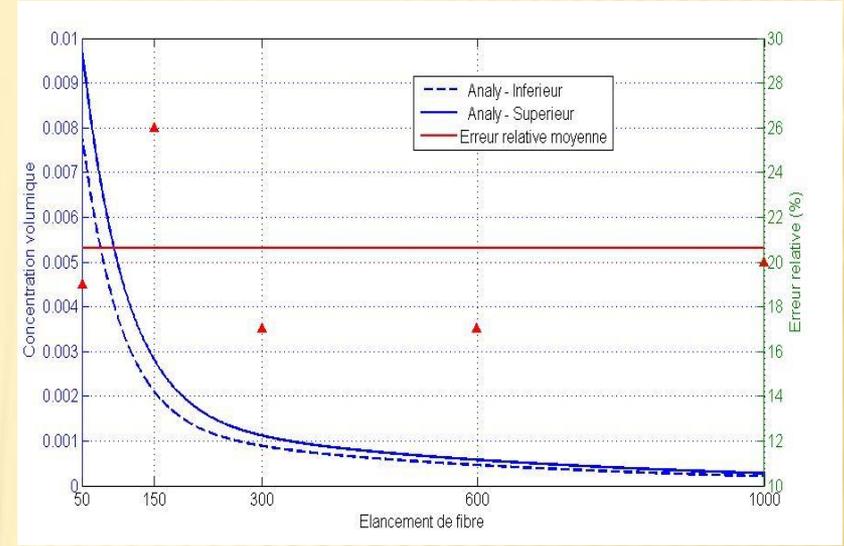


Probabilité de percolation en 3D

Probabilité médiane de percolation
 Erreur relative/ Erreur relative moyenne sur la concentration
 Estimation supérieure versus Estimation inférieure

