SIMULATIONS PAR MODÈLES DE ZONES COHÉSIVES DE LA FISSURATION EN MODE MIXTE DE LA PÂTE DE CIMENT ET DE L'INTERFACE PÂTE DE CIMENT/GRANULAT SOUS FLEXION 3 POINTS

Sirine Al Dandachli

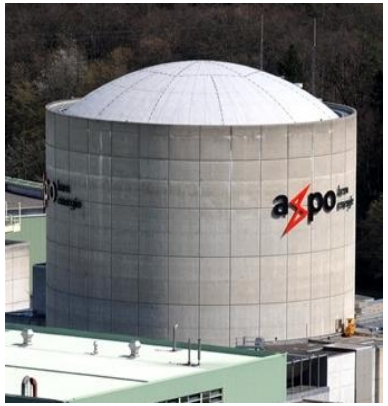
Encadrants : Frédéric Perales
Yann Monerie
Frédéric Jamin
Céline Pelissou
Moulay Saïd El Youssoufi

IRSN/FRM-296 ind. 07

MEMBRE DE ETSON

Contexte

La prédiction du comportement du béton dans les structures en génie civil forme une exigence importante dans le domaine de stabilité et sécurité des ouvrages à court et à long termes


Centrale nucléaire

Pont

Barrage

Chargement TCM

- **Mécanique** (chargement statique, fatigue, …)
- **Thermique** (cycle de gel-dégel, incendie, …)
- **Chimique** (carbonatation, attaque des chlorures, alcali-réaction, attaque sulfatique…)

Conséquences

Pont

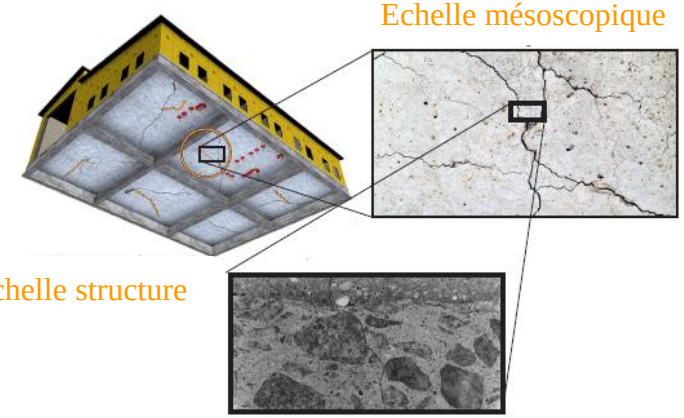
Barrage

Faïençage et **fissuration**

Problématique

Une des conséquences : mécanisme de fissuration du béton

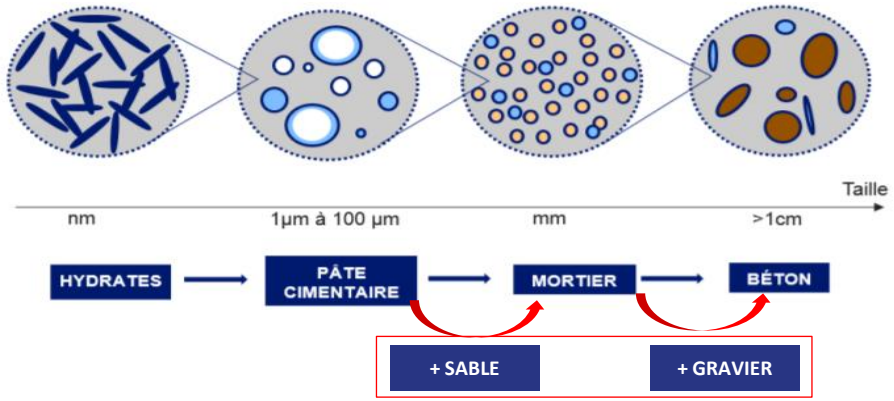
- Phénomène complexe
- Caractère multi-échelle
- Dépend de la microstructure de béton



Introduction

Béton : composants et propriétés

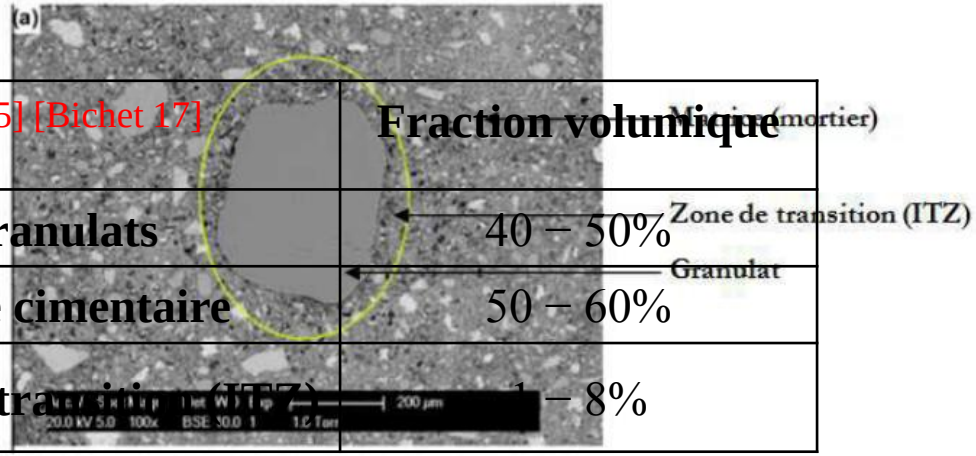
- **Matériau à forte hétérogénéité** → Composition complexe



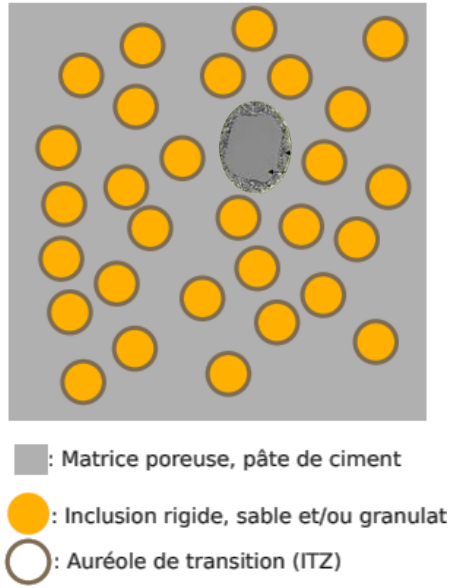
➡ **Granulats**

- Ajout des granulats modifie la microstructure du béton → Phase intermédiaire induite : **Auréole de transition** ou **ITZ** (Interfacial Transition Zone)

- Béton formé de **3 phases** :



[Granger 95] [Bichet 17]	**Fraction volumique**
Granulats	40 – 50%
Matrice cimentaire	50 – 60%
Auréole de transition (ITZ)	1 – 8%



Introduction

Béton : composants et propriétés

- Propriétés mécaniques et de transport :

Mécaniques (élasticité, résistance,...)

Granulats > Matrice cimentaire > ITZ

Transport (perméabilité, diffusion, …)

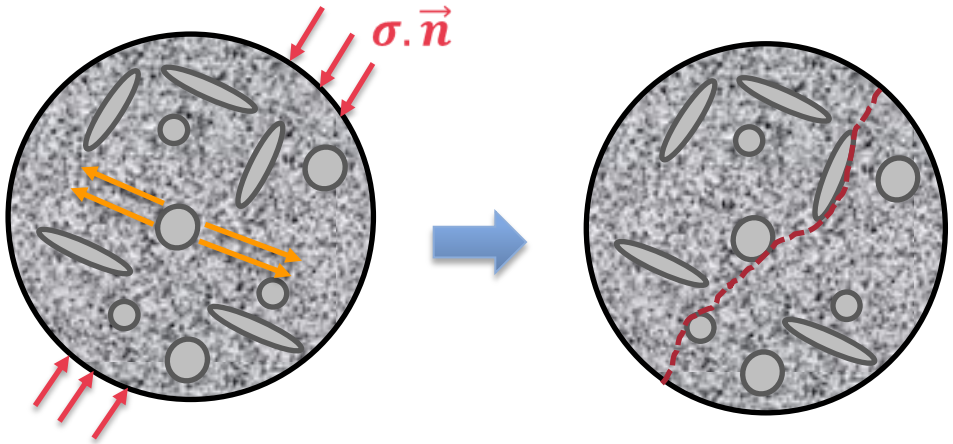
ITZ > Matrice cimentaire > Granulats

Gradient des propriétés mécaniques et de transport :

- Comportement différé (retrait, fluage)
- Comportement thermique
- Attaque chimique

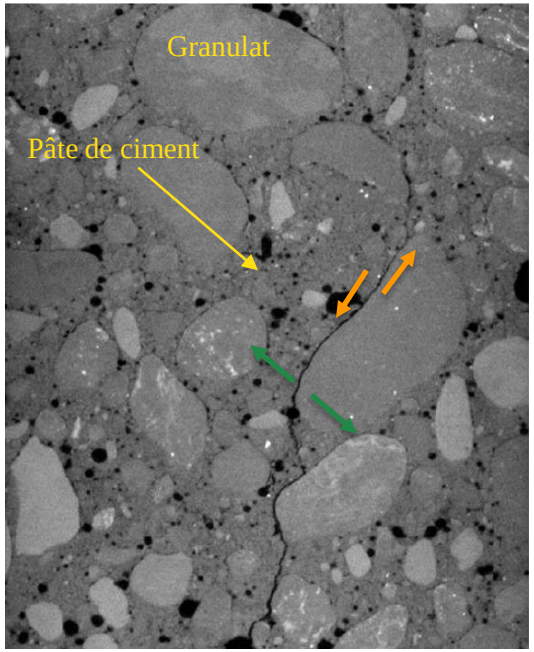
- Hétérogénéité des champs de déformations → Fissuration privilégiée dans les zones fragiles

	Matrice cimentaire	Fragile
	Granulat	Élastique (rigide)
	ITZ	Fragile
----	Fissuration	Discontinuité



Fissuration dans le béton

- Zones privilégiées de propagation de fissure
  - Matrice cimentaire
  - Interface matrice/granulat

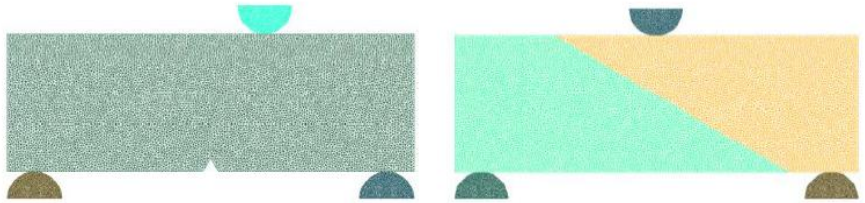


- On s'intéresse aux deux modes de propagation:
  - Mode I (ouverture)
  - Mode II (glissement plan)

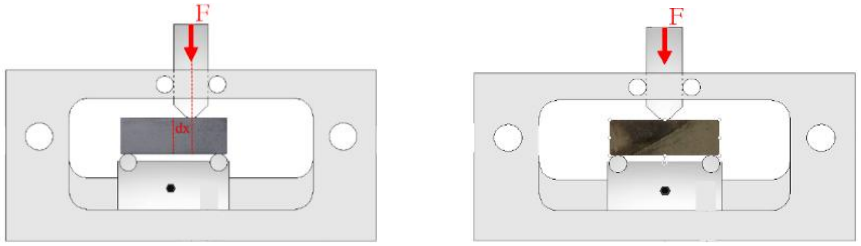
Objectifs

- Modéliser la propagation de fissures en **mode I** et en **mode mixte (I + II)** dans un matériau cimentaire (**matrice** et **interface matrice/granulat)**

  - Mise en place d'un **modèle numérique** qui permet la prédiction de fissure localement par l'approche des Modèles de Zones Cohésives (**CZM**)

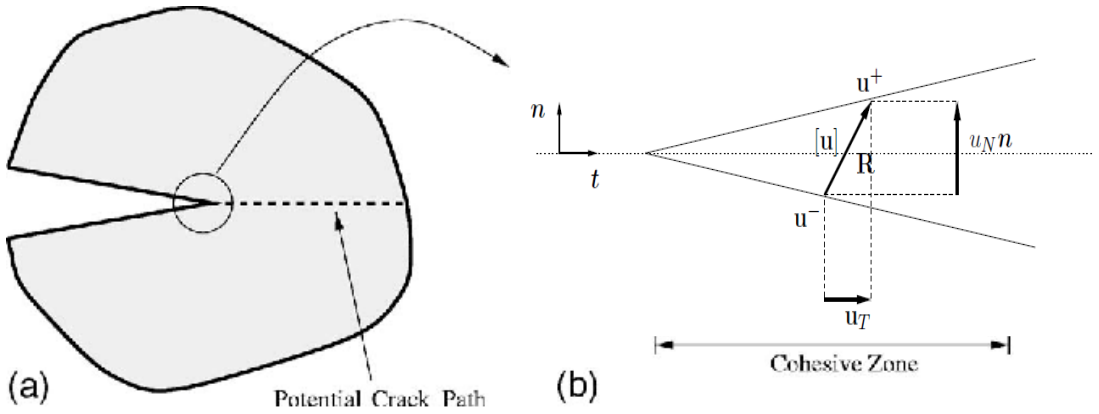


  - **Validation expérimentale** des simulations numériques par des essais de flexion 3 points



