



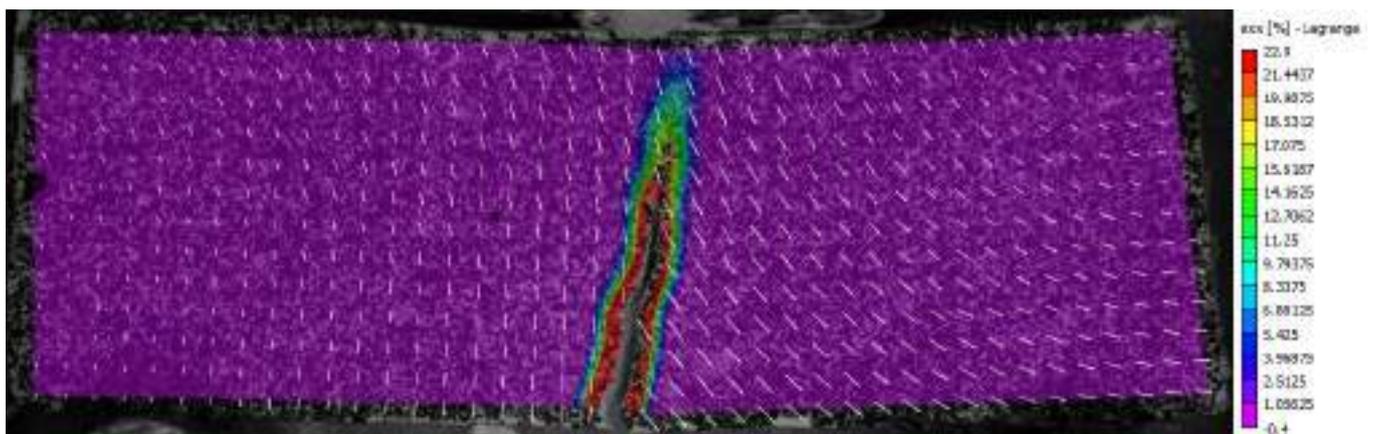
UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE

UFR MATHÉMATIQUES INFORMATIQUE  
MÉCANIQUE ET AUTOMATIQUE



*Parcours Comportement Mécanique des Géomatériaux et des Structures  
(CMGS)*

## **Etude expérimentale du comportement à la flexion d'une argile sous différentes succions - Analyse par traitement d'images numériques**



Réalisé par :

**Sajid Kamil ZEMAM**

*Encadrants de stage :*

*Mahdia Hattab  
Lamine Ighil Ameur*

**Juillet 2016**

## Sommaire

Résumé .....	5
Abstract .....	5
Introduction.....	6
Chapitre 1. Étude bibliographique.....	7
1.1. Définition de la fissuration .....	7
1.2. Fissuration dans les argiles.....	7
1.3. Relation entre les fissures et les mécanismes locales.....	8
1.4. Corrélation d'images numériques .....	8
1.5. Mise au point et ajustage de la corrélation.....	9
Chapitre 2. Propriétés du Kaolin.....	10
2.1. Détermination des limites d'Atterberg .....	10
2.1.4. Limite de liquidité.....	11
2.1.5 Limite de plasticité .....	14
2.1.5. Indice de plasticité.....	16
2.2. Densité des grains solide.....	17
2.3. Analyse sedimentometrique.....	19
2.4. La composition chimique.....	23
Chapitre 3. Étude expérimentale à la flexion d'une argile sous différentes succions.....	24
3.1. Objectif .....	24
3.2. Principe et réflexion .....	24
3.3. Préparation de la boue.....	25
3.4. Consolidation.....	26
3.5. Préparation des éprouvettes.....	27
3.5. Les résultats.....	28

Chapitre 4. Analyse de l'hétérogénéité du matériau en fonction du chemin hydrique (dessiccation libre).....	43
4.1. Objectif .....	43
4.2. Etude des déformations volumiques globales.....	43
4.2.1. Préparation des échantillons et réalisation des essais de dessiccation.....	43
4.2.2. Résultats .....	45
4.3. Les déformations volumiques et la succion ( locale ) .....	52
4.3.1 Théorie et les calculs .....	52
4.3.2. Résultats .....	53
4.3.2.1.Les déformations volumiques locales .....	53
4.3.2.2.Les déformations verticales locales.....	55
4.3.2.3.La succion locale .....	59
4.3.2.4.Les déformations de retrait locale .....	61
4.4. Analyse des fissures.....	62
Conclusion générale.....	64
REFERENCES .....	65

## Remerciements

Je tiens remercier tout d'abord à ma tutrice de stage Professeure **Mahdia Hattab**, pour son encadrement et son égard pendant le stage. Elle m'a parfaitement accueilli et trouvé le temps pour me recevoir et répondre à mes questions. Elle m'a beaucoup aidé à mener à bien ma mission et m'a suivi tout au long de ce stage.

Je tiens également à remercier Doctorant **Lamine Ighil Aneur** pour ses aides et conseils techniques et son accompagnement tout au long de ce stage.

Enfin, je remercie aussi tout l'équipe du laboratoire LEM3 pour cette chaleureuse ambiance et un environnement de travail très positif et dynamique.

## Résumé

Cette étude, est basé sur une partie expérimentale pour le suivi de l'évolution des efforts et des déplacements sur des éprouvettes d'argile de synthèse « Kaolin K13 » consolidés à 120 kPa et soumises à une flexion par instrument de flexion équipée d'une caméra et corrélation d'image avec le logiciel (**VIC 2D**).

D'autre part, étudier expérimentalement les déformations volumique et la succion (globale et locale) en argiles de synthèse (Kaolin K13) initialement saturé, par la dessiccation libre par la méthode de la corrélation d'image avec le logiciel (( VIC 2D )).

## Abstract

This study is depends on an experimental part to monitor the evolution of efforts and displacement on clay synthesis " Kaolin K13" consolidated to 120 KPa and subjected to bending by bending instrument equipped with a camera and image correlation software (VIC 2D).

Moreover, experimentally study the Volumetric deformations and suction (global and local) in synthetic clay (Kaolin K13) initially saturated, by free desiccation, by the method of the correlation image with the software ((VIC 2D)).

## Introduction

Dans le cadre de ma formation en master recherche Comportement Mécanique des Géomatériaux et Structures (CMGS), j'ai effectué un stage de 8 mois au sein de l'équipe de recherche sur les argiles et argile de synthèse du laboratoire d'étude des microstructures et mécanique des matériaux de Metz (LEM3). Ce stage est axé sur l'approche expérimental pour l'étude des matériaux argiles et argileux, afin de pourvoir, décrire son comportement et ces caractéristiques lors d'une déshydratation dans des conditions de sollicitations physiques, chimiques et mécaniques diverses. L'argile a l'état naturelle est de forme rocheuse extraite dans des carrières souterraines, ces propriétés hydriques, entre autre sa perte ou gain d'humidité cause des fissures irréversibles en surface des carottes extraites sous terre, le même souci a été observé sur une argilite de synthèse le Kaolin K13.

Le travail réalisé au laboratoire consiste à faire une approche expérimental par essai de flexion par instrument de flexion équipée d'une caméra pour ensuite réalisé des essais de corrélation d'images pour nous permettre de confronter une approche expérimentale à cette approche basé sur des calculs mathématiques. Ces essais sont réalisé pour un échantillon d'une argilite de synthèse le Kaolin K13. Les éprouvettes d'argilite de synthèse sont découpé aux poutrelles soumises par la suite à un essai de succion à trois solutions de contrainte de succion différente (KOH, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et NaCl). Après préparation des éprouvettes, la description des phases de réalisation d'une essai de flexion pour des éprouvettes sous une caméra va nous permettre une visualisation des différentes phases d'apparition de déplacement et en plus de microfissure en surface de l'argilite de synthèse. Ces visualisations sont bien suivies de capture d'images pour les besoins de la corrélation avec les logiciel Vic 2D.

Le comportement dessicative en perte ou gains d'humidité n'est pas bien défini par les recherches en cours, c'est pour cela que la plupart des chercheurs tentent de comprendre ce phénomène. c'est la raison pour laquelle nous avons étudié expérimentalement les déformations (Horizontales, verticales, volumiques et déformation de la retraits) et la succion (globale et locale) et la distribution de succion locale en argiles de synthèse (Kaolin K13) par réaliser des essai des dessiccation

## Chapitre 1. Étude bibliographique

### 1.1. Définition de la fissuration

Il est de la nature de nombreux matériaux de construction à se fissurer à mesure qu'ils vieillissent et tels qu'ils dilatent et se diminuent, En particulier à une exposition à l'humidité comme ils sont mouillés et se dessèchent. Le plus commun d'entre eux comprennent le béton, l'asphalte, le stuc, la pierre, la brique, le bloc, et le plâtre ... ECT. La continuation des fissures pourrait entraîner une défaillance dans les matériaux de construction et par la suite les structures et, en fonction de son emplacement de la construction.

On désigne par fissure un défaut ou une anomalie qui apparaît sur le matériau, causé par une contrainte interne de cohésion entre les différents éléments le constituant, ou bien une contrainte liée à l'environnement immédiat. Elle se propage par le fait que cette contrainte se concentre sur la zone de rupture initiale si cette dernière ne se dissipe pas. (PROUDHON, 2005)

### 1.2. Fissuration dans les argiles

D'après Kodikara et al. 2000, a constaté que l'argile dessiccative est fissurée quand elle est soumise à une contrainte interne ou externe. La contrainte se développe lors de la rétraction des sols en perte d'humidité généralement. Selon cette même étude, il décrit les surfaces fissurées en deux zones :

- i. Une partie orthogonale.
- ii. Une partie non orthogonale.

Dans la première partie, les fissures se produisent successivement, en divisant la surface argileuse en blocs, et elles ont la tendance à les subdiviser. Dans la deuxième partie non orthogonale, les fissures ne se rencontrent pas à un angle droit. Dans la partie hexagonale (les fissures se rencontrent à un angle de  $120^\circ$ ) et ses diversions tombent dans cette catégorie. Les fissures non orthogonales proviennent simultanément et se connectent pour former un motif de blocs. La fissuration et l'ouverture des fissures peuvent se produire de gros blocs. En théorie, les fissures secondaires et tertiaires sont acceptées dans la théorie de bifurcation des premières fissures (Banzant et Cedolin, 1991 ; Kodikara et al. 1999).

### **1.3. Relation entre les fissures et les mécanismes locaux**

(Laloui et al. 2009) présentent l'ensemble des mécanismes de la dessiccation des sols, comprenant le retrait due au séchage et la fissuration. La nature de ces derniers processus dans des sols est tout d'abord définie. Se basant sur des résultats d'une étude expérimentale de la dessiccation (qui consiste en une investigation de l'évolution des déformations, de la succion, de la teneur en eau, du degré de saturation et de la géométrie des fissures). Ces derniers montrent que la fissuration commence à un moment proche du début de la désaturation et de la valeur d'entrée d'air. Cette observation est interprétée à l'échelle microscopique.