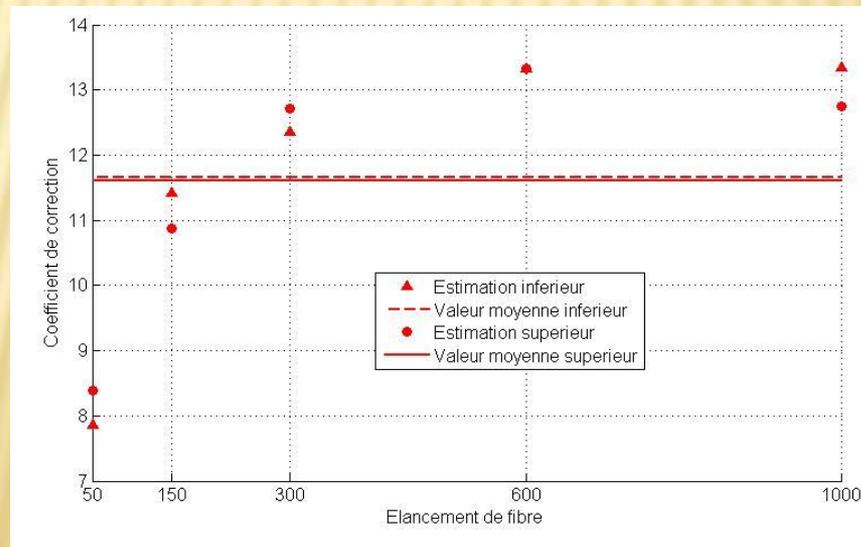


(a) 2D

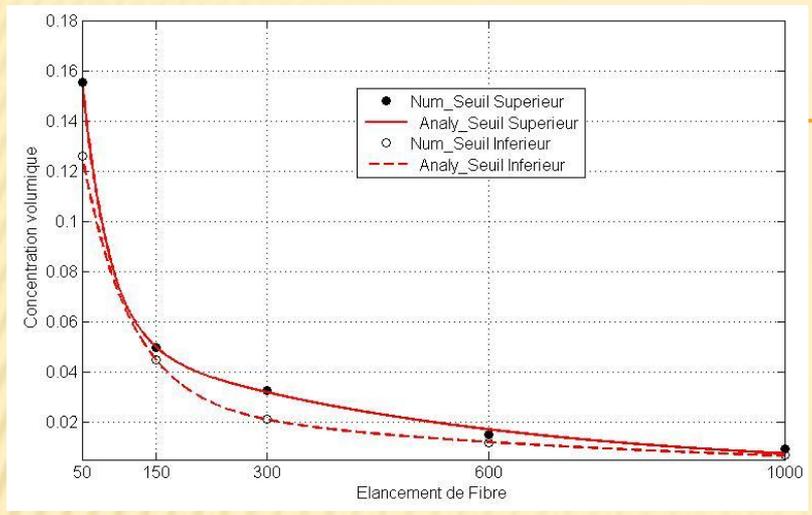


(b) 3D

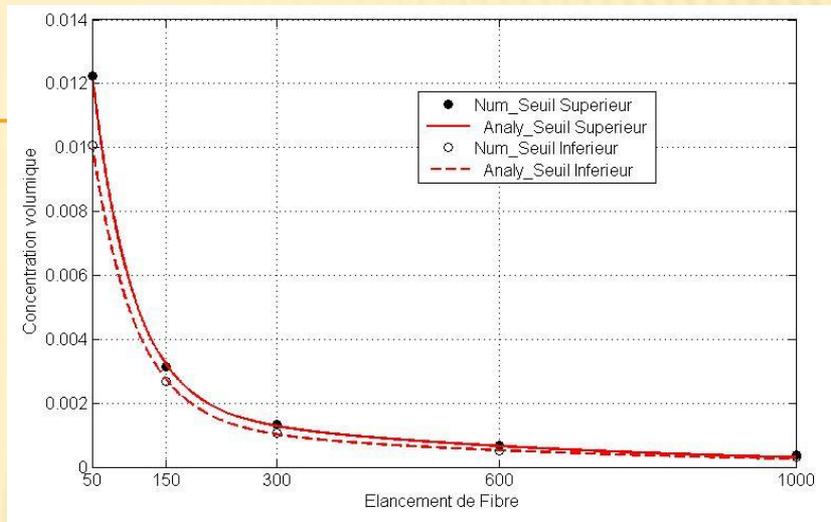
➡ Coefficient de correction : Passage 2D-3D – Cas hétérogène.



☛ Dosage critique des fibres en 2D et en 3D au milieu hétérogène.