Modélisation de la fissuration : Modèle de Zones Cohésives (CZM)

- CZM : loi de comportement surfacique de traction-séparation



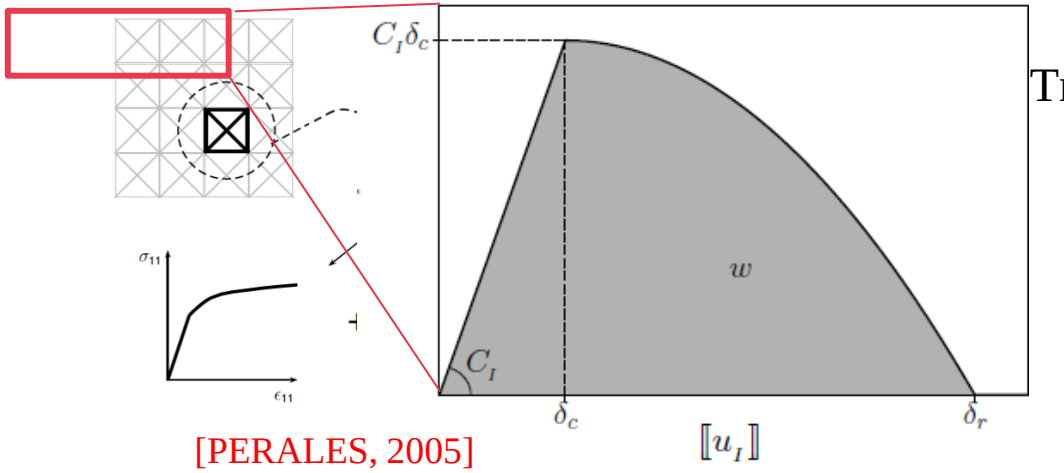
[PERALES, 2005]

→ Relation entre contrainte adhésive et saut de déplacement au niveau des lèvres de fissures

$$R_{coh} = f_{cr}([u])$$

R : Contrainte de cohésion
u : Saut de déplacement

- CZM → Explosion d'un maillage éléments finis



[PERALES, 2005]

Trois paramètres :

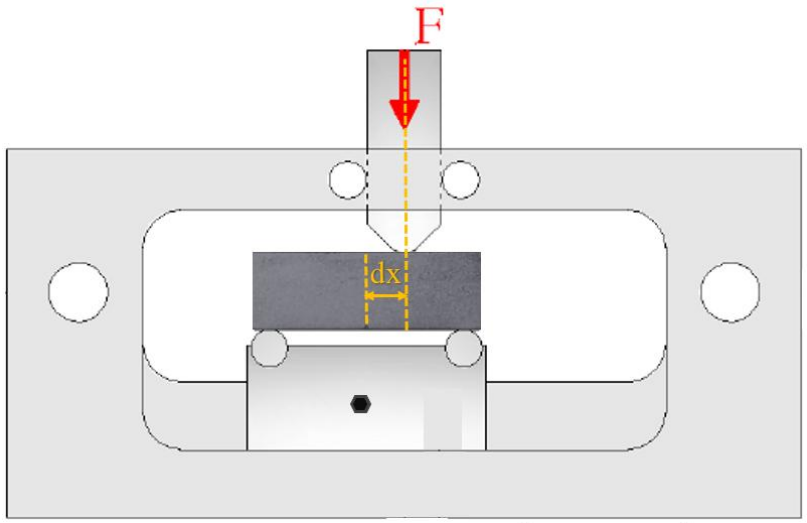
- σ_i (contrainte cohésive critique)
- W_i (énergie cohésive)
- C_i (raideurs cohésives initiales)

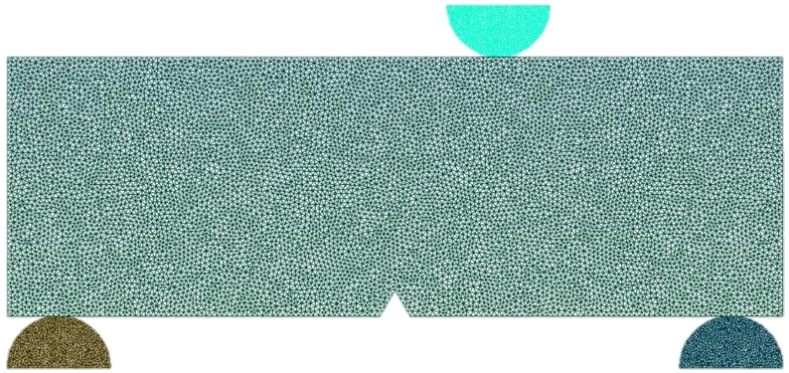
Mode normal (i=1)
Mode tangent (i=2)

Simulations : Essais de flexion 3 points – Pâte de ciment

- Éprouvette : **Pâte de ciment pré-entaillée**
- Essai : Flexion 3 points avec **chargement « excentré » dx**
- Excentricité dx :
  - 0 mm (mode normal)
  - 2,5 ; 5 ; et 7,5 mm (mode mixte)
- Paramètres élastiques :
  - Module d'Young : E = 12 GPa
  - Coefficient de Poisson : ν = 0,2
- Paramètres numériques :

Pdc	Normal	Tangentiel
σ_i [MPa]	3,1	31
W_i [N/m]	25	250
C_i [MPa/m]	$7{,}7 \times 10^{11}$	$9{,}8 \times 10^{11}$