Le séchage est le résultat de la thermodynamique déséquilibrée entre le sol avec une certaine humidité relative et son environnement, dont l'évaporation et le transfert du flux dans le sol. Ce mouvement se réalise en deux phases : liquide et gazeuse. Avec l'équilibre thermodynamique, les choses changent entre liquide et vapeur, ceci cause l'apparition sur l'interface entre les phases de fissure. Le potentiel de liquide et de vapeur maintient l'équilibre, mais détériore la pression liquide (la succion diminue) dans la zone correspondante à la loi de Kelvin, et pendant ce temps, il existe le gradient de succion dans le corps. Le mouvement liquide est dû aux différences spatiales du début jusqu'au moment où il apparaît des fissures. La pression extérieure, la température élevée, la déformation de rétraction sont responsables dans l'augmentation de la pression du flux et de ses mouvements de substance.

### **1.4. Corrélation d'images numériques**

La mesure des champs basée sur la corrélation d'images numériques est une technique de mesure optique, sans capteurs de déplacements, ni jauges de contact. Elle consiste à comparer les images acquises à l'état de référence de préférence non déformé, et celles acquises à différentes étapes de déformation au cours d'une sollicitation. On suit l'évolution spatiale d'un ensemble de points repérés sur l'image de référence, ce qui permet de mesurer le champ de déplacement, puis à déterminer le champ de déformation associé. À chaque point de repère  $i$  est associé un domaine de corrélation, D'après déformation on identifie les domaines les plus semblables, homologues à ceux de l'image de référence, en minimisant une fonction de corrélation  $C$  (de valeur nulle pour la similitude parfaite). Ça s'exprime par:

$$C(\phi_o) = \frac{\sum_{i \in D} (f(X_i) - f_D) \cdot (g(x_i) - g_D)}{\sqrt{\sum_{i \in D} (f(X_i) - f_D)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i \in D} (g(x_i) - g_D)^2}}$$

Où  $X_i$  et  $x_i$  sont respectivement les coordonnées (en pixels) des points homologues dans l'image de référence et dans l'image déformée et qui sont associés par une transformation mécanique  $\phi$ , inconnue, dont  $\phi_o$  est une approximation qui minimise  $C$ ,  $f(X)$  et  $g(x)$  sont les niveaux de gris respectifs du point  $i$  de l'image de référence et de l'image déformée, associée par la transformation  $\phi_o$ ,  $f_D$  et  $g_D$  sont respectivement les moyennes de niveaux de gris sur le domaine  $D$  et sur son domaine homologue transformé par  $\phi_o$ . La transformation est supposée être une translation couplée à une rotation et une déformation homogène, dont on considère le gradient égal au gradient macroscopique. La minimisation de  $C$  et une optimisation par interpolation bilinéaire des niveaux de gris sur chaque domaine de l'image déformée sont réalisés grâce au logiciel VIC 2D, et permettent de déterminer les déplacements à une fraction de pixel près. Les coordonnées des centres des domaines homologues déterminent le champ de déplacement qui est utilisé pour calculer le champ de déformation. Celui-ci est obtenu en tout point de la grille, par la moyenne des gradients de transformation affectant un domaine délimité par les points voisins, obtenue par intégration sur le contour d'un domaine considéré. Cette technique ne permet la détermination du champ de déformation que dans le plan d'observation. La composante hors plan peut toutefois être évaluée en supposant une déformation axisymétrique et une déformation constante dans cette troisième direction. Le champ de déformation est alors représenté sous forme d'une carte de déformation qui est superposée à la microstructure. En chaque point de la grille de calcul, la composante de déformation étudiée est symbolisée par une croix dont la couleur est fonction de sa valeur au voisinage du point. (KATTI 2012)

### **1.5. Mise au point et ajustage de la corrélation**

Pour obtenir une corrélation d'image avec des résultats très satisfaisant, on a recours à une série d'essai de validations.

- Validation de la luminosité et agrandissement.
- Validation du mouchetis (observation optique lumière blanche (fond blanc + taches noires ou l'inverse)).
- Respecter les consignes de corrélation d'images.

## Chapitre 2. Propriétés du Kaolin

### 2.1. Détermination des limites d'Atterberg

#### 2.1.1. Introduction

L'eau joue un rôle important dans la pratique de la mécanique des sols lorsqu'ils traitent avec la densité, l'indice des vides, Caractéristiques de l'établissement et de la force de l'une des sols perturbés ou non perturbées. Sols fins en particulier, peuvent être dans l'un de plusieurs états en fonction de la quantité d'eau dans le sol. Lorsque de l'eau est ajoutée à un sol sec, la particule est recouverte d'eau adsorbées à former un film mince tout autour. Si l'addition d'eau se poursuit, l'épaisseur de la pellicule d'eau continue d'augmenter, ce qui facilite ainsi l'effet de glissement entre les particules adjacentes. Ainsi, il est un fait que le comportement du sol est liée à la quantité d'eau dans le système.

#### 2.1.2. Objectif

Pour familiariser la relation générale entre la teneurs en eau et les limites des états de sols en termes de limites (limite de liquidité, limite de plasticité et la limite de de retrait )

#### 2.1.3. Théorie

Les teneurs en humidité de sol cohérent correspondant aux limites empiriquement définies entre les états de la cohérence (liquide, en plastique, solide) de la fraction du sol en passant un tamis 425 $\mu$ m. Ces limites, et les phases de sol qu'ils définissent, sont illustrés à la figure (II.1).

Phase	SOLID STATE	SEM-SOLID STATE	PLASTIC STATE	LIQUID STATE	SUSPENSION
Water	← Water content decreasing →				
Limits	Dry soil	Shrinkage Limits SL	Plastic Limits PL Sticky Limit (MS)	Liquid Limit LL	
			Plasticity Index (PI)		
Shrinkage	Volume constant	← Volume decreasing →			
Condition	Hard to stiff	Workable	Sticky	Slurry	Water-belt suspension
Shear Strength (kN/m <sup>2</sup> )	← Shear strength increasing (-1.70) (-1.7) (-1.2) →			Negligible to nil	
Moisture Content	0	SL	PL	LL	

Fig. II.1 Phases de sol et les limites d'Atterberg

- limite de liquidité ( $W_L$ ), la teneur en eau, d'un sol à la limite définie arbitrairement entre les états semi-liquides et plastiques.
- limite de plasticité ( $W_P$ ), la teneur en eau, d'un sol à la frontière entre la matière plastique et des états semi-solides.
- Indice de plasticité ( $I_P$ ), la gamme de teneur en eau sur laquelle un sol se comporte plastiquement.

$$I_P = W_L - W_P$$

#### 2.1.4. Limite de liquidité

La limite de liquidité a été obtenue par la méthode de Casagrande (à la coupelle) selon la norme NF P 94-051

### 2.1.4.1. Préparation les échantillons et procédure de mesure

- Sélectionnez (150 - 200 ) g de kaolin (k13).
- Ajouter l'eau en différents proportions au kaolin et les mélanger dans un bol en verre par une spatule.
- Mettre une partie du kaolin mixte dans la coupe du dispositif de limite de liquidité avec une spatule en prenant soin de ne pas l'air piège. Radier l'excès de boue à la règle pour obtenir une surface lisse et plane.
- Former une rainure dans le sol en tirant l'outil de rainurage, le bord biseauté vers l'avant, à travers le sol de la partie supérieure de la coupelle vers le fond de la coupelle(figure II.2).
- Enregistrer le nombre de coups nécessaires pour fermer la rainure.
- Retirer une tranche de sol et de déterminer sa teneur en eau, w.
- Répéter les étapes 1 à 5 avec un échantillon de sol avec une teneur en eau légèrement supérieure ou inférieure. Si l'eau doit être ajoutée ou supprimée
- dépend du nombre de coups nécessaires pour fermer le bosquet dans l'exemple précédent.

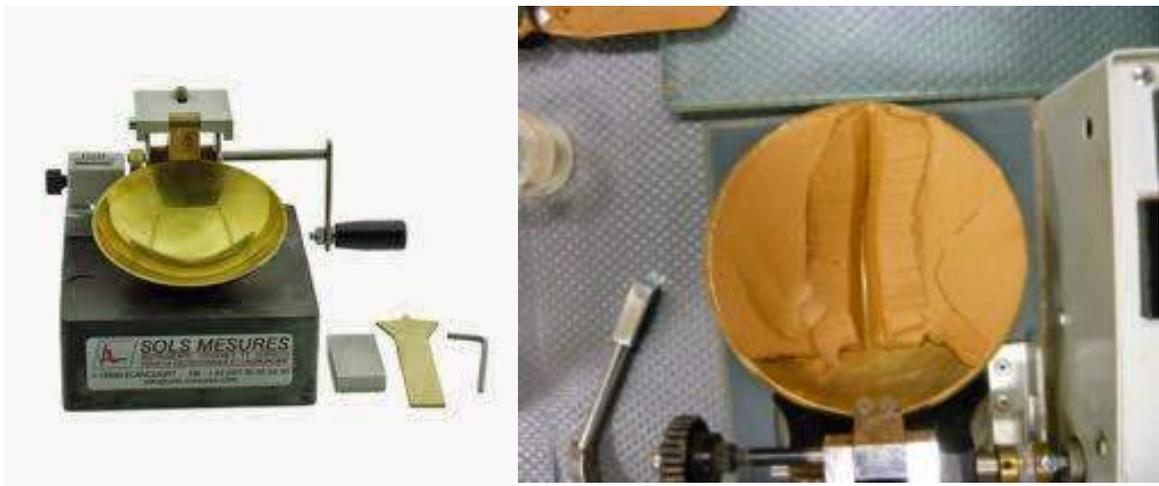


Fig.II.2 Le dispositif utilisé pour mesurer la limite de liquidité.

### 2.1.4.2. Résultats

Tracer la relation entre la teneur en eau, en fonction du nombre correspondant de coups de la coupelle . Tracer la droite de régression à travers les cinq ou plusieurs points tracés. Prenez la teneur en eau correspondant à l'intersection de la ligne avec la baisse de 25 coups abscisse que la limite de liquidité du Kaolin (figure II.3).