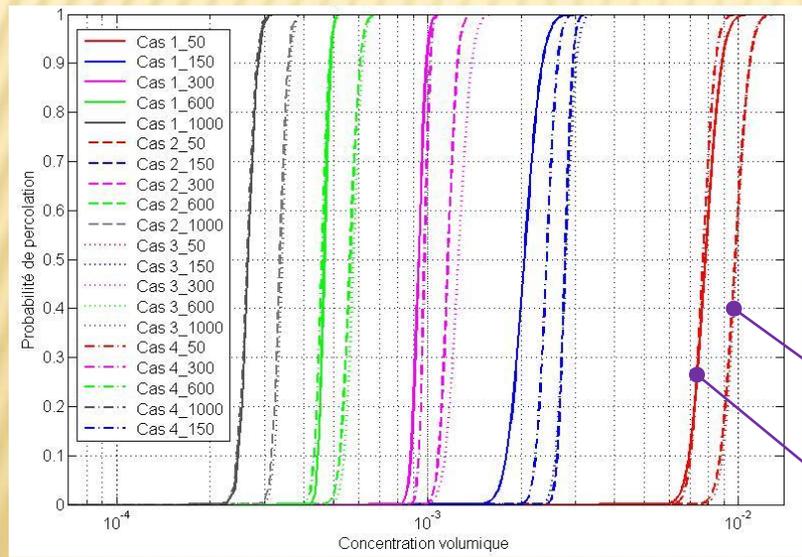


(a) 2D



(b) 3D

☛ Dosage seuil pour la formulation du béton



$$c_f \geq c_f^{seuil} = c_f^{max} (p = 1)$$

c_f

Dosage du béton

$c_f^{max} (p)$

Dosage issu des critères d'équivalence 2 / 3

$c_f^{max} (p)$

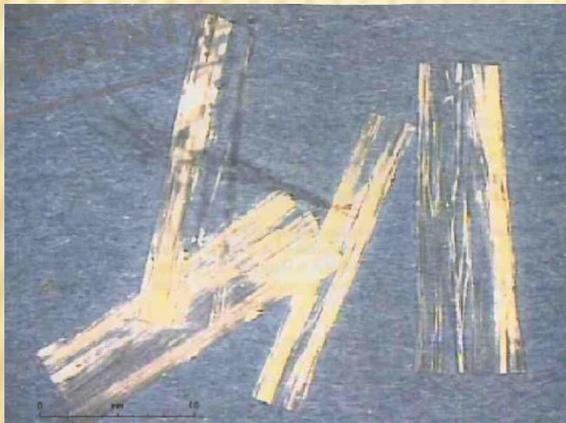
$c_f^{min} (p)$

☛ Critères d'équivalence non retenus 1 / 4

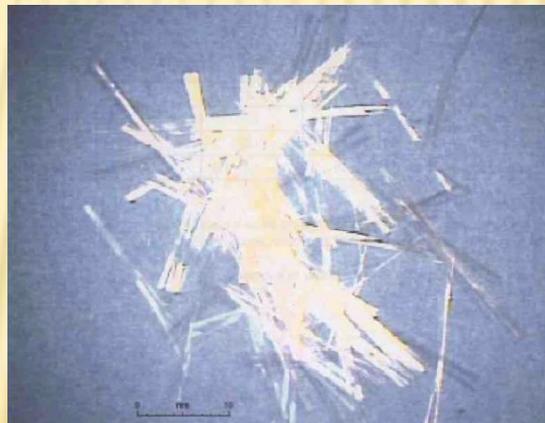
☛ Confrontation avec des essais expérimentaux

Informations des essais expérimentaux

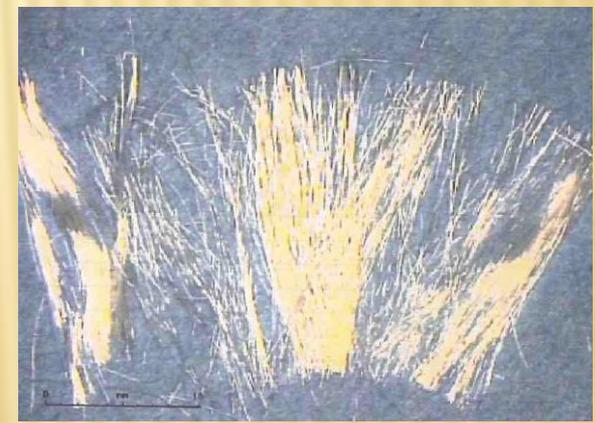
<i>Auteurs</i>	<i>L_f (mm)</i>	<i>d_f (μm)</i>	<i>Elancement</i>	<i>Dosage (kg/m³)</i>	<i>Forme</i>
<i>Zeilm_2006</i>	6	18	333	1.5	monofilament
<i>Mindeguia_2009</i>	12	18	667	2	monofilament
<i>ATILH (1)_2006</i>	18	18	1000	0 - 0.9 - 1.2	monofilament
<i>ATILH (2)_2006</i>	6	50	120	1.5	Semi-fibrillé
<i>ATILH (3)_2006</i>	19	50	380	1.5	Fibrillé



(a) Fibrillés



(b) Semi-fibrillés



(c) Monofilament

Type de Fibre PP (ATILH 2006)

Comparaisons des dosages des essais expérimentales et des dosages critiques.