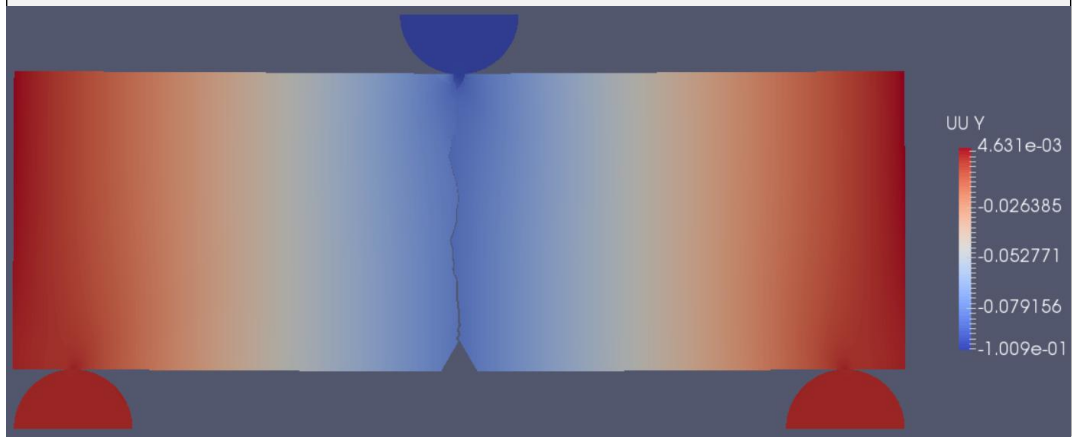




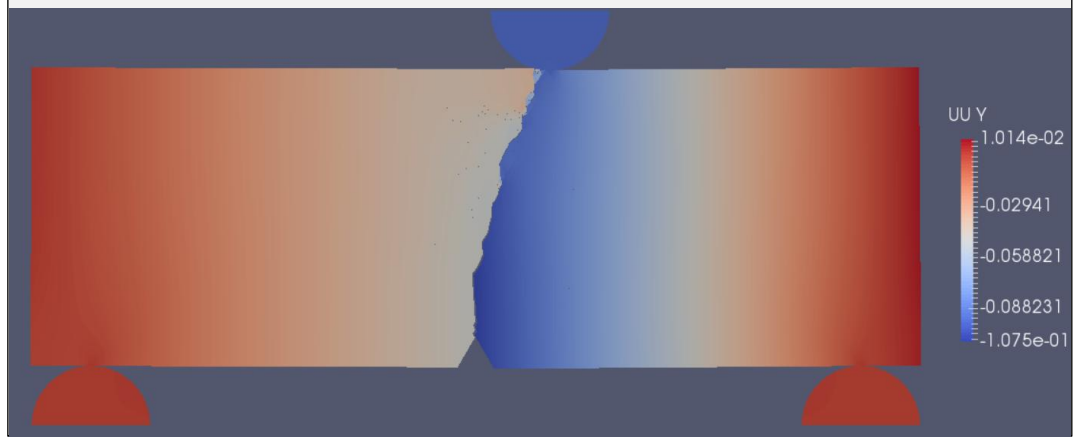
Résultats : Simulations

Champs de déplacement

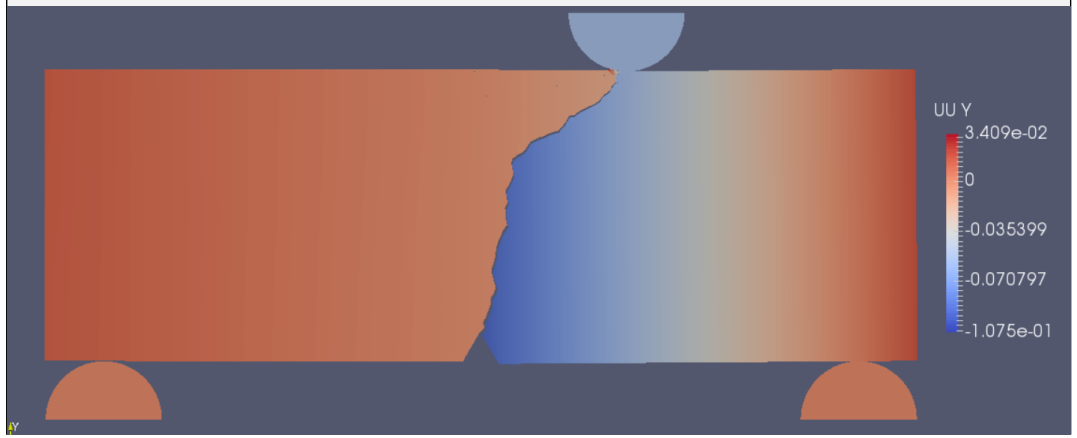
dx = 0 mm



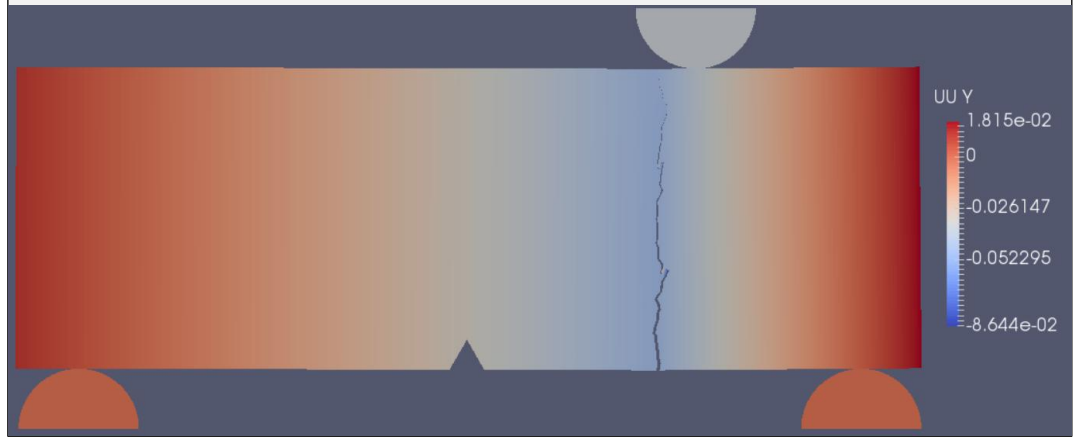
dx = 2,5 mm



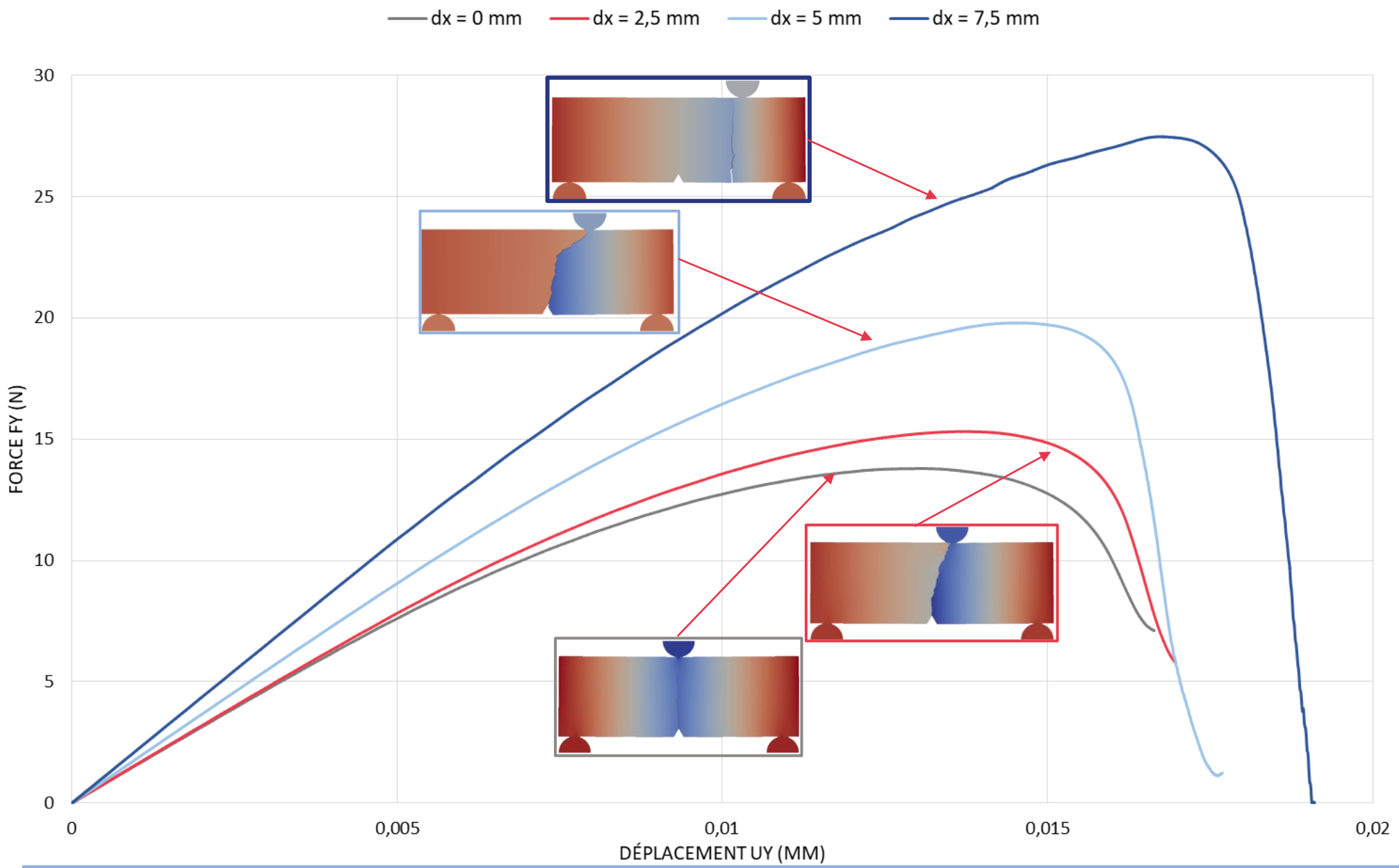
dx = 5 mm



dx = 7,5 mm



FLEXION 3 POINTS EXCENTRÉ : PÂTE DE CIMENT



Simulations : Essais de flexion 3 points – Composite

- Éprouvette : **Composite** (pâte de ciment/granulat) avec **interface** oblique

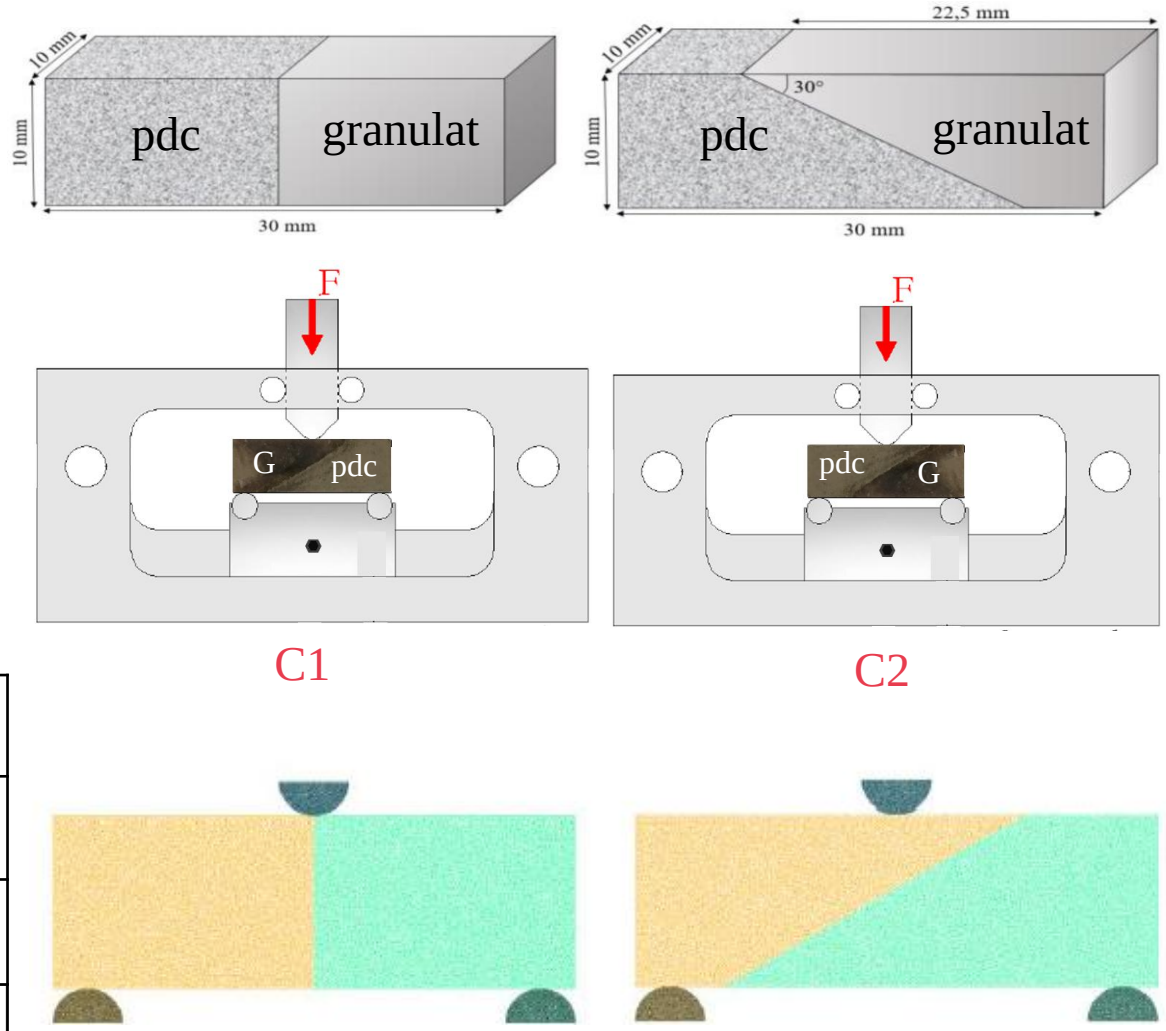
- Inclinaison :
  - 90° (mode normal)
  - 30° et 60° (mode mixte)

- Essais : Flexion 3 points avec chargement **« centré »**

- Configurations :
  - C1 : chargement sur le granulat **silice**
  - C2 : chargement sur la pâte de ciment

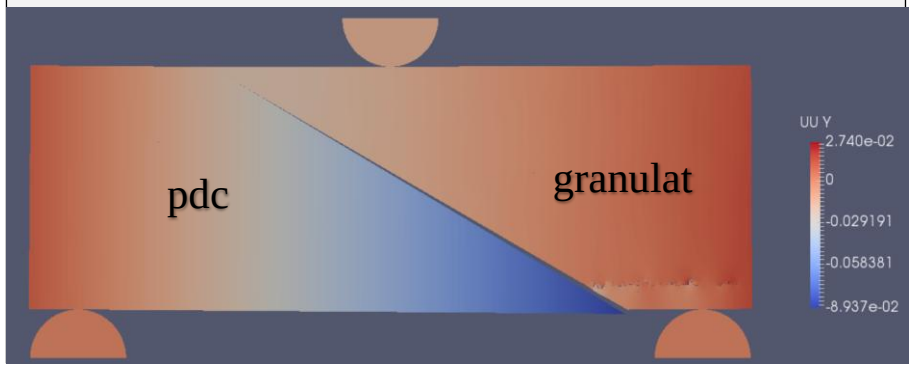
- Paramètres numériques :

Interface	Normal	Tangentiel
σ_i [MPa]	0,4	3,1
W_i [N/m]	2,5	25
C_i [MPa/m]	$6{,}7 \times 10^{11}$	$8{,}8 \times 10^{11}$