Numéro de détermination	1	2	3	4	5
Nombre de coups	20	35	23	17	28
Numéro de container	1	2	3	4	5
Poids de container (W0) g	13	13.11	13	13.66	9.67
Poids de container + kaolin mouille (W1) g	27.80	24.16	27.40	31.24	25.81
Poids de container + kaolin sec (W2) g	23.36	21.06	23.16	25.81	21.16
Poids de l'eau (W1-W2) g	4.44	3.1	4.24	5.43	4.65
Poids de kaolin sec(W2-W0) g	10.36	7.95	10.16	12.15	11.49
Teneur en eau ( $w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_0} * 100\%$ )	42.857	38.993	41.732	44.691	40.470
<b>W<sub>L</sub> = 41 %</b>					

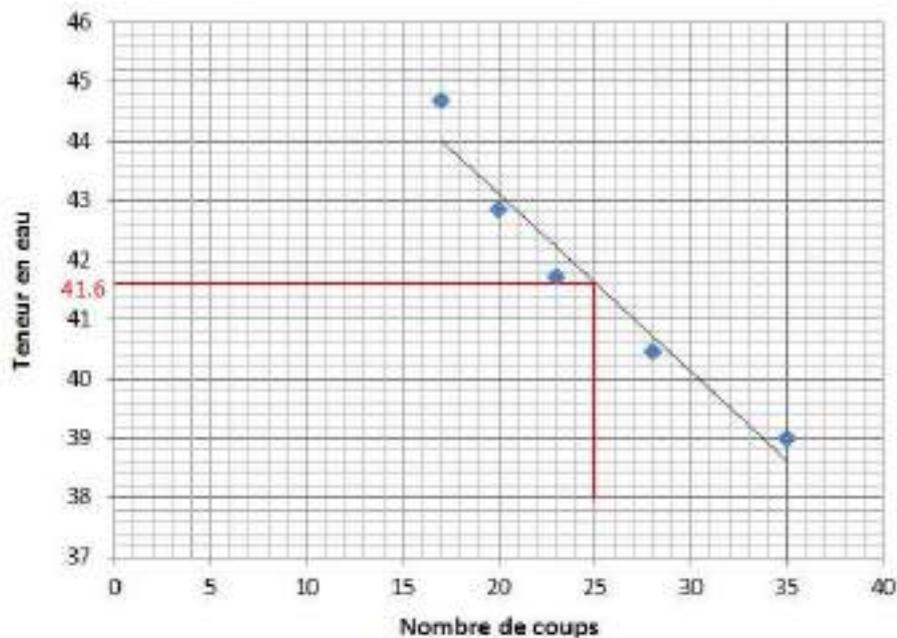


Fig.II.3 La teneur en eau, en fonction du nombre correspondant de coups de la coupelle

## 2.1.6 Limite de plasticité

### 2.1.5.1. Préparation les échantillons et procédure de mesure

- Sélectionnez (100 - 150 ) g de kaolin (k13).
- Ajouter l'eau en différentes proportions au kaolin et les mélanger dans un bol en verre par une spatule.
- Rouler l'éprouvette par les doigts sur une plaque de verre jusqu' à avoir une tige de diamètre uniforme de 3 mm.
- Lorsque la diamètre de tige devient 3mm, réformer en une boule.
- Pétrir la boue pendant quelques minutes afin de réduire légèrement sa teneur en eau.
- Rouler l'éprouvette autre fois par les doigts sur une plaque de verre jusqu' à avoir une tige de diamètre uniforme de 3 mm.

- Lorsque le sol a atteint le point où il sera crumblé, et quand la tige a un diamètre uniforme de 3 mm, il est à la limite de plastique. Déterminer la teneur en eau du kaolin (figure II.4).



Fig. II.4 Mesure la limite de plasticité

#### 4.3.2.5. Résultats

Calculer la moyenne des teneurs en eau obtenus à partir des trois essais de limite de plasticité.

La limite de plasticité,  $W_p$ , est la moyenne des trois teneurs en eau.

Si  $W_p =$

- (0-3) - non en plastique
- (3-15) - Légèrement en plastique
- (15-30) - plastique Medium
- >30 - très plastique

Table II.1 Les résultats des essais de limite de plasticité.

Numéro de détermination	1	2	3
Numéro de container	1	2	3
Poids de container (W0) g	12.97	13	13.11
Poids de container + kaolin mouillé (W1) g	23.5	22.64	22.44
Poids de container + kaolin sec (W2) g	21.72	20.93	20.78
Poids de l'eau (W1-W2) g	1.78	1.71	1.66
Poids de kaolin sec (W2-W0) g	8.75	7.93	7.67
Teneur en eau ( $w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_0} * 100\%$ )	20	21	21
$W_p = 21\%$ (plastique Medium)			

### 4.3.3. Indice de plasticité

L'indice de plasticité est calculée de la manière suivante:

$$I_p = W_L - W_p$$

$$I_p = 41\% - 21\%$$

$$I_p = 20\%$$

#### 4.4. Densité des grains solide

La densité est une importante caractéristique physique des sols. Pour déterminer les efforts qu'exerce un sol, on doit impérativement déterminer sa densité des grains solides. Cette densité est utilisée comme paramètre de contrôle.

##### 2.2.1. Objectif

Le but de cet essai est de déterminer la densité des grains solide d'un sol afin de caractériser ce sol pour prévoir son comportement.

##### 2.2.2. Appareillage

- Fiole de gaz, de capacité un litre, avec bouchon en caoutchouc et couvercle en verre.
- Agitateur à retournement, permettant l'agitation de l'échantillon.
- Balance.

##### 2.2.3. Procédure de mesure

- Choix de l'échantillon
- Préparation de la fiole de gaz
- Pesage
- Ajout de l'eau et agitation
- Remplissage de la fiole par l'eau et mise en place du couvercle en verre
- Pesage de la fiole avec l'échantillon, l'eau et le couvercle
- Pesage de la fiole et de l'eau

#### 4.4.2. Résultats

La densité des grains solides,  $G_s$ , des particules de sol pour chaque détermination est calculée à partir de l'équation suivante :

$$G_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)}$$

- $m_1$  = masse de la fiole et du couvercle.
- $m_2$  = masse de la fiole, couvercle et sol sec ;
- $m_3$  = masse de la fiole, du couvercle, de sol et d'eau.
- $m_4$  = masse de la fiole remplie d'eau, et du couvercle.

Table II.2 Les résultats des essais de mesurer la densité des grains solide

m 1	m 2	m 3	m 4	$G_s$
30.28	32.42	57.41	56.08	2.64
30.28	33.08	57.83	56.08	2.66
30.28	32.06	57.17	56.08	2.58
$G_s$				2.62

## 4.5. Analyse sedimentometrique

### 2.3.1. Objectif

Ce test est effectué pour déterminer le pourcentage des différentes granulométries contenue dans un sol (Kaolin) passant au tamis 2.38 mm.

### 2.3.2. Théorie

Déterminer le poids sec du sol à partir de la teneur en eau de l'échantillon, de calculer le poids volumique du sol à l'aide d'un pycnomètre et de réaliser l'essai de sedimentometrie par lecture des graduations présentes sur un aréomètre à différents intervalles de temps.

(Les calculs ont été fait selon la norme NF P 94-057)

### 2.3.3. Préparation les échantillons et procédure de mesure

- On prélève environ (70-90) g du Kaolin.
- Ajouter 500 ml du mélange d'eau distillée ou déminéralisée additionnée d'un défloculant pour imbiber puis disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de 440 cm<sup>3</sup> d'eau distillée ou déminéralisée et de 60 cm<sup>3</sup> d'une solution à 5 % d'hexamétaphosphate de sodium (Na<sub>6</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>·10H<sub>2</sub>O)
- Repos 24h et après on les mixe par Mixeur - densimètre pendant 1 min et ajout d'eau distillé pour obtenir le volume deux litre dans l'éprouvette.
- La burette est placé dans le bain thermostaté à 20°C jusqu'à équilibre.
- Très lentement et prudemment Insérer le burette dans l'éprouvette et registrer sa lecture aux (30 sec, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h et 24h). Procéder aux trois premières lectures à (0.5, 1 et 2)min, sans retirer le densimètre de la solution. À partir de la troisième lecture, retirer le densimètre de la solution après chaque mesure, le nettoyer puis le plonger dans l'éprouvette d'eau distillée ou déminéralisée.



a- Le Kaolin et le mélange d'eau distillée  
et d'un défloculant

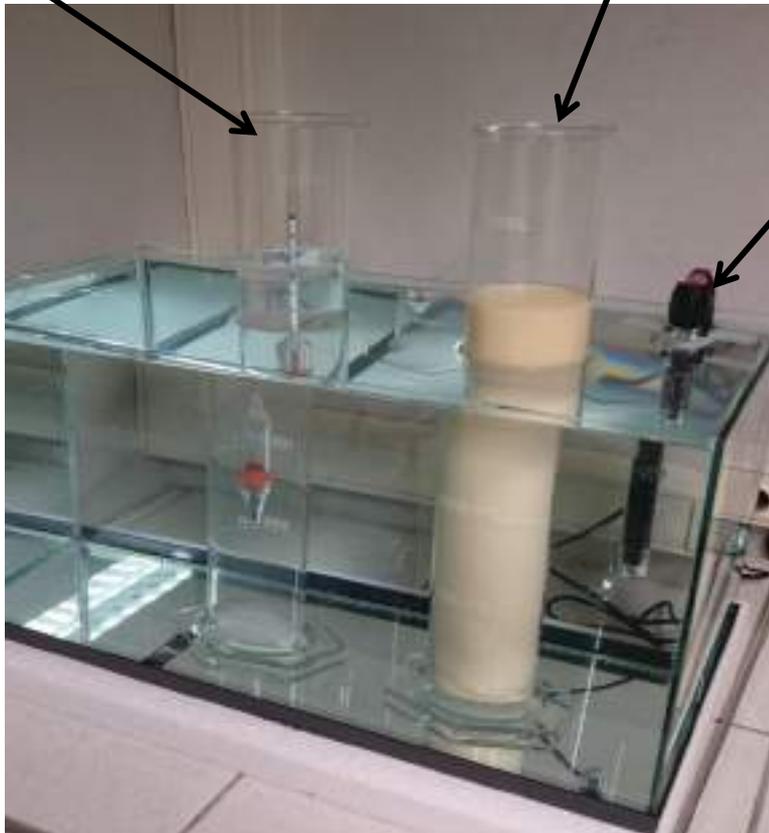


b- Mixeur

Eprouvette d'eau  
Distillée

Eprouvette d'eau distillée  
+ solution + Kaolin

Réchauffeur



C - un éprouvette d'eau distillée pour l'étalonnage et éprouvette d'eau distillée, solution et le  
Kaolin dans bain thermostatisé à 20°C

Fig.II.5 Matériel pour un essai sédimentométrique : Bain thermostatique – burette – densimètres -  
réchauffeur

### 2.3.4. Calculs et résultats

A chaque lecture (R), on calcule

- $R_r$  (valeur corrigé ou réelle) :

$$R_r \left( \frac{g}{ml^3} \right) = R_t + k_t + k_m - k_d$$

Où

$R_t$  : lecture a  $t^\circ$ x  $\left( \frac{g}{ml^3} \right)$ .

$k_t$  : correction de température de l'aréomètre.