<i>Auteurs</i>	<i>Elancement</i>	<i>Dosage critique (kg/m³)</i>	<i>Dosage Essais (kg/m³)</i>	<i>Ecaillage</i>
<i>Zeilm_2006</i>	333	1.16	1.5	X
<i>Mindeguia_2009</i>	667	0.574	2	X
<i>ATILH (1)_2006</i>	1000	0.377	0	Oui
<i>ATILH (1)_2006</i>	1000	0.377	0.9	Non
<i>ATILH (1)_2006</i>	1000	0.377	1.2	Non
<i>ATILH (2)_2006</i>	120	4.5	1.5	Profondeur des éclats jusqu'à 6cm
<i>ATILH (3)_2006</i>	380	1	1.5	Petit éclats superficiels <1 cm



(a) ATILH (1)



(b) ATILH (2)

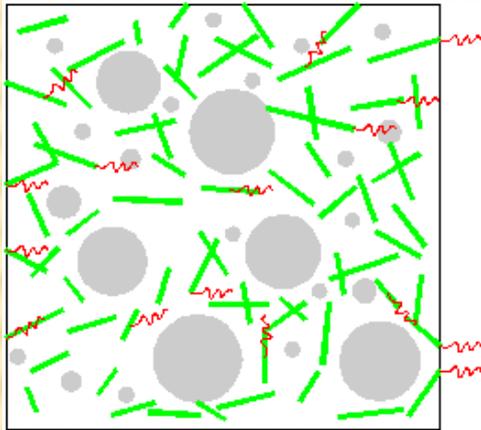


(c) ATILH (3)

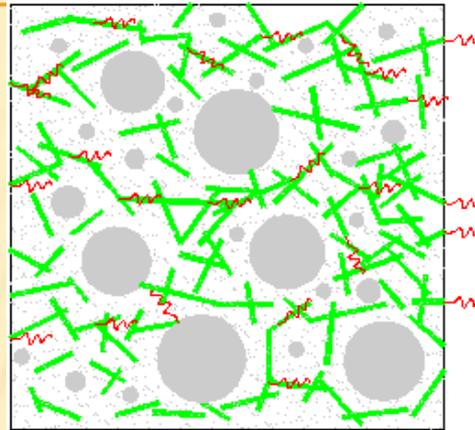
PLAN DE PRESENTATION

- I. Problématique
- II. Analyse de la percolation
- III. Étude de la perméabilité
- IV. Conclusion et prochain étape

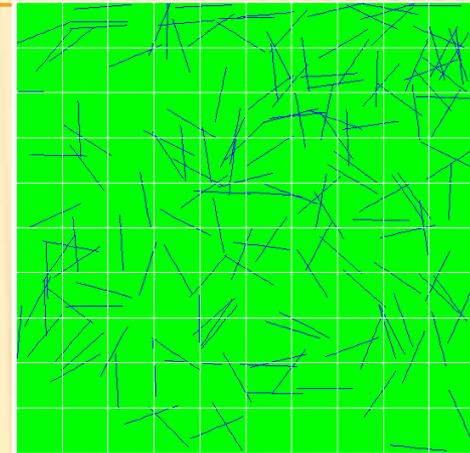
3. Étude de la perméabilité



(a) mécanisme de percolation en série



(b) mécanisme de percolation en parallèle



Distribution des fibres aléatoires dans le maillage en 2D homogène. (Cast3m)

Perméabilité en série

$$K_{bf}^{serie} = \phi_f \cdot K_f + (1 - \phi_f) \cdot K_b$$

Perméabilité en parallèle

$$\left(K_{bf}^{parallele} \right)^{-1} = \phi_f \cdot K_f^{-1} + (1 - \phi_f) \cdot K_b^{-1}$$

Perméabilité combinée

$$K_{beton-fibre} = p \cdot K_{bf}^{serie} + (1 - p) \cdot K_{bf}^{parallele}$$



Probabilité de percolation

Matrice de perméabilité en repère locale

$$K_{\equiv f}^L = \frac{\phi_f d_f^2}{32} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrice de perméabilité en repère globale