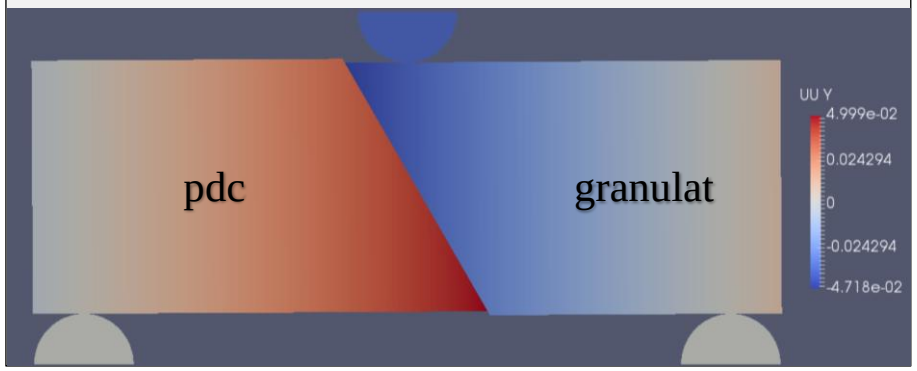


Champs de déplacement

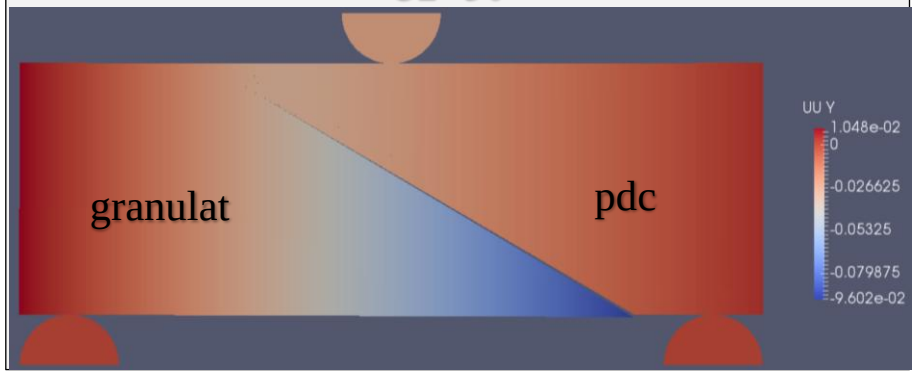
C1- 30°



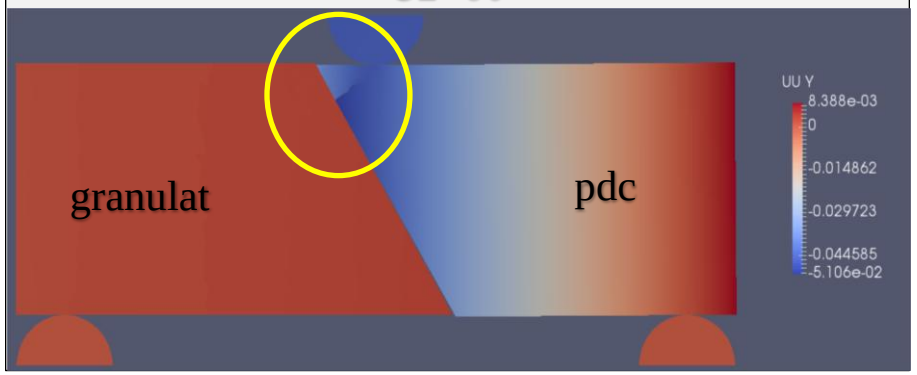
C1 – 60°



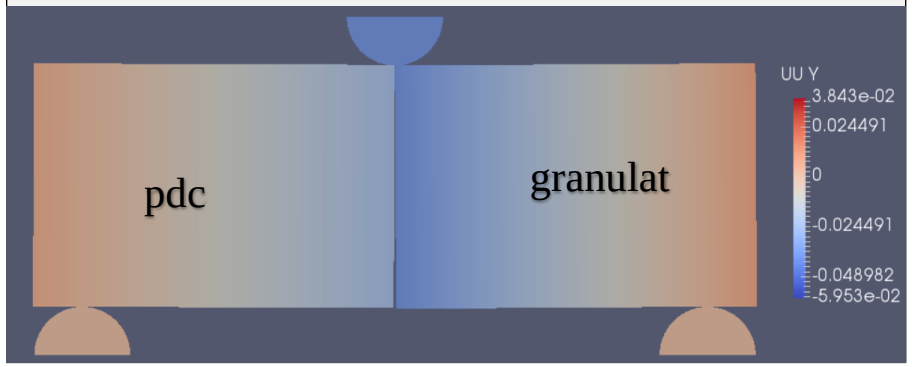
C2- 30°



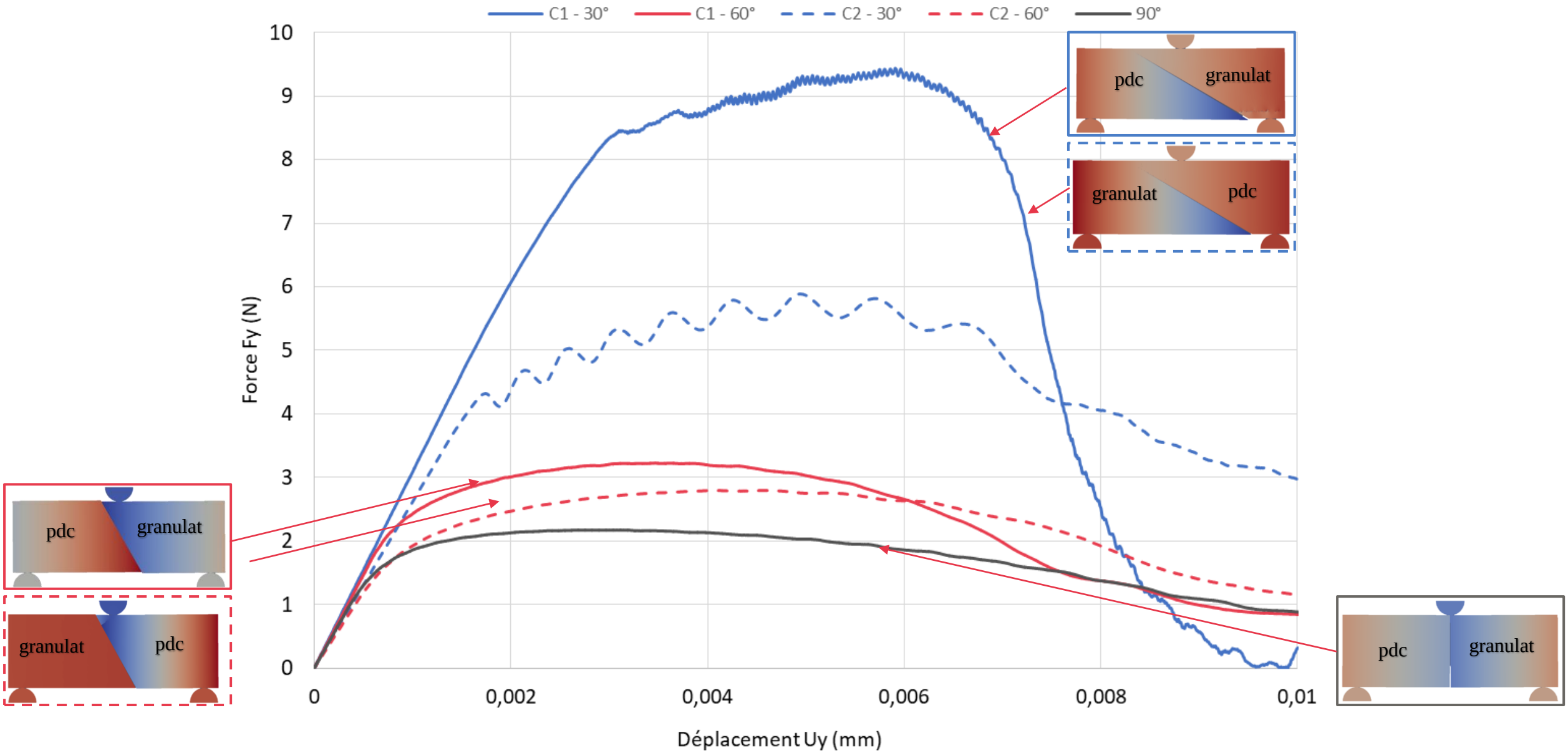
C2- 60°



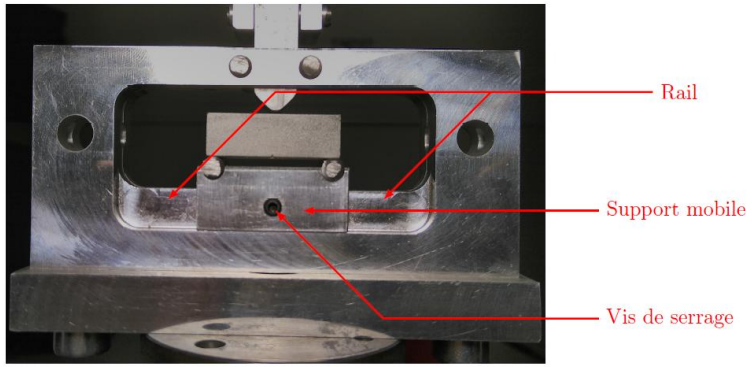
90°



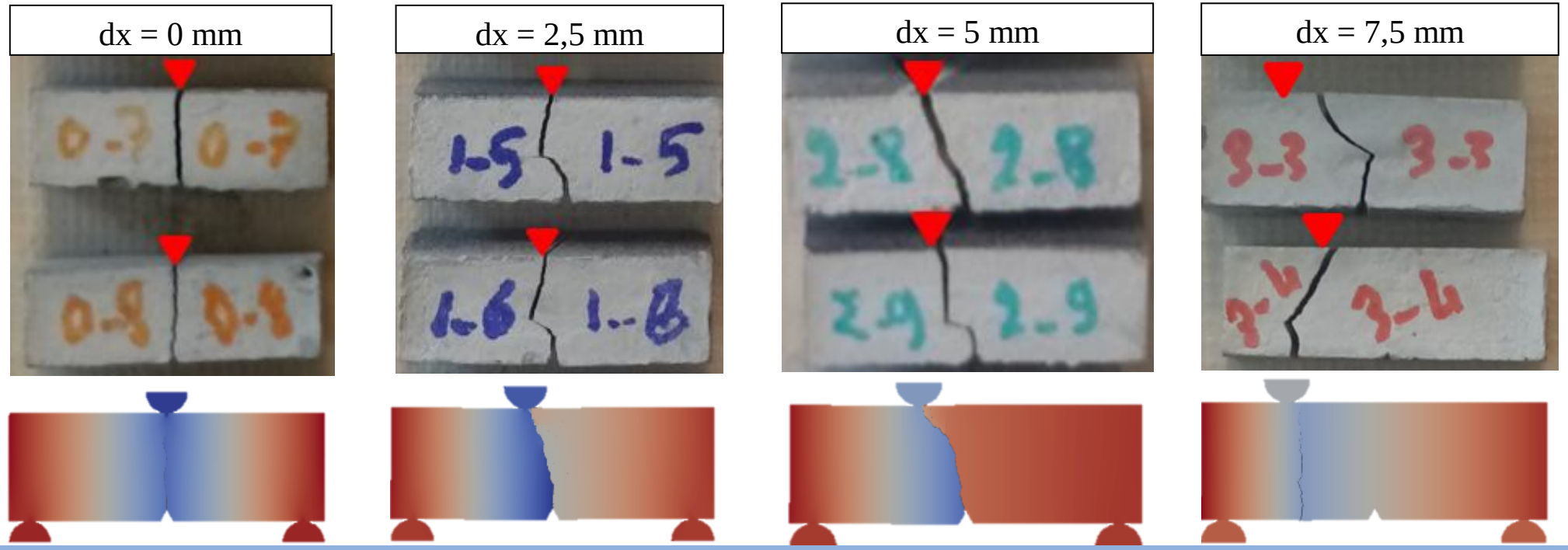
Flexion 3 points :
Composite avec interface oblique



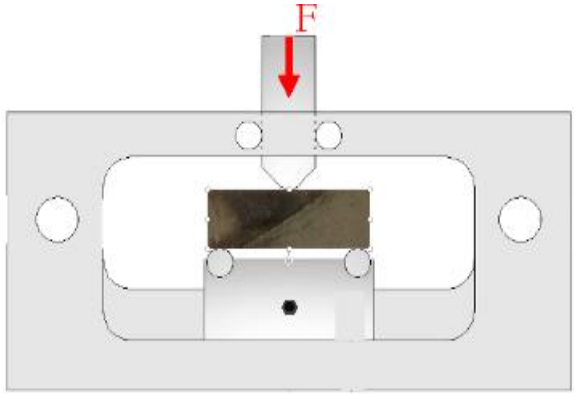
Essais expérimentaux : Flexion 3 points « excentré » / pdc pré-entaillée



- Formulation de pdc :
  - Eau/Ciment = 0,47
  - CEM I 52.5 R CE CP2 NF
- Excentricité : 0 ; 2,5 ; 5 et 7,5 mm
- 10 échantillons par excentricité

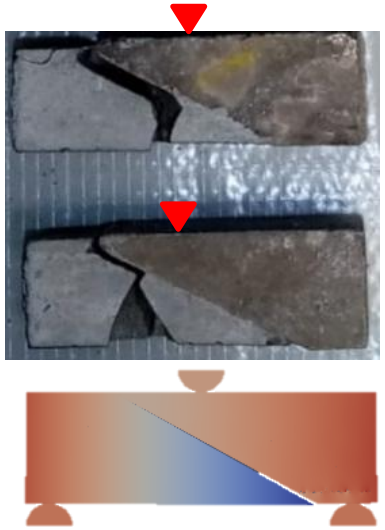


Essais expérimentaux : Flexion 3 points « centré » – composite avec interface oblique

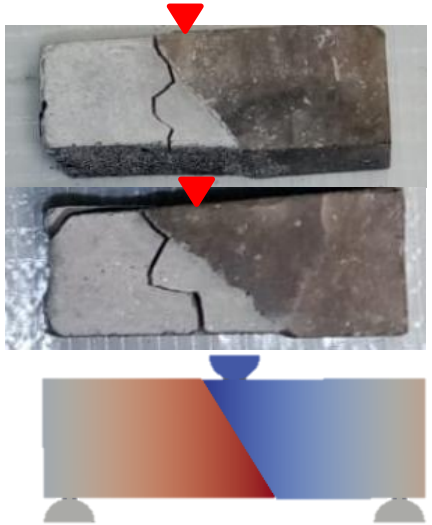


- Formulation éprouvettes :
  - Eau/Ciment = 0,47
  - CEM I 52.5 R CE CP2 NF
  - Granulats Siliceux
- Inclinaison : 30°, 60° et 90°
- 12 échantillons par angle (6 par configuration)

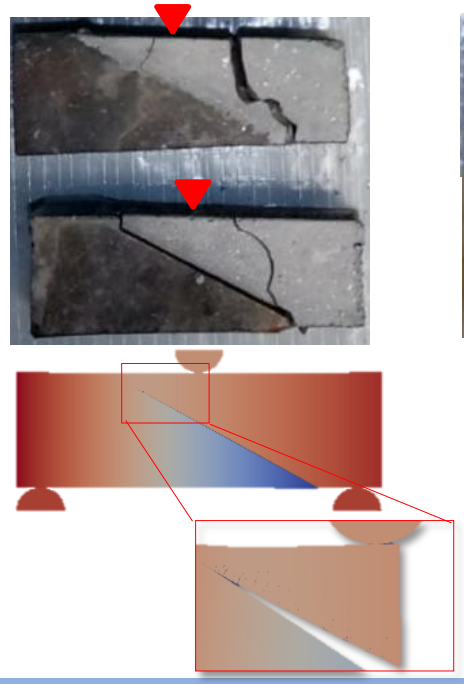
C1 - Composite 30°



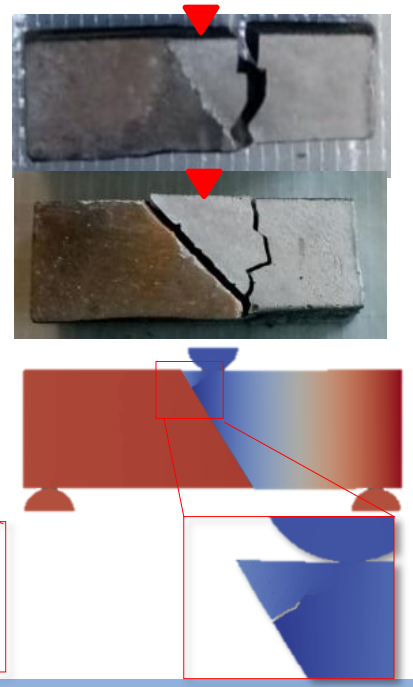
C1 - Composite 60°



C2 - Composite 30°



C2 - Composite 60°



Conclusion

- Le modèle de **zones cohésives** utilisé permet de modéliser **le mécanisme de fissuration** dans les matériaux cimentaires.