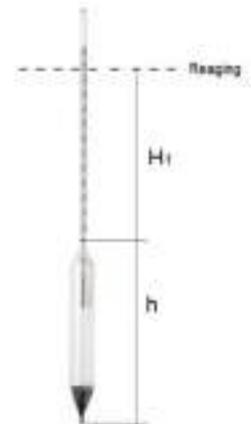
$k_m$  : correction du ménisque (C'est la différence de lecture entre la lecture en haut et en bas du ménisque ).

$k_d$  : la lecture de l'aréomètre d'une éprouvette .

- $H_r$  (la hauteur effective) :

$$H_r \text{ (cm)} = H_1 + \frac{1}{2} \left( h - \frac{\text{Volume du bulbe}}{\text{Section de l'éprouvette utilisée}} \right)$$

pour l'étalonnage du densimètre



- $D_p$  ( le diamètre des grains ) :

$$D_p \text{ (mm)} = \sqrt[2]{30 \frac{\eta}{g (\gamma_s - \gamma_w)} \frac{H_r}{t}}$$

Où

$\eta$  : Viscosité  $\left( \frac{g}{cm.s} \right)$ .

$g$  : Pesanteur  $\left( \frac{cm}{s^2} \right)$ .

$\gamma_s$  : La masse volumique des particules solides.

$\gamma_w$  : La masse volumique de l'eau distillée.

$\gamma_s$  et  $\gamma_w$  en  $\frac{kg}{m^3}$  ou  $\frac{g}{cm^3}$

$t$  : temps en minute

- P(%) le pourcentage de grains de diamètre inférieur ou égale :

$$P(\%) = \frac{100 \cdot V_s}{P_{dsec}} \cdot \frac{\gamma_s \cdot \gamma_w}{(\gamma_s - \gamma_w)} \left( \frac{\gamma_t}{\gamma_w} - 1 \right)$$

Où

$V_s$  : Le volume de liquide dans la burette (m<sup>3</sup>).

$P_{dsec}$  : Le poids du sol sec (kg).

$\gamma_t$  : La masse volumique de la suspension au temps ( $\gamma_t = R_r \cdot \gamma_w$ ).

$\gamma_s, \gamma_w$  et  $\gamma_t$  : en (kg/m<sup>3</sup>).

Table II.3 Les résultats d'essai sédimentométrique

T Temps de lecture (min)	R Lecture densimètre (kg/m <sup>3</sup> )	T Temperature (°C)	Rc Lecture densimètre corrigé (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>p</sub> Le diamètre des grains(μm)	P%
0.5	<b>1.0253</b>	20	<b>1.0219</b>	<b>66.9948935</b>	<b>77.9108555</b>
1	<b>1.025</b>	20	<b>1.0216</b>	<b>47.9628096</b>	<b>76.8435835</b>
2	<b>1.0238</b>	20	<b>1.0204</b>	<b>35.5353628</b>	<b>72.5744956</b>
4	<b>1.023</b>	20	<b>1.0196</b>	<b>25.8630333</b>	<b>69.7284369</b>
8	<b>1.022</b>	20	<b>1.0186</b>	<b>18.9181242</b>	<b>66.1708636</b>
15	<b>1.021</b>	20	<b>1.0176</b>	<b>14.2612314</b>	<b>62.6132903</b>
30	<b>1.02</b>	20	<b>1.0166</b>	<b>10.3896074</b>	<b>59.055717</b>
60	<b>1.0188</b>	20	<b>1.0154</b>	<b>7.5975996</b>	<b>54.786629</b>
120	<b>1.0173</b>	20	<b>1.0139</b>	<b>5.58627583</b>	<b>49.450269</b>
240	<b>1.016</b>	20	<b>1.0126</b>	<b>4.07667552</b>	<b>44.8254237</b>
480	<b>1.0143</b>	20	<b>1.0109</b>	<b>2.99565992</b>	<b>38.7775491</b>
1440	<b>1.012</b>	20	<b>1.0086</b>	<b>1.81409177</b>	<b>30.5951305</b>

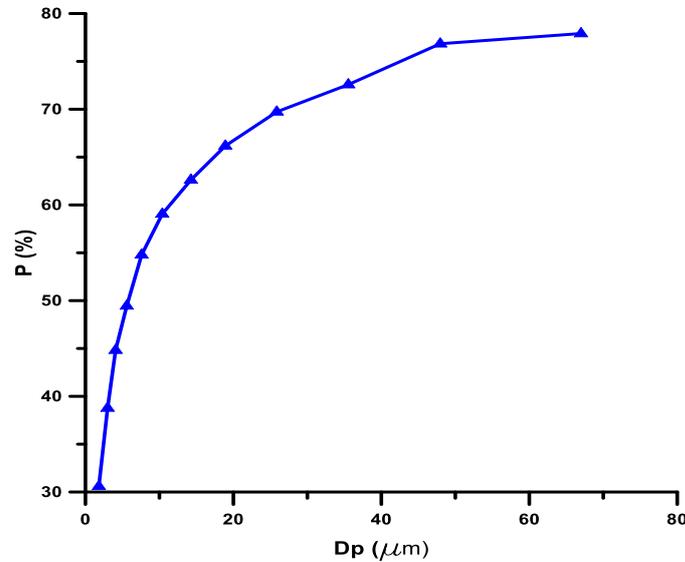


Fig.II.6 Courbe granulométrique de la kaolin

#### 2.4. La composition chimique

Le Kaolin K13 est une dénomination de type industriel d'une argile de synthèse. La composition chimique est résumée dans le tableau suivant:

Tableau II.4 Caractéristique chimique du KAOLIN K13.(SIBELCO)

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO
>60%	<1.0%	<28.0%	<0.6%	<0.5%

Avec :

- SiO<sub>2</sub> : Dioxyde de silicium.
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Oxyde de fer isométrique en position α c'est une hématite en γ c'est une magnétite.
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Alumine.
- K<sub>2</sub>O : Potasse.
- CaO : Chaux.

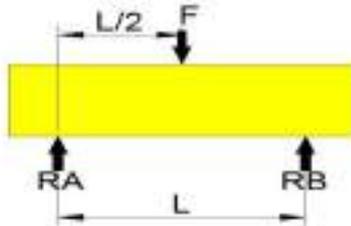
## Chapitre 3. Étude expérimentale à la flexion d'une argile sous différentes succions

### 3.1. Objectif

Notre étude est à pour objectif de réaliser des essais de flexion sur des petites poutrelles de Kaolin (K13) préalablement conditionnées à différentes succions, et effectuer une corrélation d'images numériques enregistrées durant ces essais pour estimer la résistance maximale à la traction avant la rupture.

### 3.2. Principe et réflexion

Le principe de l'essai de flexion est résumé dans ce schéma :

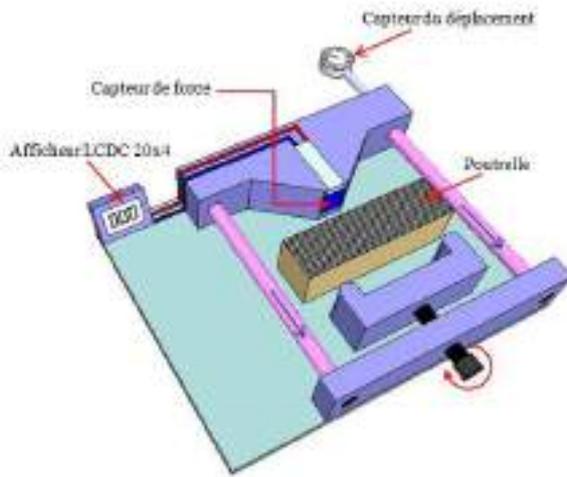


On utilise un dispositif de flexion (Fig.III.1) qui contient un capteur de Force et un capteur de déplacement, le capteur de force enregistré la valeur de la force comme Tension. Dispositif placé sous une caméra connectée à l'ordinateur et les images sont commandés par le logiciel VIC 2D.

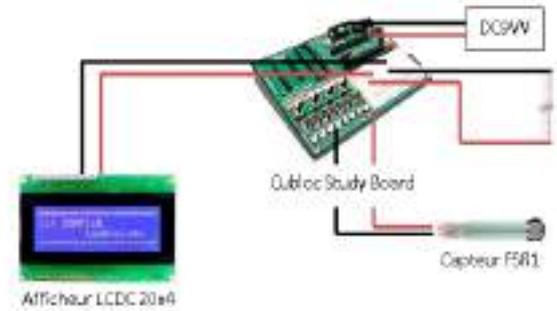
pour convertir la tension obtenu par l'essai expérimental en force, il faut tout d'abord réaliser l'étalonnage de l'appareil. Pour ce faire, des essais sont réalisées avec deux résistances différentes. on désigne par la suite le graphe du voltage en fonction du poids, on obtint alors une courbe à 2 pentes qu'on divise pour les équations suivantes:

$$y = 0.7102 x.$$

$$x = 1.4081 y.$$



a- Le dispositif de flexion



b- Capteur de force.( KATTI 2012)

Fig.III.1 Le dispositif expérimental pour réaliser les essais de flexion

### 3.3. Préparation de la boue

La Kaolinite, initialement présente sous forme de poudre, est mélangée avec de l'eau distillée à une teneur en eau égale à 1,5 fois sa limite de liquidité ( $w=1.5 w_L$ )

La masse du matériau ms d'argile sec est de 2000 grammes

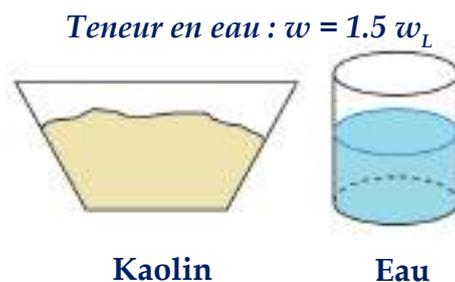
D'où la masse de l'eau est :

$$M_{\text{eau}} = 60\% * 2000 \text{ g}$$

$$M_{\text{eau}} = 1200 \text{ g.}$$

$$V_{\text{eau}} = \frac{M_{\text{eau}}}{\gamma_{\text{eau}}}$$

$$V_{\text{eau}} = 1.2 \text{ L}$$



Puis le mélange poudre-eau est malaxé à l'aide d'un malaxeur pendant 10 minutes afin d'obtenir une boue homogène. La boue est ensuite versée dans des bassines puis protégée par un film plastique et du papier aluminium et laissée au repos pendant 24 heures pour une meilleure homogénéité de la teneur en eau (Fig.III.2).

Après cette étape, la boue est progressivement versée dans un consolidomètre pour une préconsolidation jusqu'à 120 kPa.



Fig.III.2 Préparation de la boue, (a) Poudre de kaolin, (b) La boue de kaolin, (c) La boue de kaolin dans une bassine et protégée par un film plastique et du papier aluminium.