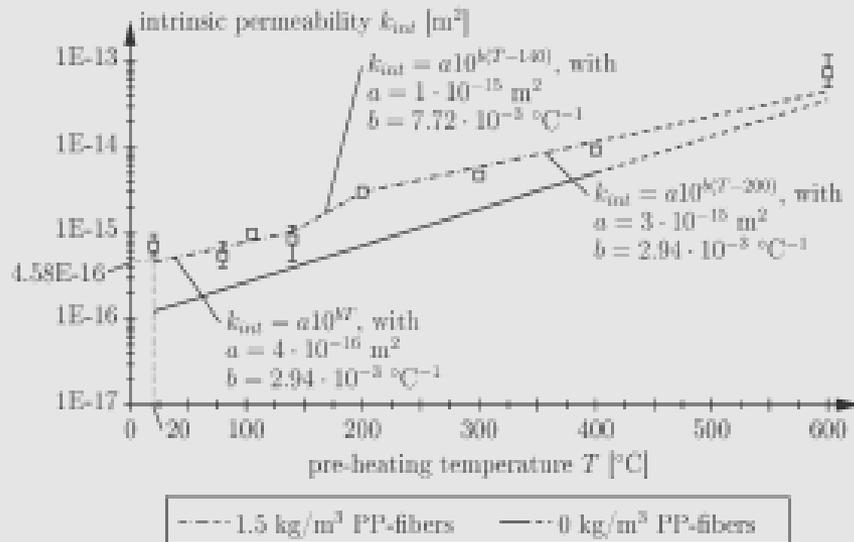
$$K_{\equiv f}^G = \frac{\phi_f d_f^2}{32} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta \cos^2 \varphi & \cos^2 \theta \cos \varphi \sin \varphi & -\cos \theta \sin \theta \cos \varphi \\ \cos^2 \theta \cos \varphi \sin \varphi & \cos^2 \theta \sin^2 \varphi & -\cos \theta \sin \theta \sin \varphi \\ -\cos \theta \sin \theta \cos \varphi & -\cos \theta \sin \theta \sin \varphi & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

Comparaison des essais expérimentaux

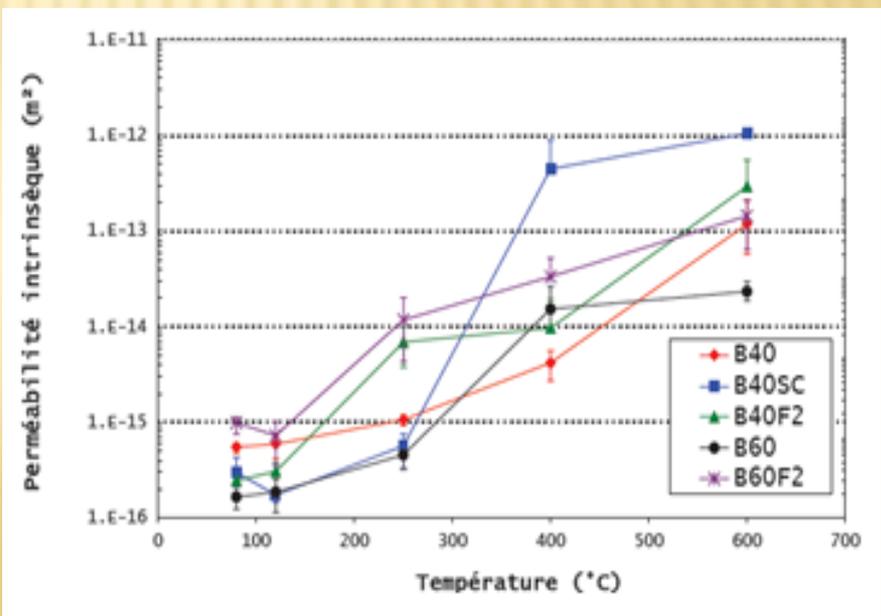
Informations des essais expérimentaux

Auteurs	L_f (mm)	d_f (μm)	Elancement	Dosage (kg/m^3)	Forme
<i>Zeilm_2006</i>	6	18	333	1.5	monofilament
<i>Mindeguia_2009</i>	12	18	667	2	monofilament
<i>ATILH_2006</i>	18	18	1000	0 - 0.9 - 1.2	monofilament