- Plus le rapport de mixité est élevé, plus l'énergie de fissuration et la résistance des matériaux sont importantes.

- Dans le cas d'**essais de flexion** 3 points **« excentré »** sur pdc, les **fissures** s'initient de l'entaille (dx=0 ; 2,5 et 5mm) puis se propagent dans la zone cohésive pour rejoindre le point d'application de chargement.

- Dans le cas d'**essais de flexion 3** points **« centré »** sur composite avec interface oblique :
  - Cas C1, les **fissures** s'initient et se propagent au **niveau de l'interface**
  - Cas C2, les **fissures** s'initient au **niveau de l'interface** et se propagent au **niveau de l'interface** pour rejoindre le point d'application de chargement (au niveau de la pdc)

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

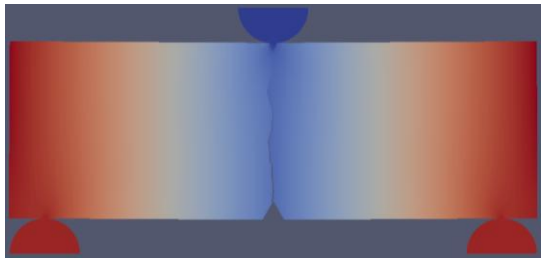
Questions ?

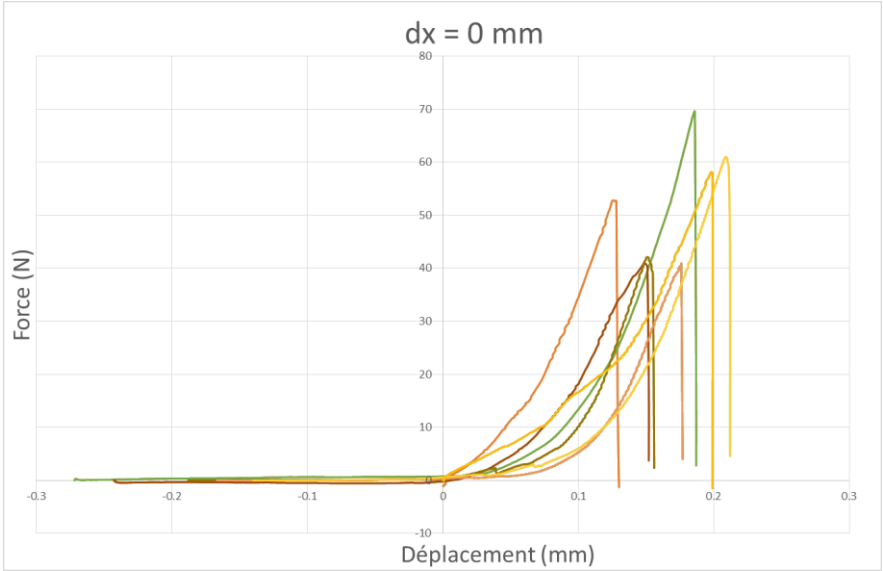
Sirine AL DANDACHLI

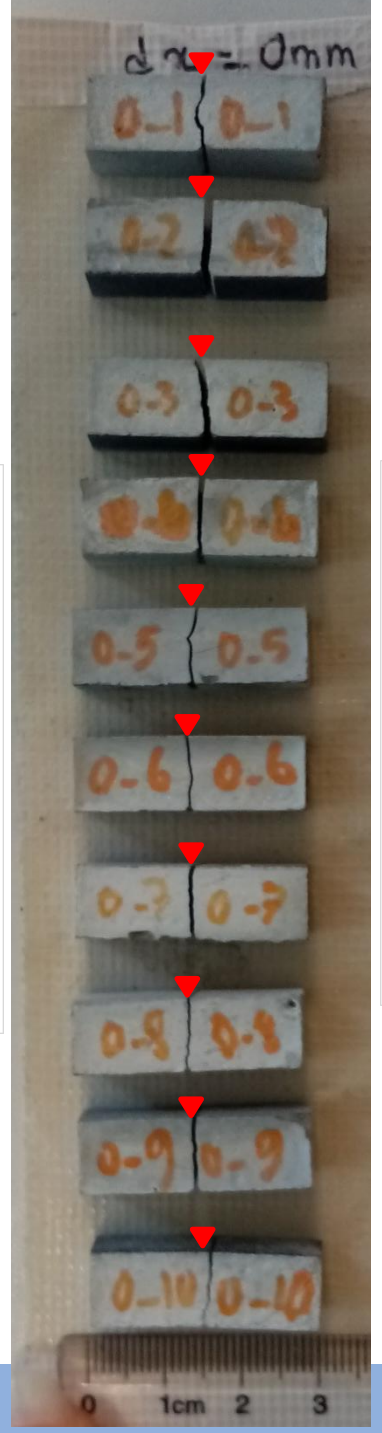
https://www.linkedin.com/in/sirine-al-dandachli-53a851189

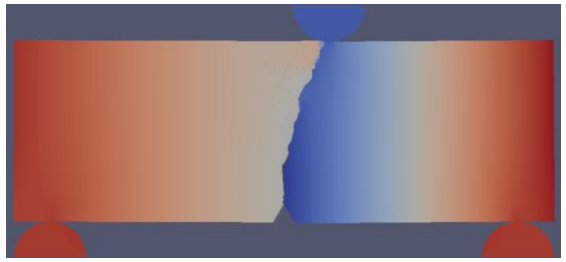
https://www.researchgate.net/profile/Sirine-Al-Dandachli

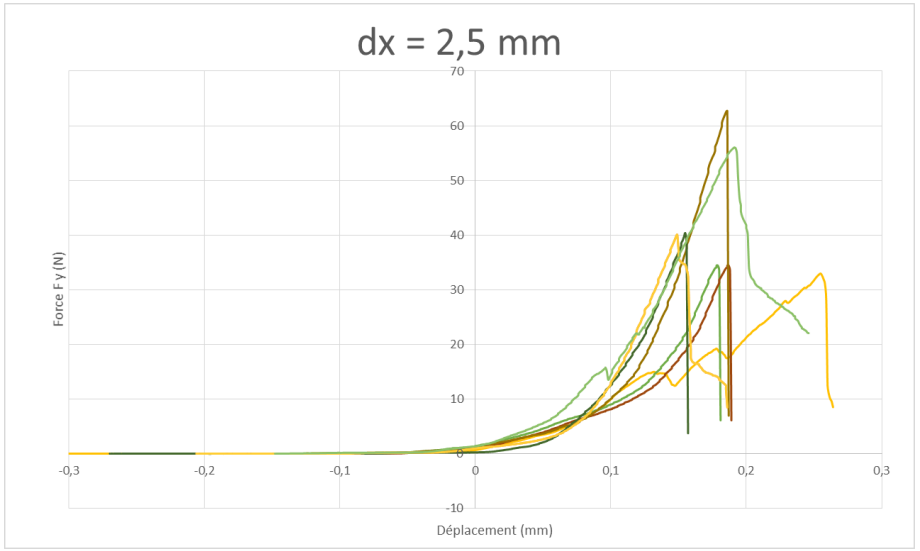
IRSN/FRM-296 ind. 07

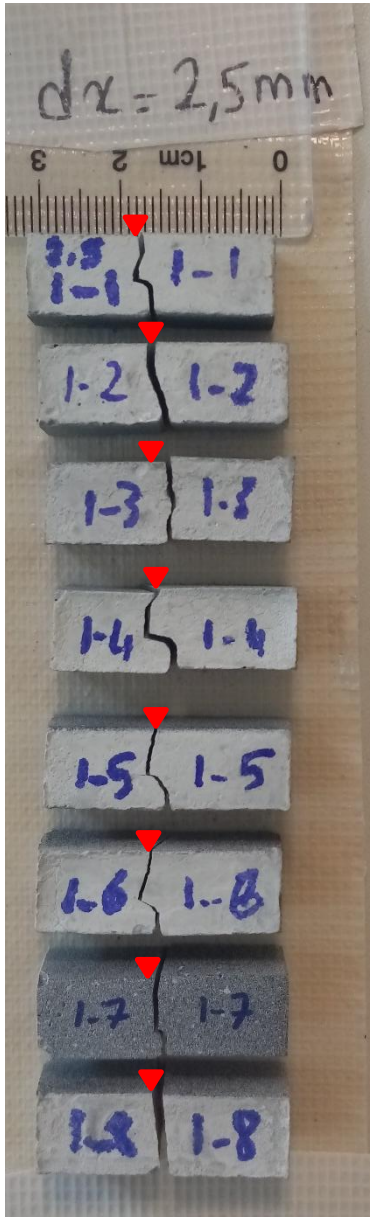


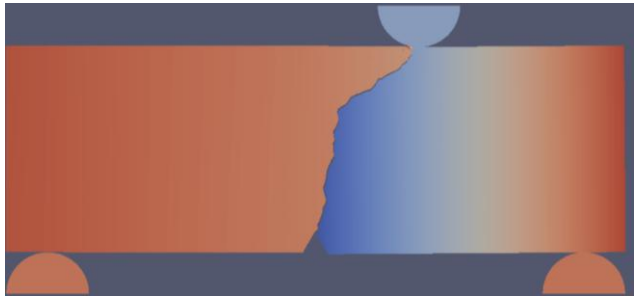

dx = 0 mm
Force (N)
Déplacement (mm)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3

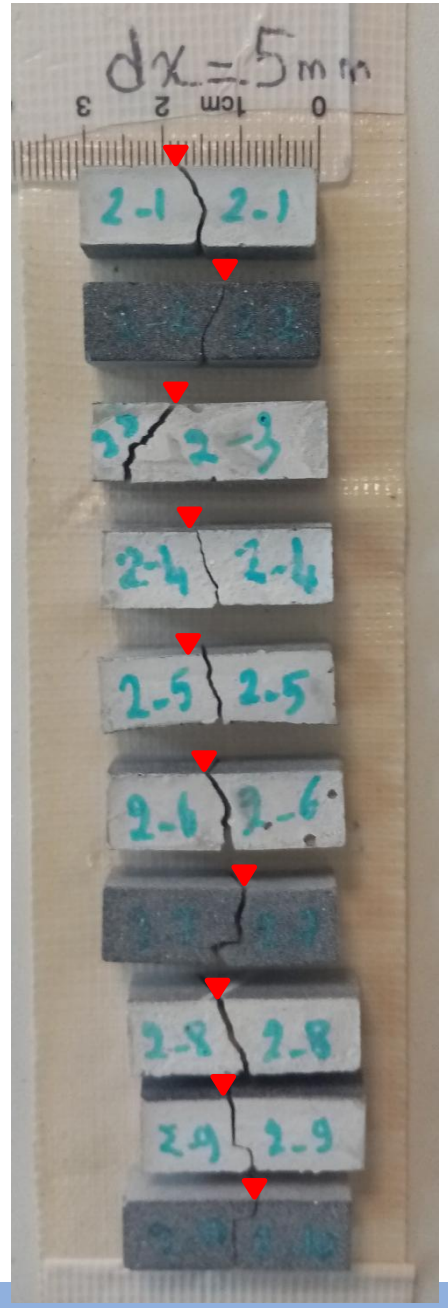

dx = 0mm
0-1
0-1
0-2
0-2
0-3
0-3
0-4
0-4
0-5
0-5
0-6
0-6
0-7
0-7
0-8
0-8
0-9
0-9
0-10
0-10
0
1cm
2
3