### 3.4. Consolidation

Le Consolidomètre est composé principalement d'un tube en PVC de diamètre intérieur égale à 94 mm et d'une hauteur de (1 m) (Fig.III.3). Totalement graissé à l'intérieur pour minimiser les frottements, il est posé sur une cale drainée dans un réservoir contenant de l'eau. La boue est posée progressivement dans le tube rempli d'eau puis laissée au repos pendant 24 heures pour la sédimentation. Après cette période, une deuxième cale drainée est placée au-dessus de la boue contenue dans le tube sur un filtre également. A l'aide d'un piston, des contraintes verticales sont appliquées sur la boue d'argile d'une progressive en posant des poids sur le piston pour une durée de 24 heures pour chaque palier : 5, 10, 20, 40, 85 kg. Le dernier palier est laissé pendant au moins 21 jours pour assurer la fin de la consolidation primaire.

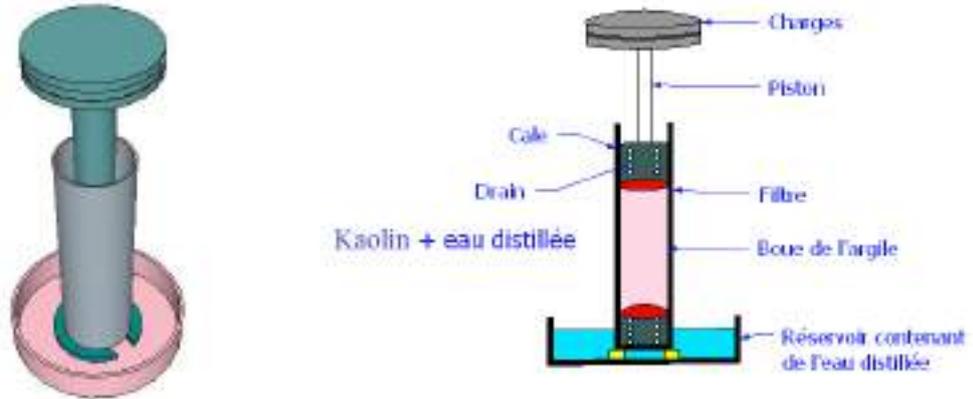
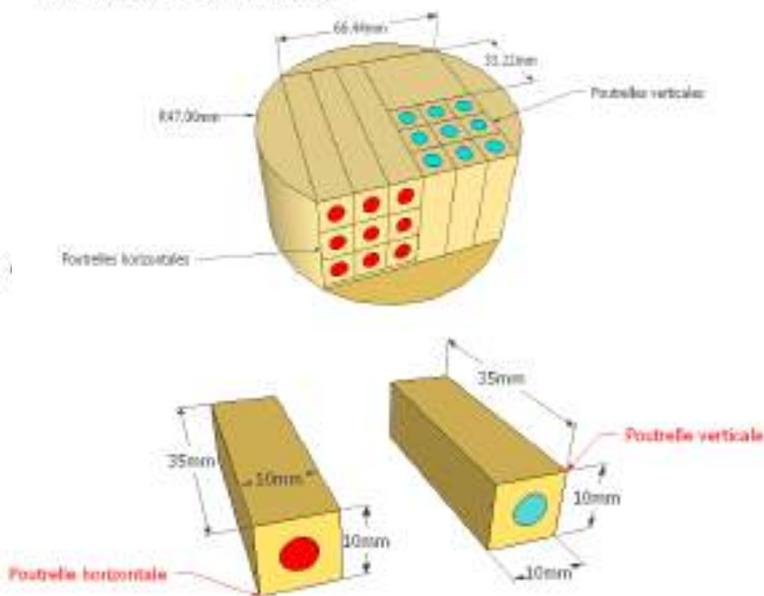


Fig.III.3 Les Composants de la Consolidomètre.

### 3.5. Préparation des éprouvettes

A partir de la carotte d'argile consolidée à 120 kPa, un éprouvette parallélépipède (66.44 \* 66.44 \* 35 ) mm des dimensions est découpée à l'aide d'un tour et après on coupera la parallélépipède aux poutrelles verticales et horizontales aux dimensions à l'ordre de 35 mm de longueur, 10 mm de hauteur et 10 mm d'épaisseur (Fig.III.4 ).

*On marque les poutrelles verticales avec un marqueur vert et les poutrelles horizontales avec un marqueur rouge*



a- la carotte d'argile préconsolidée à 120 kPa et la poutre horizontale et verticale

b- Le tour (dispositif de découpage)

Fig.III.4 Préparation les poutres utilisées pour réaliser les essais de flexion

Nous mettons les poutrelles dans le Dessiccateur qui est contient une produit dessicant (solution de KOH ( 361 MPa), K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (109.3 MPa) et NaCl (37.6 MPa)) ( voir Fig.(3.5) ).  
Après avoir vidé le Dessiccateur de l'air, on les laisse sécher

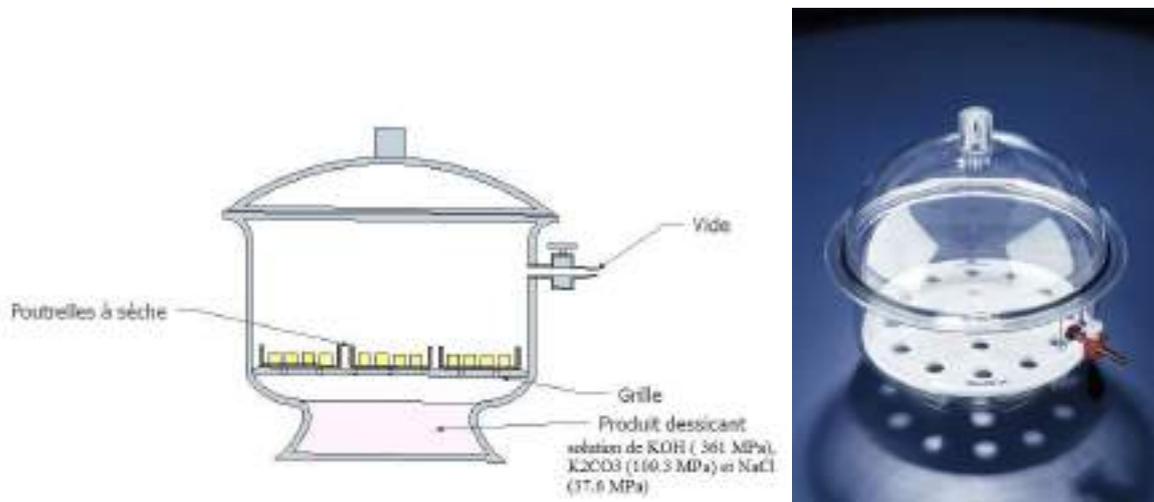


Fig.III.5 Le Dessiccateur

### 3.5. Résultats

De la corrélation d'image on a obtenu :

- Déplacement longitudinal, à la direction x ( U ) .
- Déplacement transversale, à la direction y ( V ).
- Les déformations longitudinales, les déformations transversales et les déformation de cisaillement ( $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$  et  $\epsilon_{xy}$ ).
- Les déformations principales majeure et les déformations principales mineur ( $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ ).

De la tension maximale ce qui est mesuré expérimentalement , on peut calculer la force maximale appliquée à la poutrelle. Pour convertir la tension obtenu par l'essai expérimental en force, il faut tout d'abord réaliser l'étalonnage de l'appareil. Pour ce faire , des essais sont réalisées avec deux résistances différentes. on désigne par la suite le graphe du voltage en fonction du poids, on obtint alors une courbe à 2 pentes qu'on divise pour les équations suivantes:

$$y = 0.7102 x.$$

$$x = 1.4081 y.$$

De cette force, on calcule la pression, le moment flèche maximale, le flèche maximale et le contrainte de traction maximale selon les équations suivant :

$$F = 1,4081 T \text{ (N)}$$

$$P = \frac{F}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$A = 50 \text{ mm}^2$$

$$M_f = \frac{F \cdot L}{4} \text{ (N.mm)}$$

$$E = 13 \text{ Mpa}$$

$$f = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \text{ (mm)}$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \text{ (mm}^4\text{)}$$

$$\sigma_{T.max} = \frac{6 M_f}{b \cdot h^2} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$b = 10 \text{ (mm)}, h = 10 \text{ (mm)}$$

avec :

F = la force

A = la surface de charge appliquée

P = la pression

E = module de Young

$M_f$  = le moment flèche

h = haute de la poutrelle

f = le flèche

b = largeur de la poutrelle

$\sigma_{T.max}$  = le contrainte de traction

I = moment d'inertie

maximale

Nous avons réalisé vingt-quatre essais de flexion avec trois différents sels (table III.1).

Table III.1. Les essais de flexion

	Humidité relative (%)	Succion (MPa)	Nom de l'essai	Teneur en eau initial ( $w_0$ %)	L'indiced des vides initial ( $v_0$ %)
KOH	7	361	KOH _ P1H	36.45	96.59
			KOH _ P2V		
K2CO3	45.066	109.3	K2CO3 _ P2V	36.45	96.59
			K2CO3 _ P3H		
NaCl	75.666	37.6	NaCl _ P1V	36.45	96.59
			NaCl _ P1H		

La figure III.6 montre la teneur en eau en fonction du temps pour les poutrelles soumise aux différents succion, utilisées pour réaliser les essais de flexion.

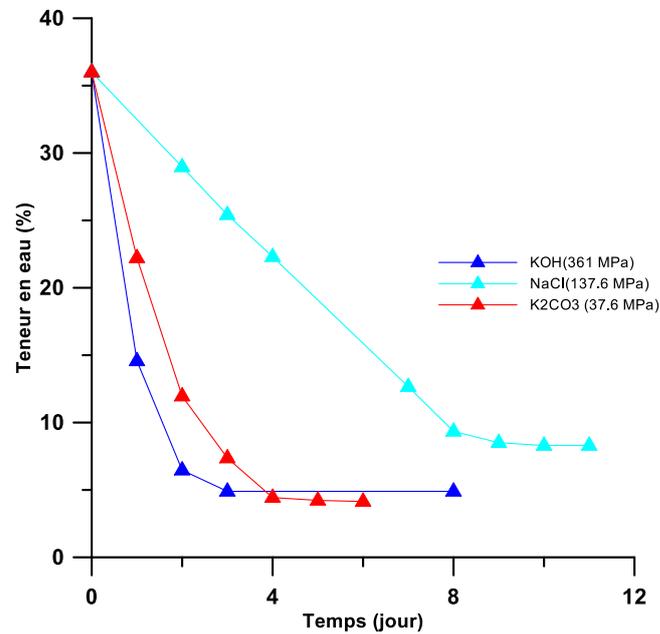


Fig.III.6 Teneur en eau en fonction de temps

### 3.5.1 Essai flexion d'une argile soumise à la solution (KOH (361 MPa))

La figure III.7 présente la force appliquée sur une poutre de kaolin soumise à la solution (KOH (361 MPa)) en fonction du déplacement pour l'essai flexion (KOH\_P1H), la force maximale appliquée est (2.41 N) et ça nous donne une contrainte de traction maximale ( $\sigma_{T.max} = 0.083 \text{ MPa}$ ).