Perméabilité intrinsèque du béton fibré avec le dosage 1,5 kg/m^3 [Zeilm 2006]



Perméabilité intrinsèque du béton fibré [Mindeguia 2009]

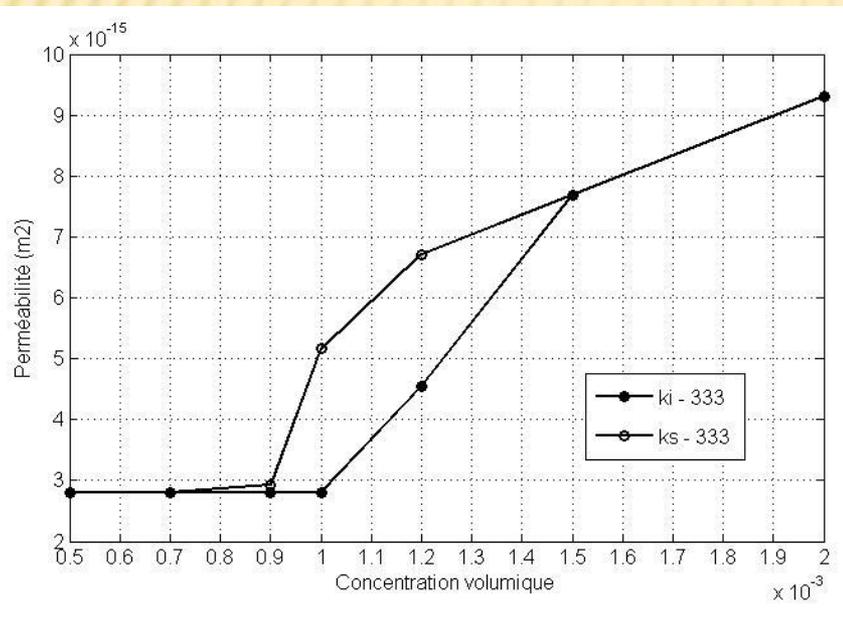


Les simulations de perméabilité des fibres PP et la confrontation avec l'essai de Zeilm (2006) (Dosage 1,5 kg/m³)

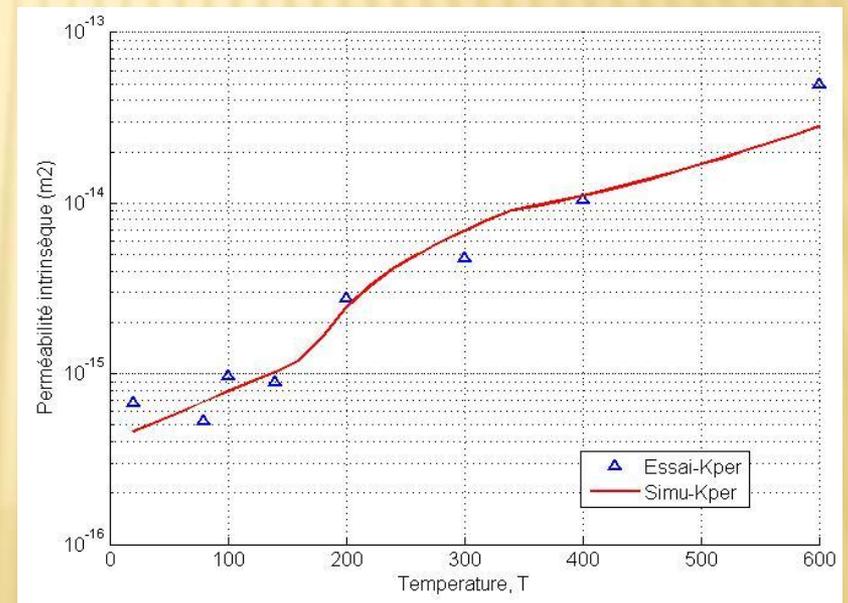
Les résultats des perméabilités au point de dégradation des fibres