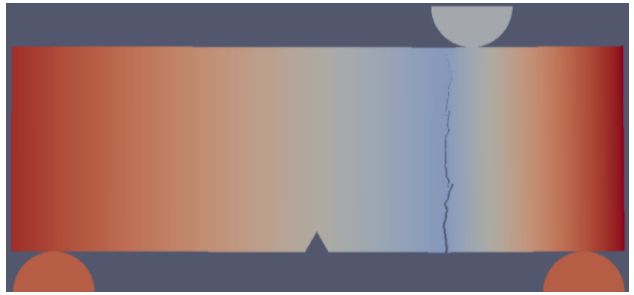


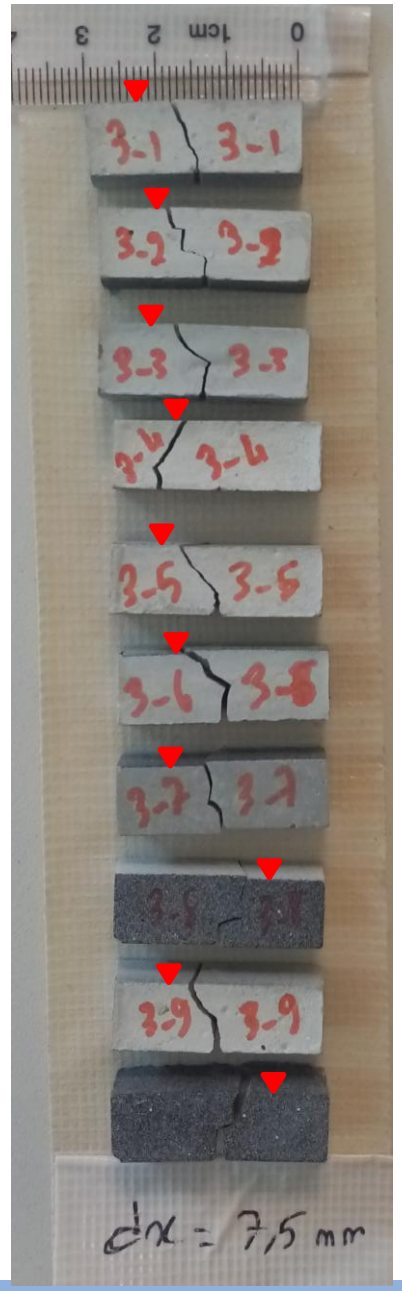

dx = 2,5 mm
Force F y (N)
Déplacement (mm)
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-0,3
-0,2
-0,1
0
0,1
0,2
0,3

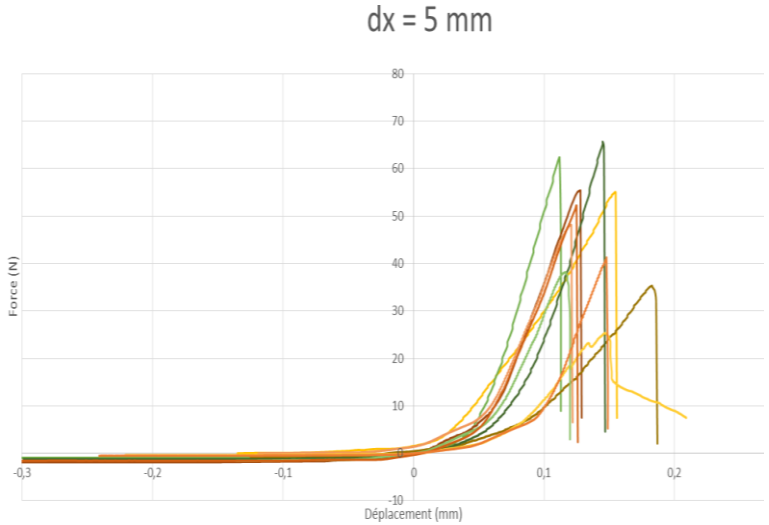

dx = 2,5mm
0
1cm
2
3
1-1
1-1
1-2
1-2
1-3
1-3
1-4
1-4
1-5
1-5
1-6
1-6
1-7
1-7
1-8
1-8

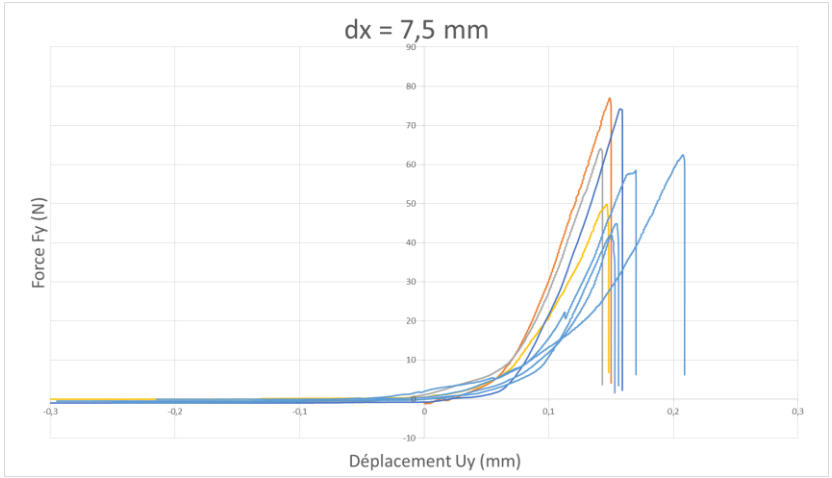



dx = 5 mm
2-1
2-1
2-3
2-3
2-4
2-4
2-5
2-5
2-6
2-6
2-8
2-8
2-9
2-9



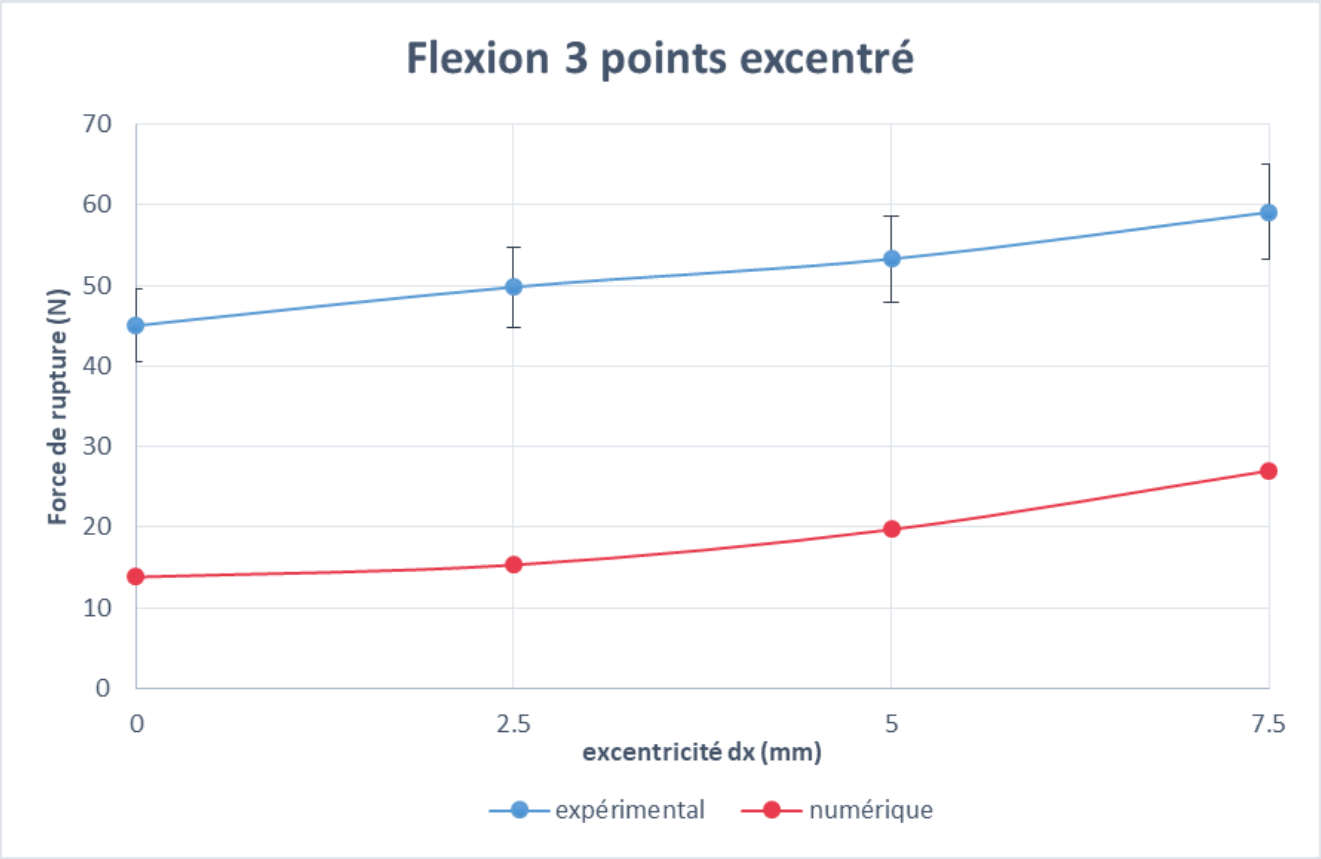

3-1
3-1
3-2
3-2
3-3
3-3
3-4
3-4
3-5
3-5
3-6
3-6
3-7
3-7
3-9
3-9
dx = 7,5 mm


dx = 5 mm
Force (N)
Déplacement (mm)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-0,3
-0,2
-0,1
0
0,1
0,2


dx = 7,5 mm
Force Fy (N)
Déplacement Uy (mm)
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-0,3
-0,2
-0,1
0
0,1
0,2
0,3

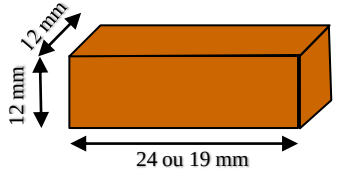
Expérimental vs Numérique

dx (mm)	0	2.5	5	7.5
1	33.0	53.1	58.1	77.0
2	34.4	62.35	62.4	64.0
3	34.4	55.4	52.8	48.8
4	62.7	35.3	69.6	74.2
5	40.3	65.7	41.0	44.9
6	40.1	48.2	52.0	64.30
7	56.0	53.0	42.1	58.4
8	59.3	25.4	40.9	62.4
9	0	38.2	61.0	42.0
10	0	41.3	0	54.9
moyen (N)	45.0	49.8	53.3	59.1
écart type (N)	10.74	10.20	8.4	9.30
Numérique	13.8	15.3	19.7	27



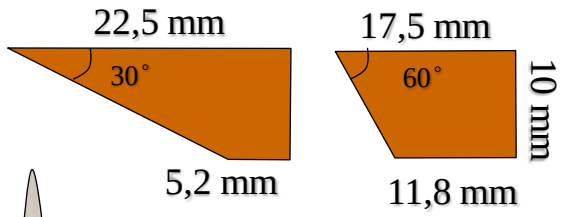
Essais de flexion 3 points composite : Granulat oblique