La figure III.8 présente les déformations longitudinales, les déformations transversales et les déformations de cisaillement obtenues de la corrélation d'images et VIC2D au moment avant la rupture. Lorsque la force appliquée est la force maximale. Nous constatons que les déformations longitudinales positives sont entre 0.018 % et 0.172 % dans la plupart de la poutre. Les déformations longitudinales négatives sont entre -0.003% et -0.178 % concentrées principalement proche des appuis de la poutre. La déformation transversale positive est

0.05% dans les parties supérieures de la poutre, et les déformations transversales négatives sont entre -0.014% et -0.975 % dans la plupart de la poutre. Les déformations de cisaillement positives sont entre 0.006 % et 0.168 % dans la moitié droite de la poutre, les déformations de cisaillement négatifs sont entre -0.017 % et -0.202 % dans la moitié gauche de la poutre.

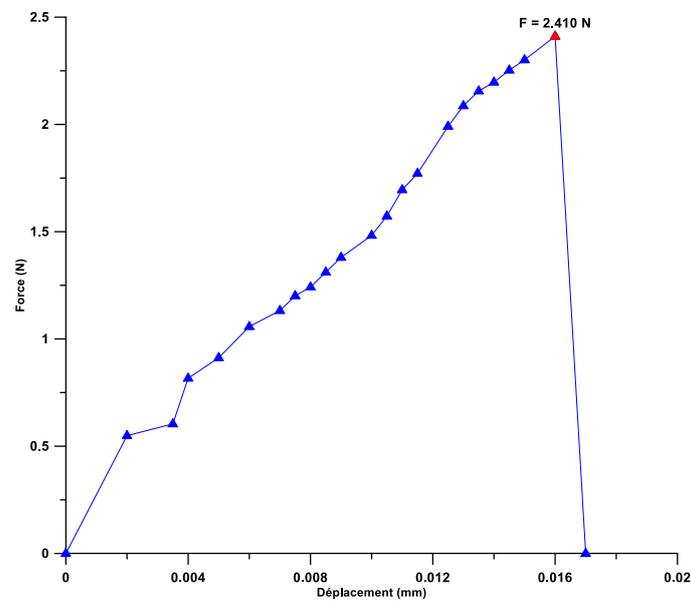
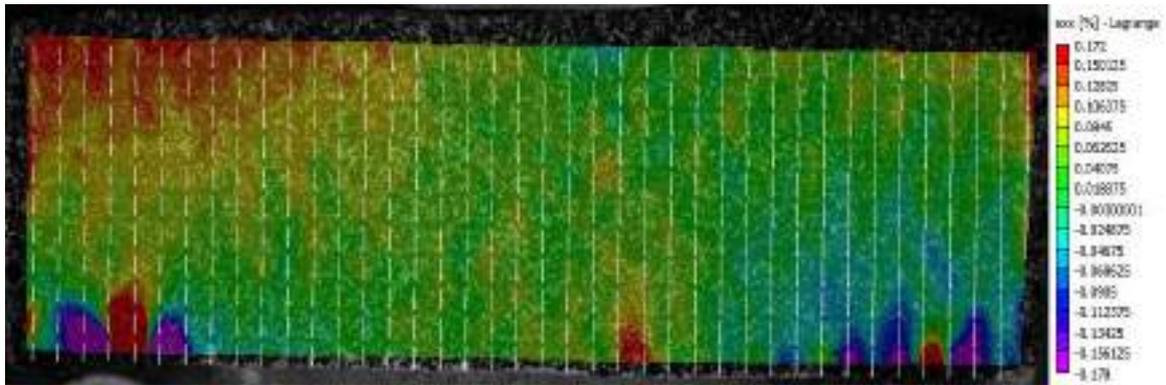
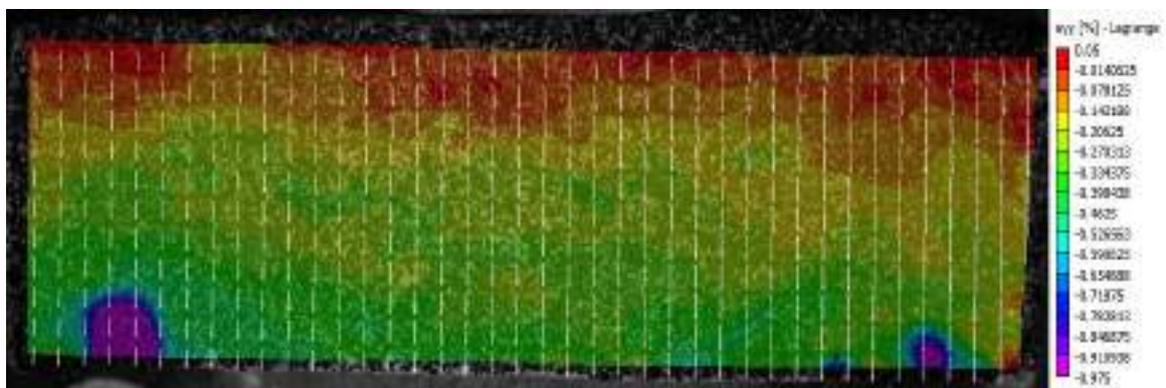


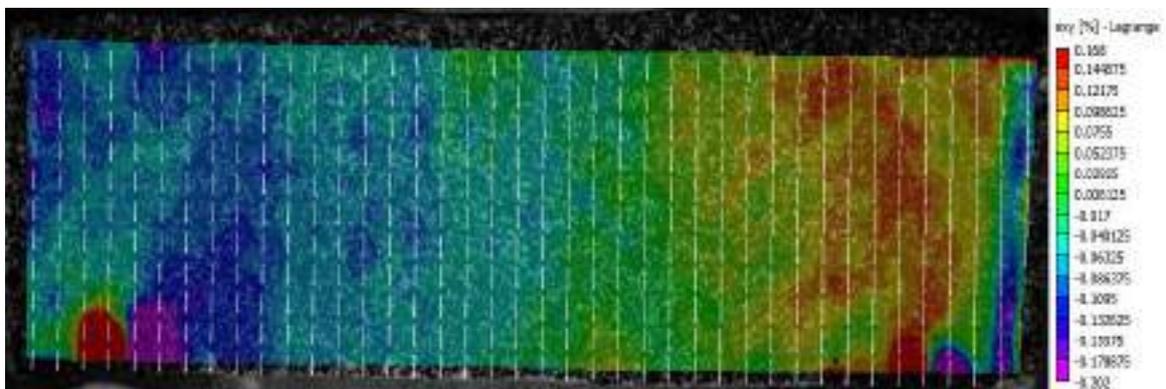
Fig.III.7 La force appliquée en fonction du déplacement- Essai KOH\_P1H



a- Déformation longitudinale ( $\epsilon_{xx}$ %).



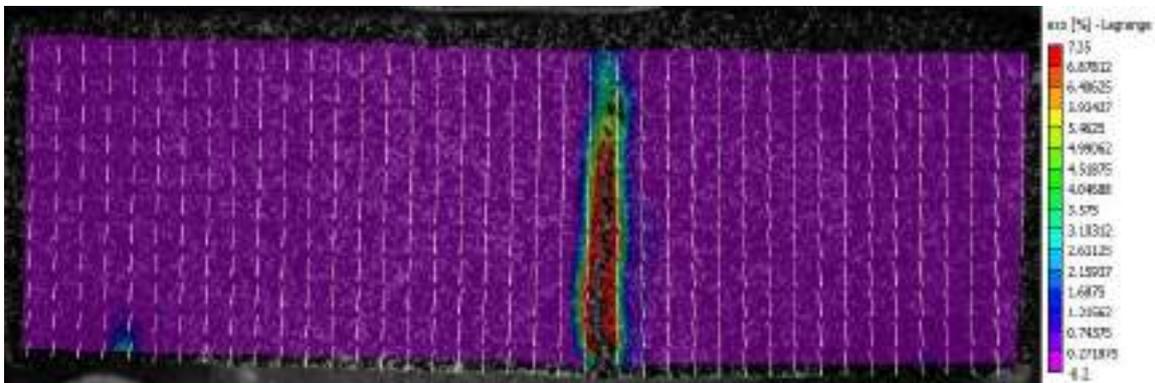
b- Déformation transversale ( $\epsilon_{yy}$  %)



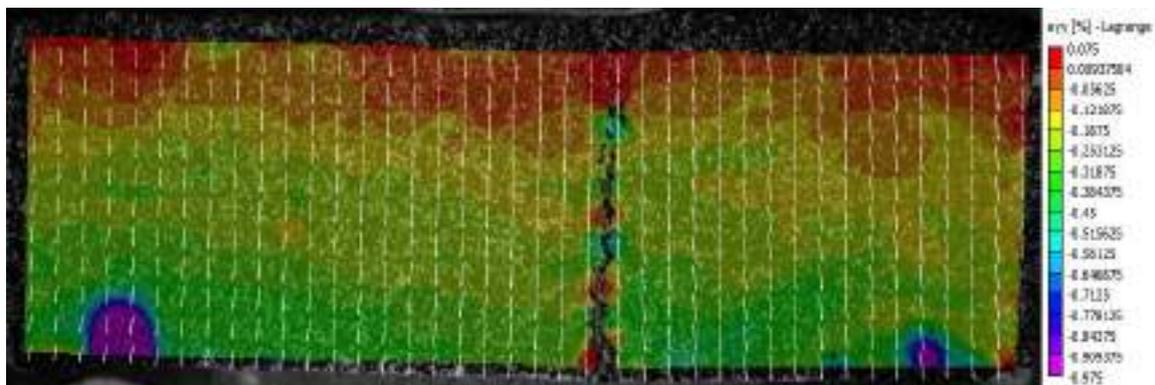
c- Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{xy}$  %)

Fig.III.8 La déformation longitudinale, la déformation transversale et la déformation de cisaillement - Essai KOH\_P1H-avant la rupture