Résultats-Essais		Résultats de simulation				
$K_{\text{béton}}$	$K_{\text{béton-Fibre}}$	$K_{\text{Béton-Fibre}}^{\text{Parallele}}$	$K_{\text{Béton-Fibre}}^{\text{Serie}}$	ρ	K_{bf}	Erreur (%)
2.81E-15	7.74E-15	7.86E-15	2.81E-15	1	7.86E-15	1.53

Perméabilité intrinsèque du béton fibré en fonction du dosage au point de dégradation des fibres



Perméabilité intrinsèque du béton fibré en fonction de la température et confrontation avec des essais de Zeilm

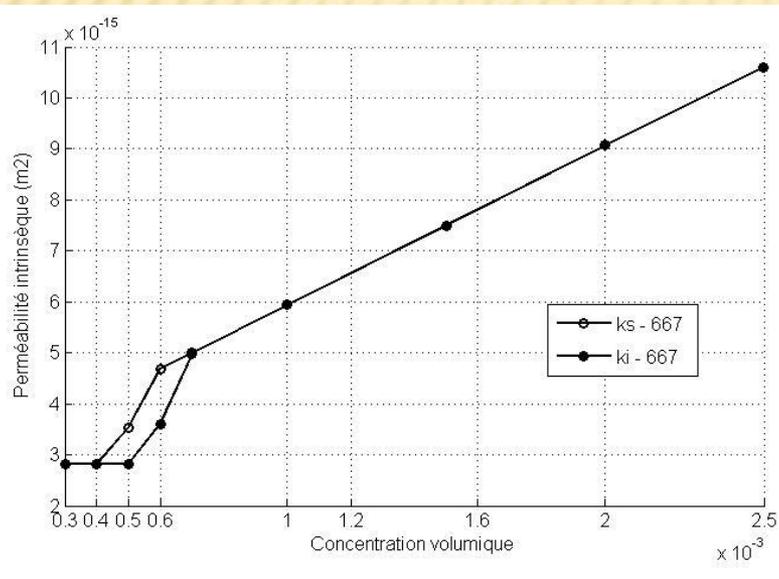


Les simulations de perméabilité des fibres PP et la confrontation avec l'essai de Mindeguia (2009) (Dosage 2 kg/m³)

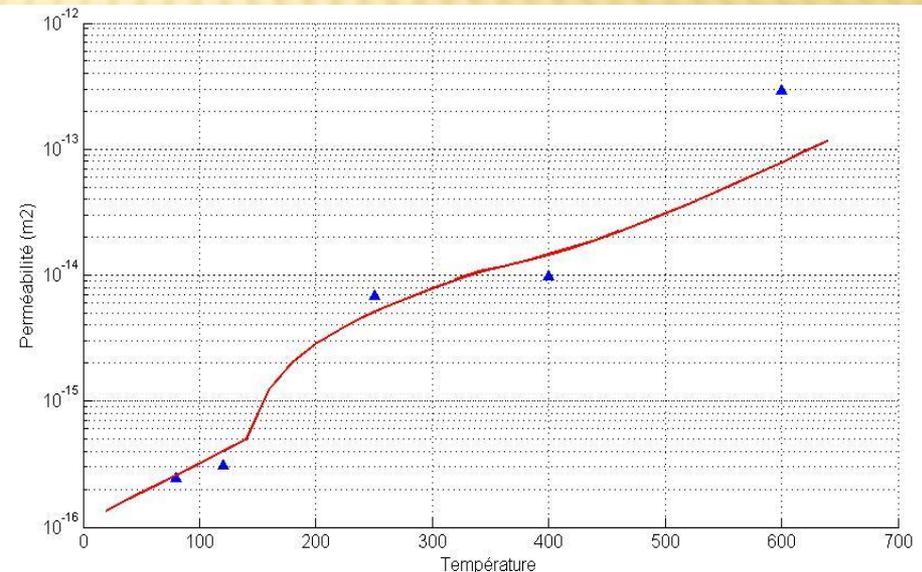
Les résultats des perméabilités au point de dégradation des fibres PP