Découpe grossière des granulats en parallélépipède : 2 dimensions

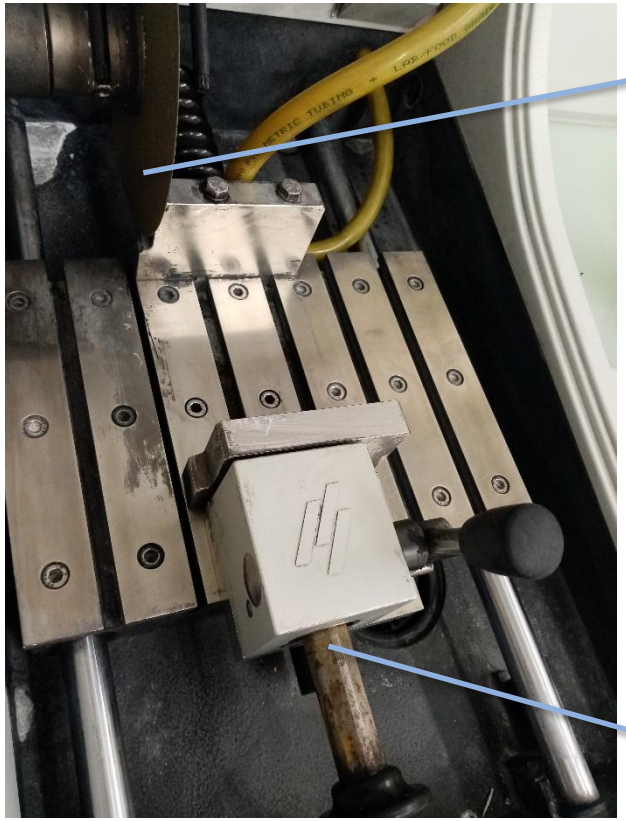


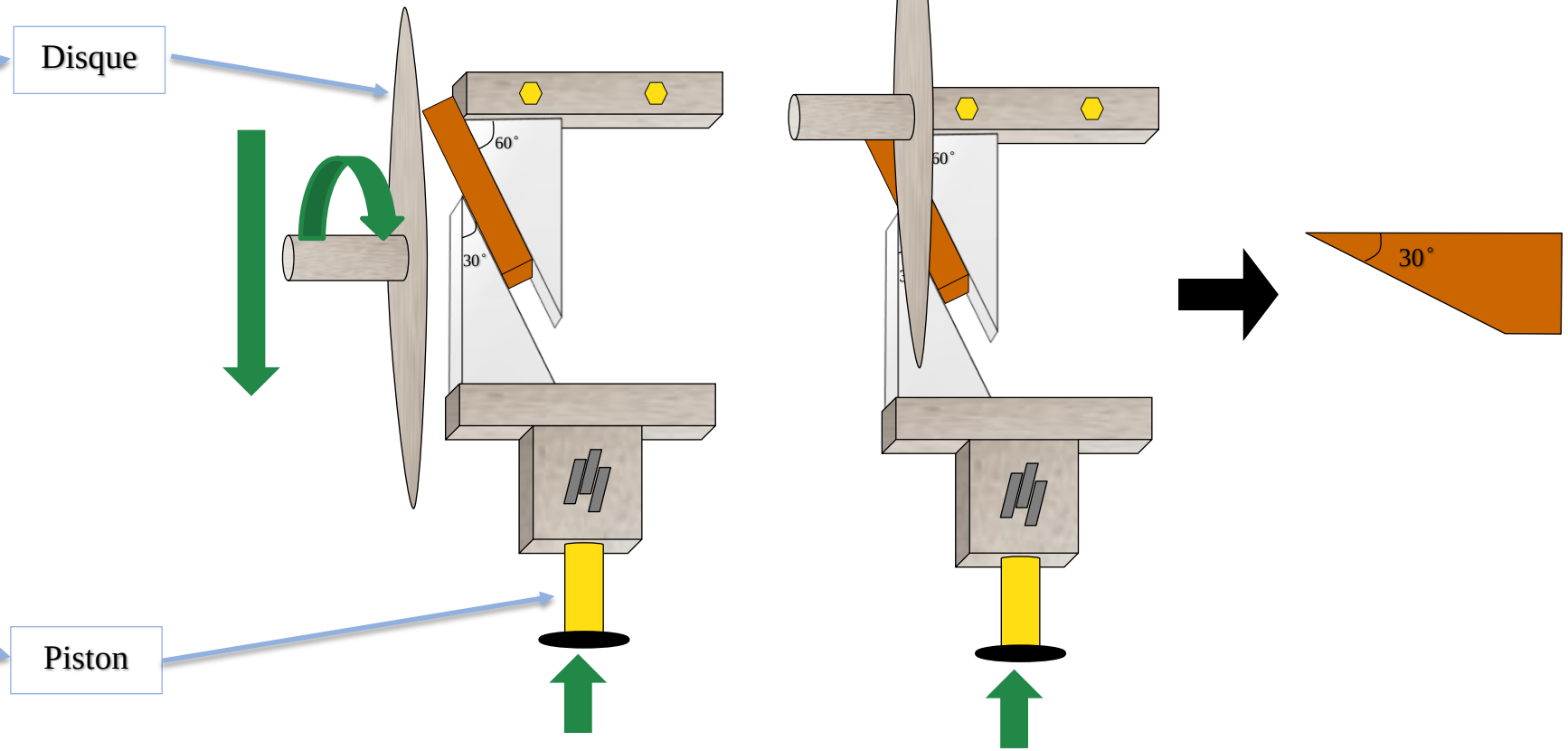
» 24 x 12 x 12 mm → granulat incliné 30 degré (15 granulats)

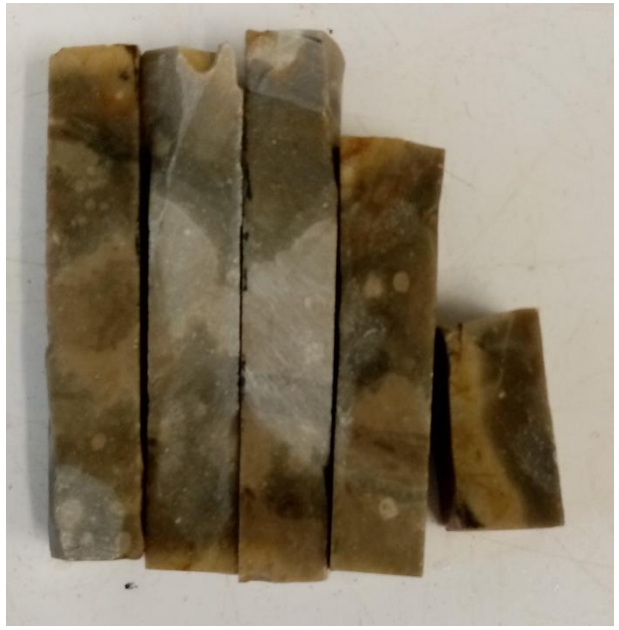
» 19 x 12 x 12 mm → granulat incliné 60 degré (15 granulats)