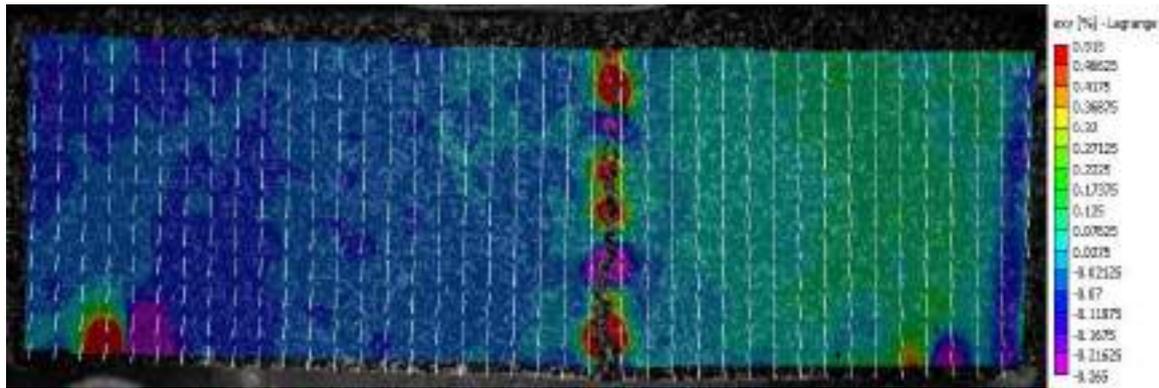
La figure III.9 présente les déformations longitudinales, les déformations transversales et les déformation de cisaillement obtenues de la corrélation d'images et VIC2D pour l'essai flexion (KOH\_P1H), au moment de la rupture. Nous constatons que les déformations longitudinales positives sont entre 0.271 % et 7.35 % sur les deux côtés de la rupture et la déformation longitudinale négative est -0.2 % dans toute la poutre la poutre. Les déformations transversales positives sont entre 0.009% et 0.075 % dans les parties supérieures de la poutre, et les déformations transversales négatives sont entre -0.056% et -0.975 % dans la plupart de la poutre. Les déformations de cisaillement positives sont entre 0.027 % et 0.515 % dans la côté droite de la rupture, les déformations de cisaillement négatifs sont entre -0.021 % et -0.265 % dans la côté gauche de la rupture.



a- Déformation longitudinale ( $\epsilon_{xx}$ %).



b- Déformation transversale ( $\epsilon_{yy}$  %)



c- Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{xy}$  %)

Fig.III.9 La déformation longitudinale, la déformation transversale et la déformation de cisaillement - Essai KOH\_P1H-au moment de la rupture

### 3.5.2. Essai flexion d'une argile soumise à la solution (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(109.3 MPa))

La figure III.10 présente la force appliquée sur une poutre de kaolin soumise à la solution (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (109.3 MPa)) en fonction du déplacement pour l'essai flexion (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>\_P2V), la force maximale appliquée est (3.213 N) et ça nous donne une contrainte de traction maximale ( $\sigma_{T,max} = 0.120 \text{ MPa}$ ).

La figure III.11 présente les déformations longitudinales, les déformations transversales et les déformations de cisaillement obtenues de la corrélation d'images et VIC2D pour l'essai flexion (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>\_P2V), au moment avant la rupture. Lors de la force appliquée est la force maximale.

Nous constatons que les déformations longitudinales positives sont entre 0.005 % et 0.29 % dans la plupart de la poutre et concentrées principalement au milieu où la rupture sera se produire. Les déformations longitudinales négatives sont entre -0.038% et -0.06 % concentrées principalement proche des appuis de la poutre. La déformation transversale positive est 0.009% dans les parties supérieures de la poutre, et les déformations transversales négatives sont entre -0.036% et -0.545 % dans les parties inférieures de la poutre. Les déformations de cisaillement positives sont entre 0.021 % et 0.198 % dans la moitié droite de la poutre, les déformations de cisaillement négatifs sont entre -0.001 % et -0.156 % dans la moitié gauche de la poutre.

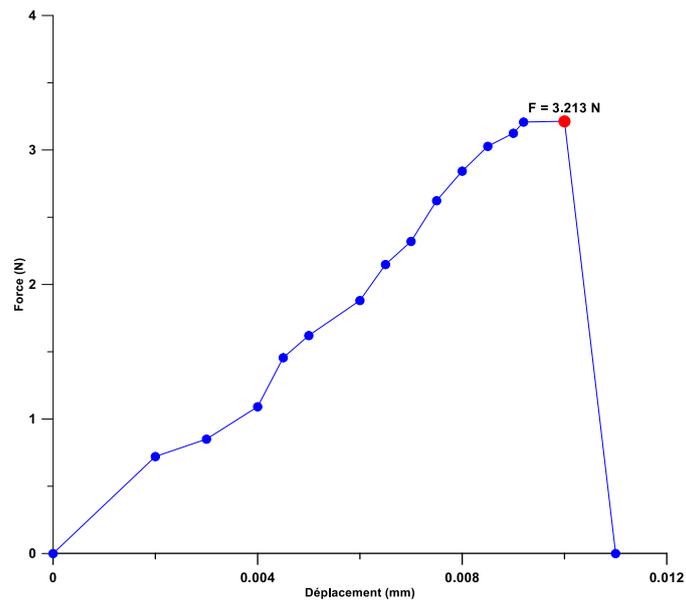
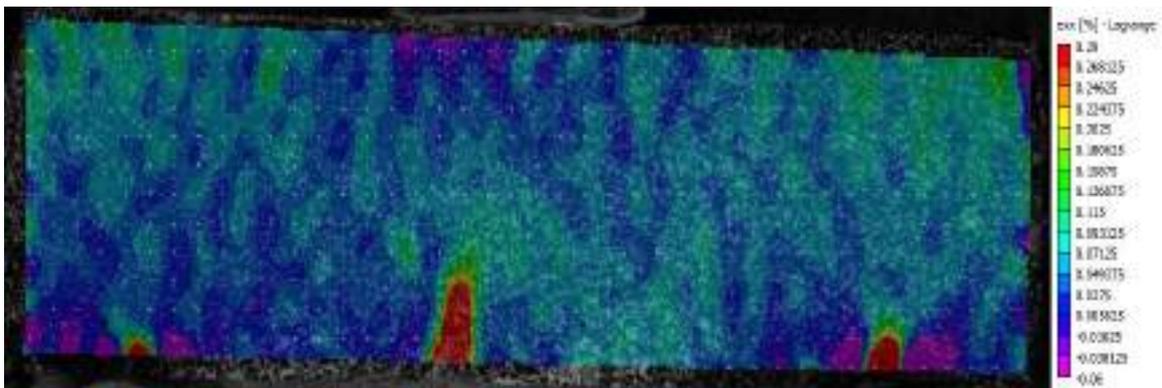
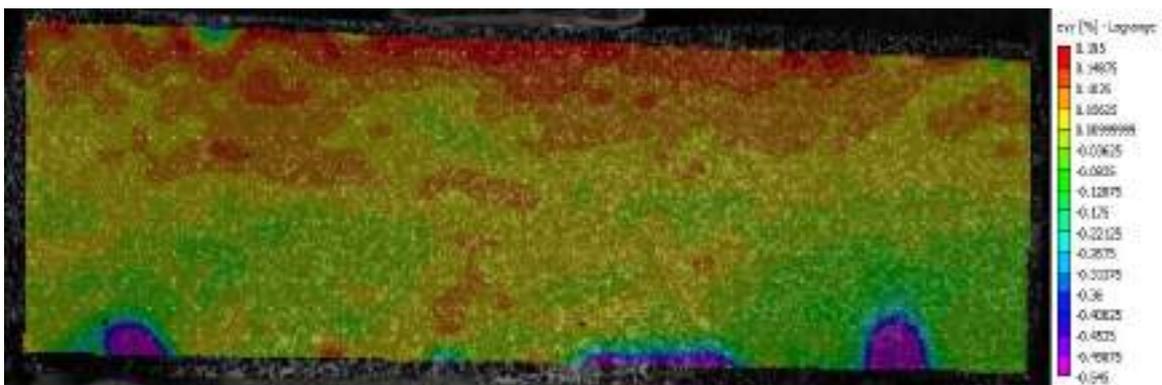


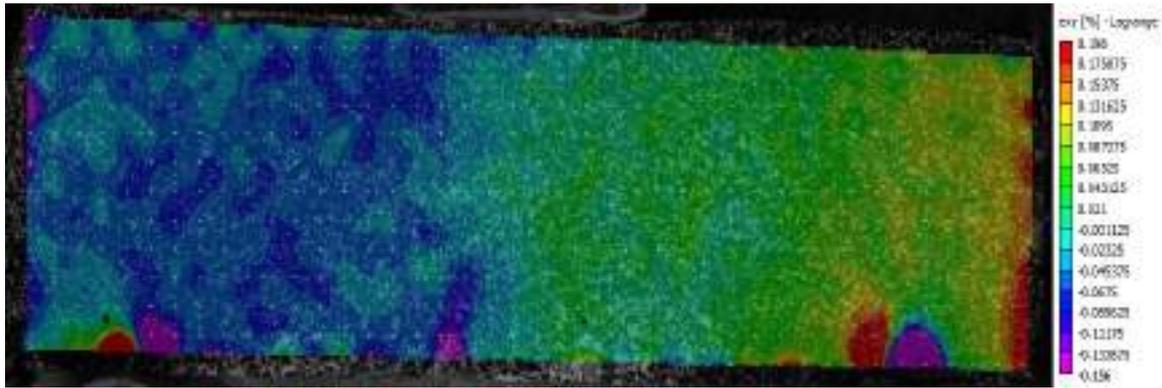
Fig.III.10 La force appliquée en fonction du déplacement- Essai K2CO3\_P2V



a- Déformation longitudinale ( $\epsilon_{xx}$  %).



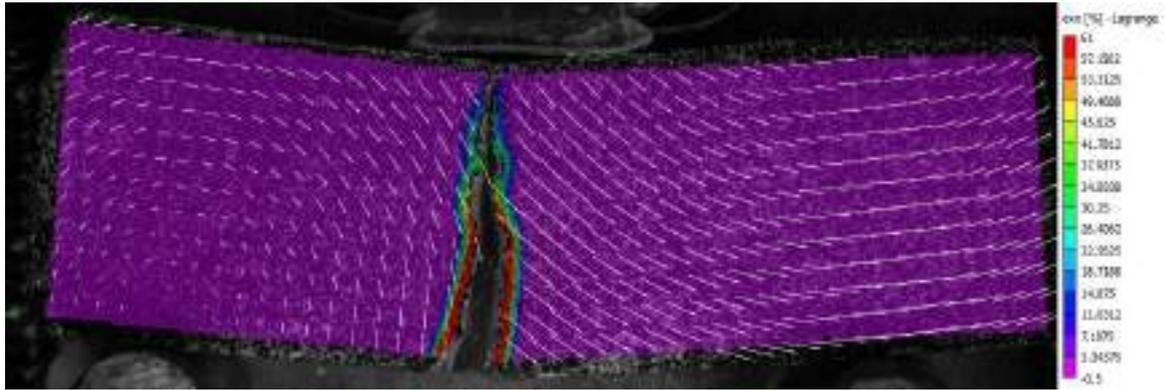
b- Déformation transversale ( $\epsilon_{yy}$  %)