Résultats des essais		Résultats de la simulation				
$K_{\text{béton}}$	$K_{\text{béton-Fibre}}$	$K_{\text{Parallele Beton-Fibre}}$	$K_{\text{Serie Beton-Fibre}}$	ρ	K_{bf}	Erreur (%)
4.15E-15	1.02E-14	1.06E-14	4.157E-15	1	1.06E-14	3.7

Perméabilité intrinsèque du béton fibré en fonction du dosage au point de dégradation des fibres



Perméabilité intrinsèque du béton fibré en fonction de la température et confrontation avec des essais de Mindeguia

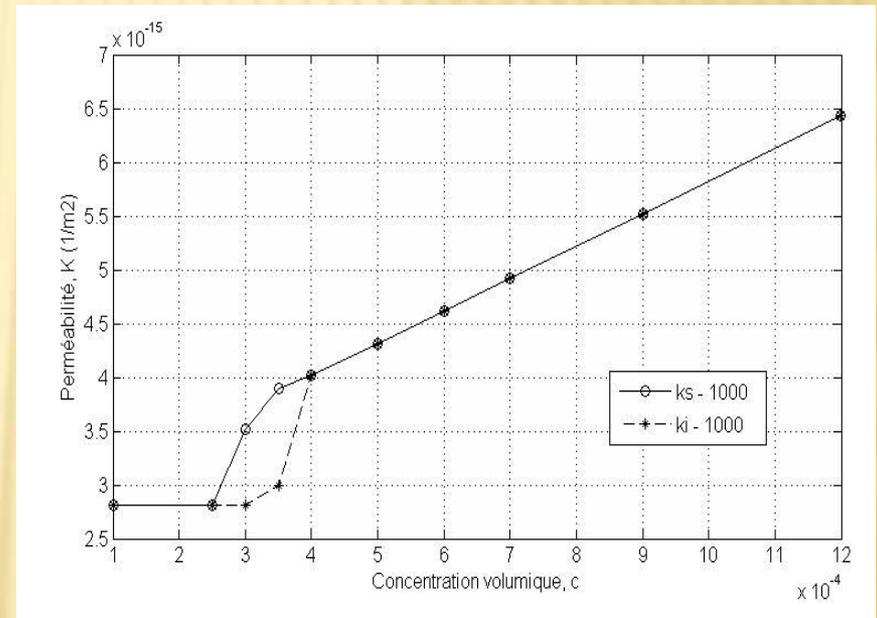


Les simulations de perméabilité des fibres PP et la confrontation avec l'essai de l'ATILH (1) (2006)

Les Essais de l'ATILH (1) (2006)



Perméabilité intrinsèque du béton fibré en fonction du dosage au point de dégradation des fibres PP des essais de l'ATILH (1)



PLAN DE PRÉSENTATION

- I. Problématique --> Rappel
- II. Analyse de percolation
- III. Étude de la perméabilité
- IV. **Conclusion et prochain étape**

Conclusion

- ❖ Il y a deux seuils de percolations des fibres qui sont déterminées par les ellipses équivalences en 2D et les ellipsoïdes équivalences en 3D
- ❖ En comparaison avec des essais expérimentaux, on conclue que le dosage efficace des fibres pour éliminer des écaillages est supérieur du dosage critique.
- ❖ L'influence du dosage des fibres sur la perméabilité intrinsèque est déterminée par la probabilité de percolation.
- ❖ Les résultats de perméabilités intrinsèque –confrontation avec des essais: valable

Prochaine étape

- ❖ Etudier des influences des paramètres des fibres PP sur la percolation et la perméabilité intrinsèque du béton fibré.
- ❖ Détermination des abaques
- ❖ Implantation des fibres polypropylènes dans les calculs de THM (Castem)

MERCI DE VOTRE ATTENTION!