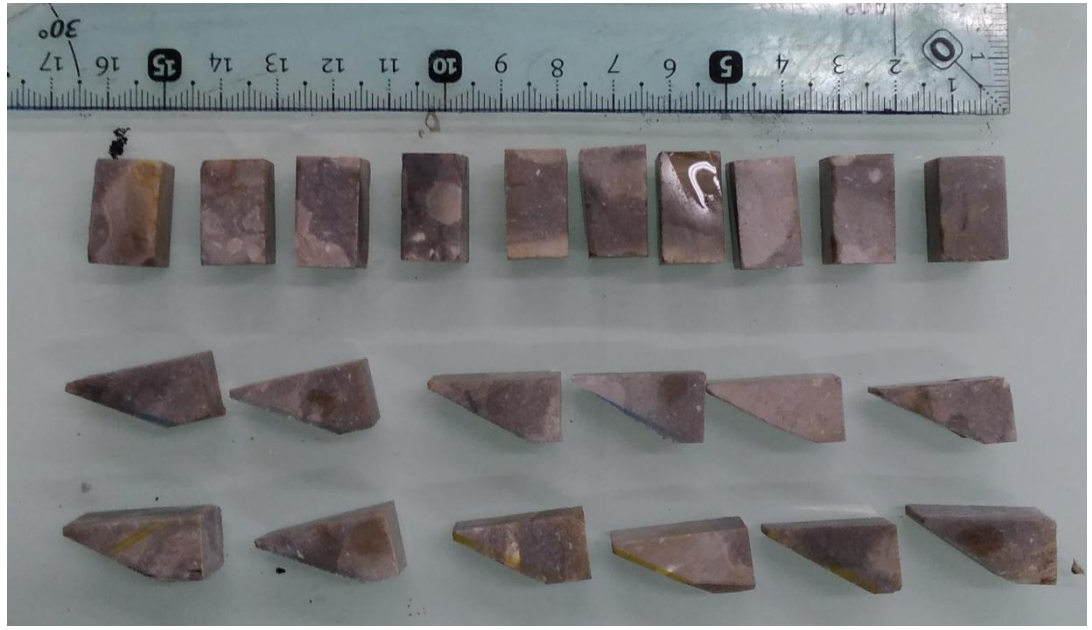


Dispositif de découpe précis des granulats inclinés



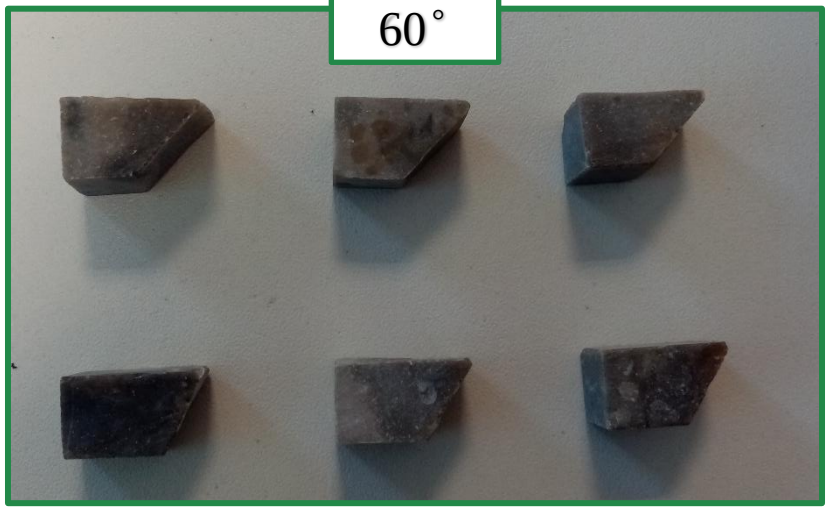




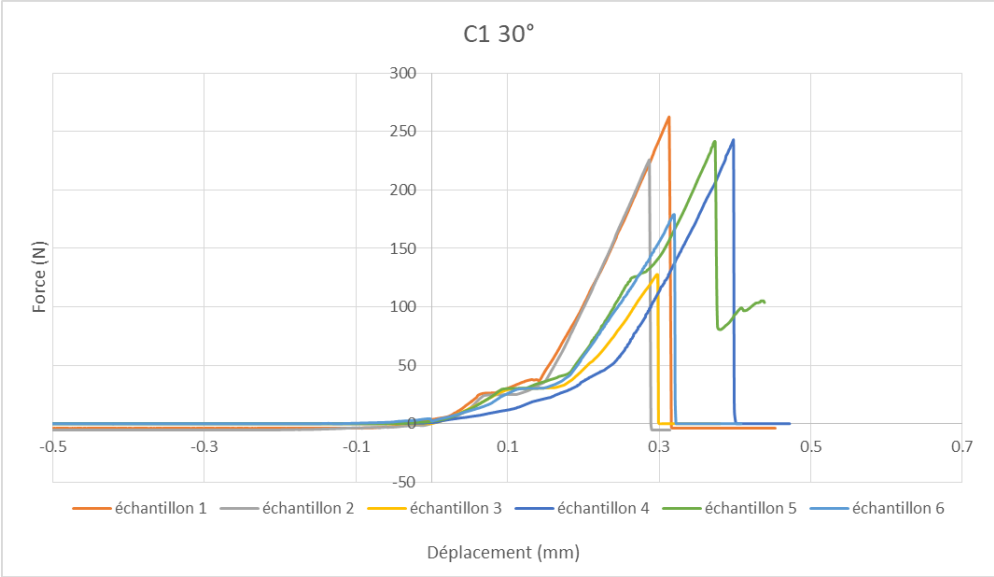


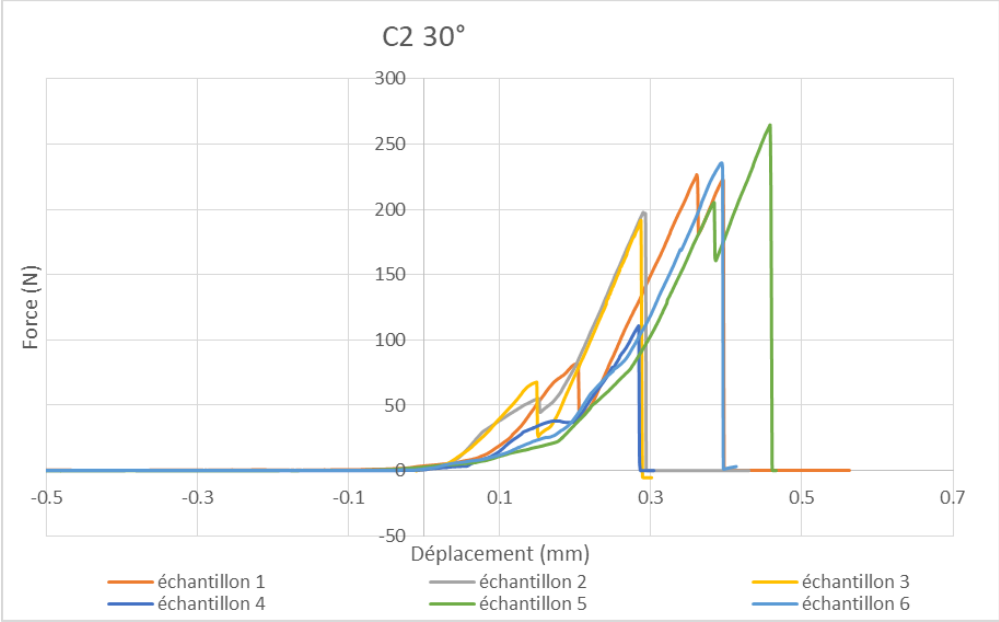
30°

60°



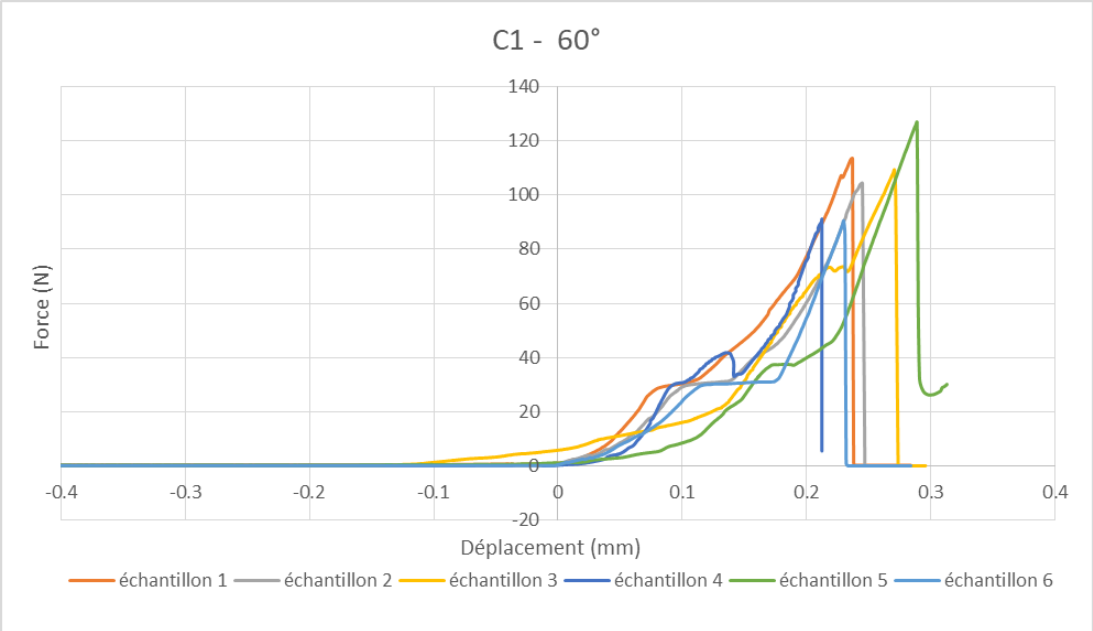
30° - C1

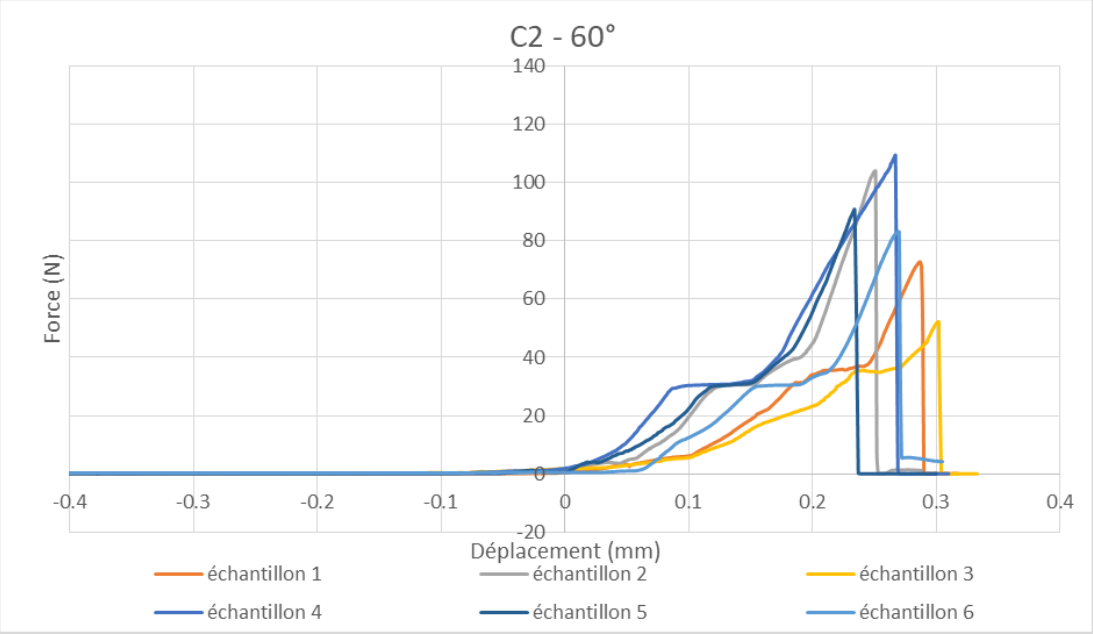

C1 30°
Force (N)
300
250
200
150
100
50
0
-50
-0.5
-0.3
-0.1
0.1
0.3
0.5
0.7
échantillon 1
échantillon 2
échantillon 3
échantillon 4
échantillon 5
échantillon 6
Déplacement (mm)


C2 30°
Force (N)
300
250
200
150
100
50
0
-50
-0.5
-0.3
-0.1
0.1
0.3
0.5
0.7
Déplacement (mm)
échantillon 1
échantillon 2
échantillon 3
échantillon 4
échantillon 5
échantillon 6

30° - C2

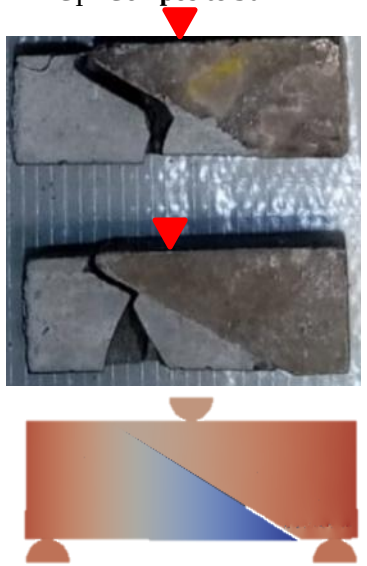
C1 – 60°


C1 - 60°
Force (N)
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
Déplacement (mm)
échantillon 1
échantillon 2
échantillon 3
échantillon 4
échantillon 5
échantillon 6

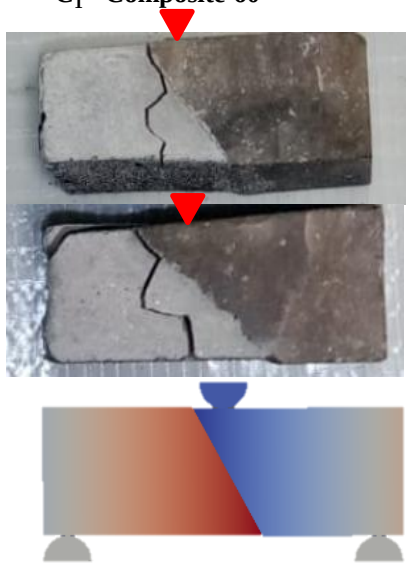

C2 - 60°
Force (N)
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
Déplacement (mm)
échantillon 1
échantillon 2
échantillon 3
échantillon 4
échantillon 5
échantillon 6

C2 – 60°

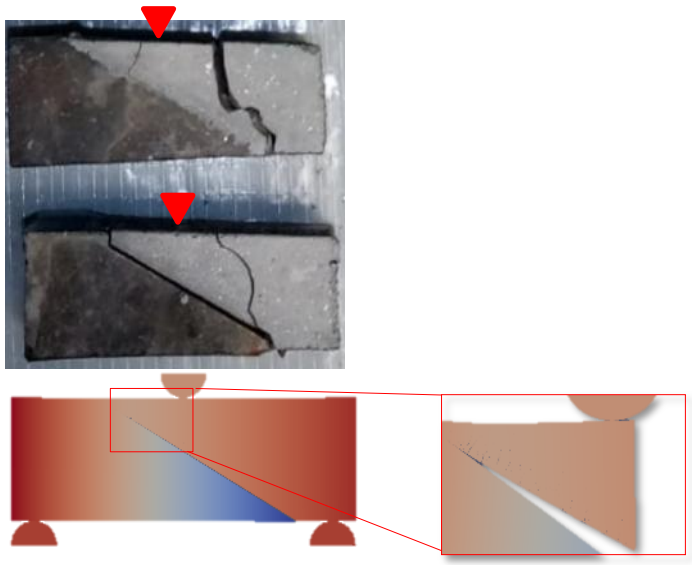
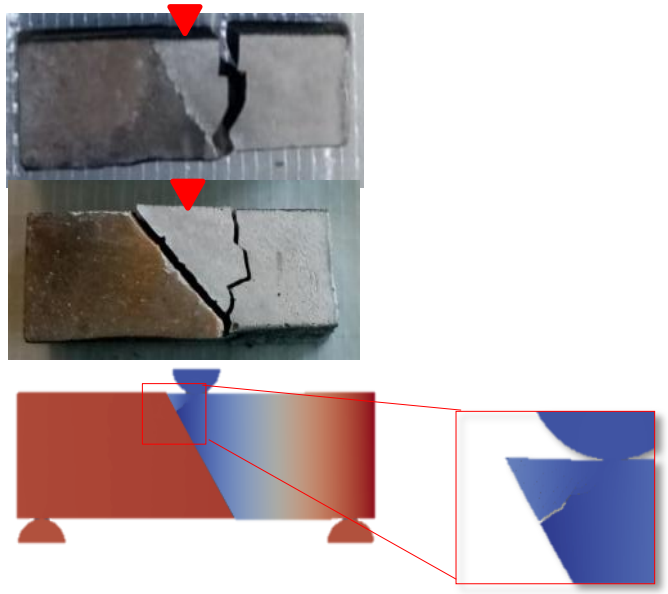
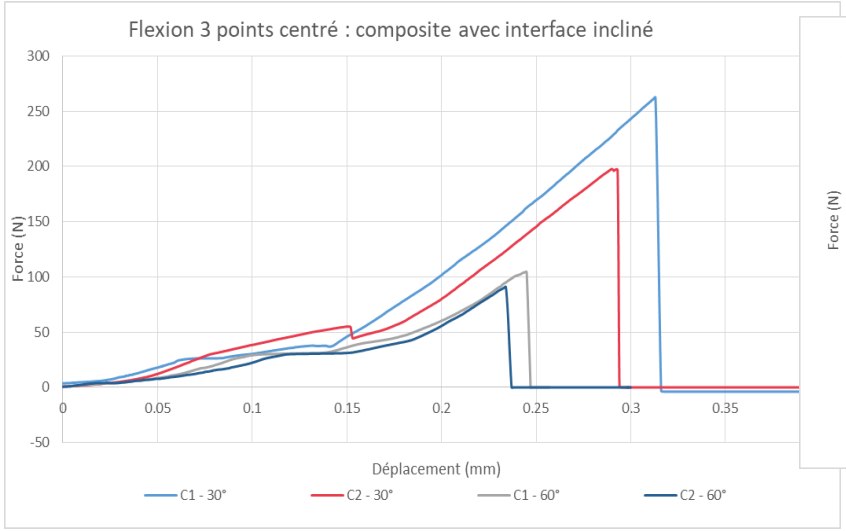
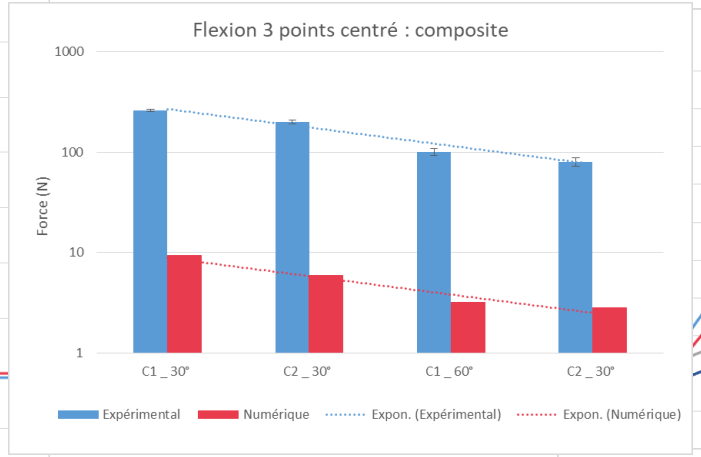
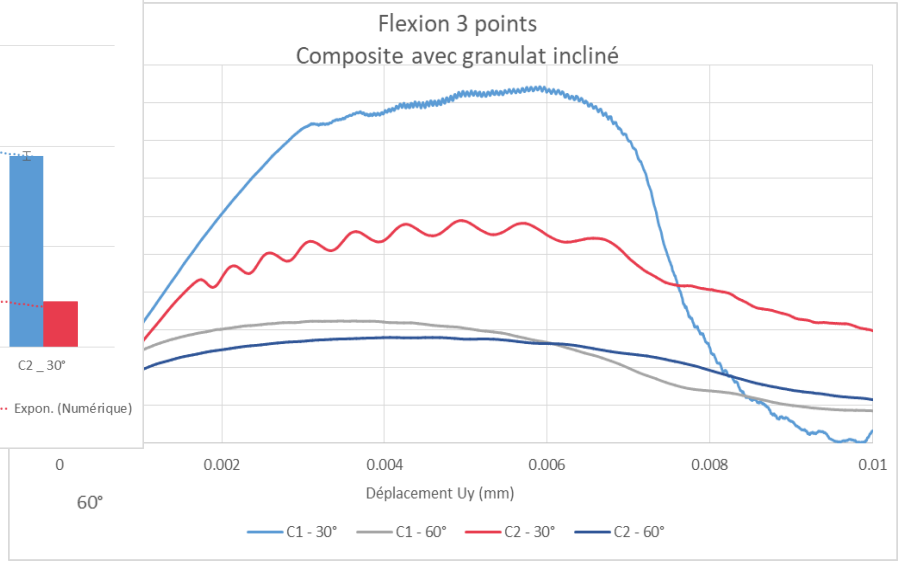
C_1 - Composite 30°



C_1 - Composite 60°



C_2 - Composite 30°



C_2 - Composite 60°