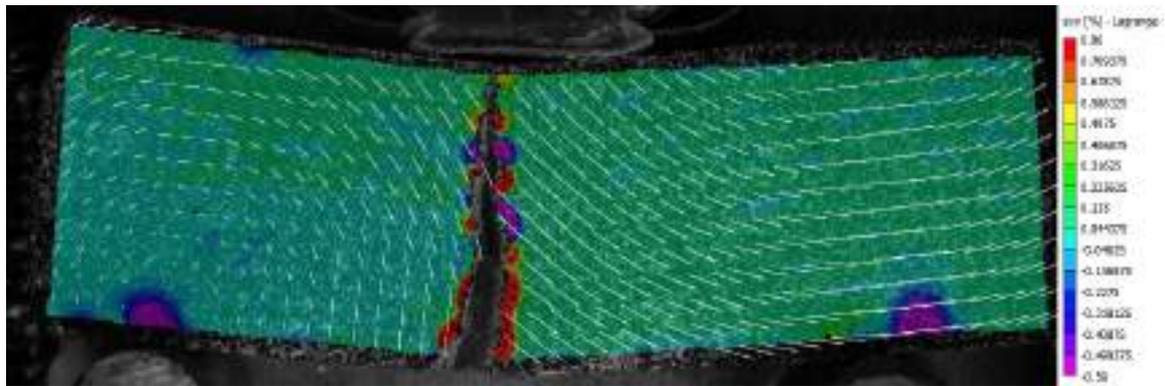
c- Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{xy}$  %)

Fig.III.11 La déformation longitudinale, la déformation transversale et la déformation de cisaillement  
- Essai K2CO3\_P2V-avant la rupture

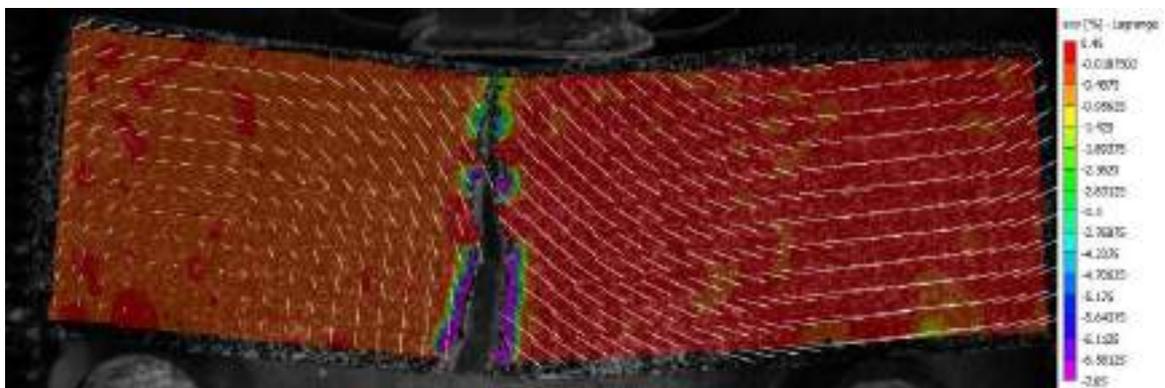
La figure III.12 présente les déformations longitudinales, les déformations transversales et les déformations de cisaillement obtenues de la corrélation d'images et VIC2D pour l'essai (K2CO3-P2V) au moment de la rupture. Nous constatons que les déformations longitudinales positives sont entre 3.34 % et 61 % sur les deux côtés de la rupture et la déformation longitudinale négative est -0.5 % dans toute la poutre. Les déformations transversales positives sont entre 0.044 % et 0.86 %, et les déformations transversales négatives sont entre -0.046% et -0.59 %. La déformation de cisaillement positive est 0.45 % dans la côté droite de la rupture, les déformations de cisaillement négatifs sont entre -0.018 % et -7.05 % dans la côté gauche de la rupture.



a- Déformation longitudinale ( $\epsilon_{xx}$  %).



b- Déformation transversale ( $\epsilon_{yy}$  %)



c- Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{xy}$  %)

Fig.III.12 La déformation longitudinale, la déformation transversale et la déformation de cisaillement - Essai K2CO3\_P2V-au moment de la rupture

### 3.5.3. Essai flexion d'une argile soumise à la solution (NaCl (37.6 MPa))

La figure III.13 présente la force appliquée sur une poutre de kaolin soumise à la solution (NaCl (37.6 MPa)) en fonction du déplacement, pour l'essai flexion (NaCl\_P1H), la force maximale appliquée est (2.589 N) et ça nous donne une contrainte de traction maximale ( $\sigma_{T.max} = 0.093 \text{ MPa}$ ).

La figure III.14 présente les déformations longitudinales, les déformations transversales et les déformations de cisaillement obtenues de la corrélation d'images et VIC2D pour l'essai flexion NaCl-P1H au moment avant la rupture. Lors de la force appliquée est la force maximale. Nous constatons que les déformations longitudinales positives sont entre 0.038 % et 0.455 % dans la plupart de la poutre et concentrées principalement au milieu où la rupture se produit. Les déformations longitudinales négatives sont entre -0.007% et -0.285 % dans les parties supérieures de la poutre et proche des appuis de la poutre. Les déformations transversales positives sont entre 0.024% et 0.11 % dans la plupart de la poutre, et les déformations transversales négatives sont entre -0.018% et -0.575 %. Les déformations de cisaillement positives sont entre 0.037 % et 0.475 % dans la plupart de la poutre, les déformations de cisaillement négatifs sont entre -0.006 % et -0.225 % réparties sur les différentes parties de l'échantillon.

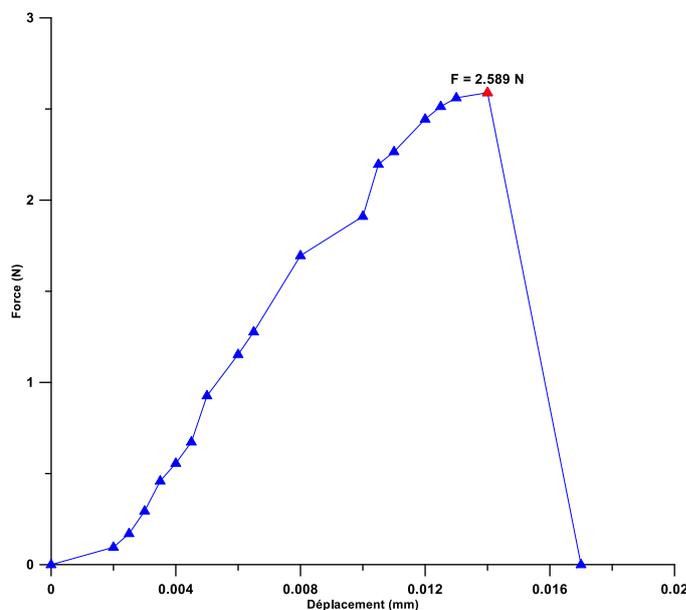
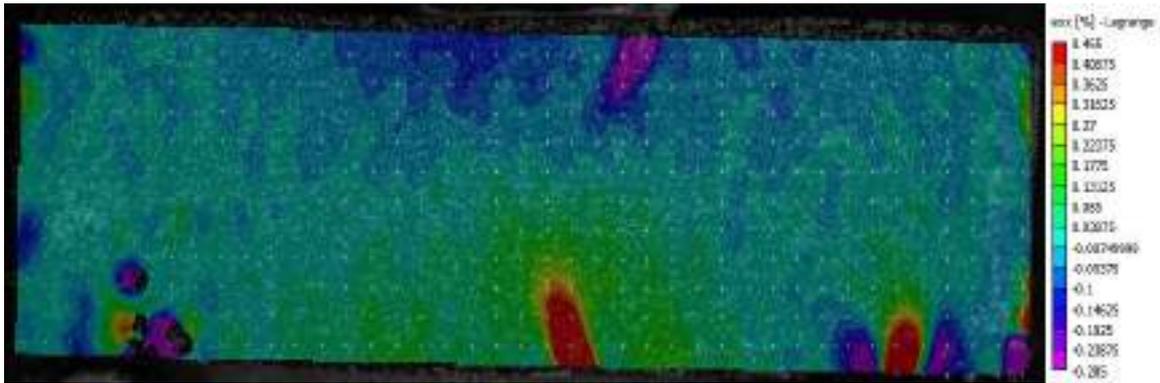
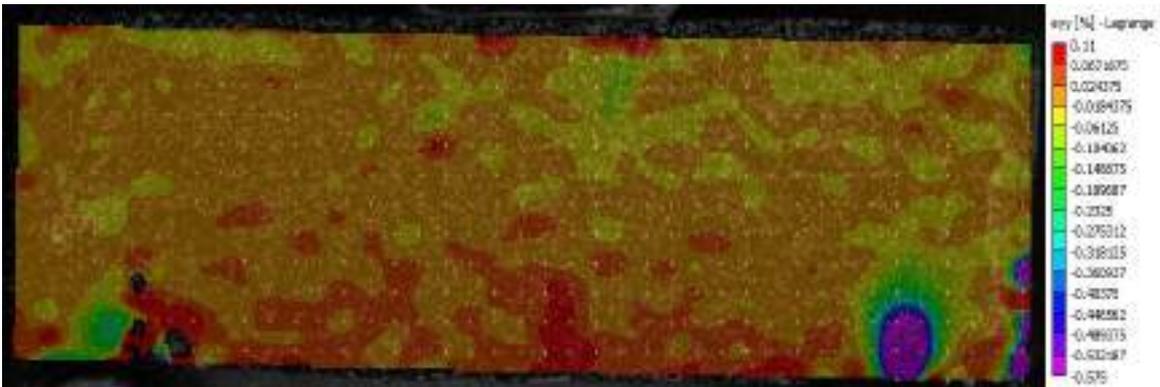


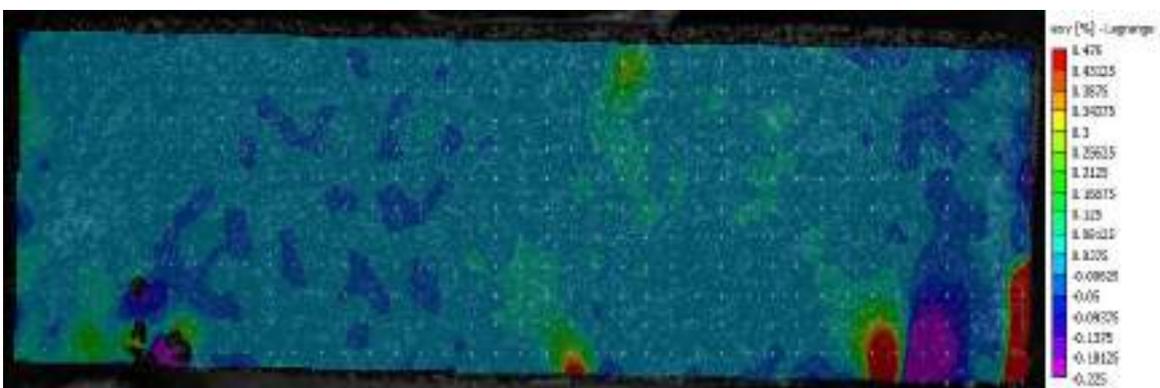
Fig.III.14 La force appliquée en fonction du déplacement- Essai NaCl-P1H



a- Déformation longitudinale ( $\epsilon_{xx}$  %).



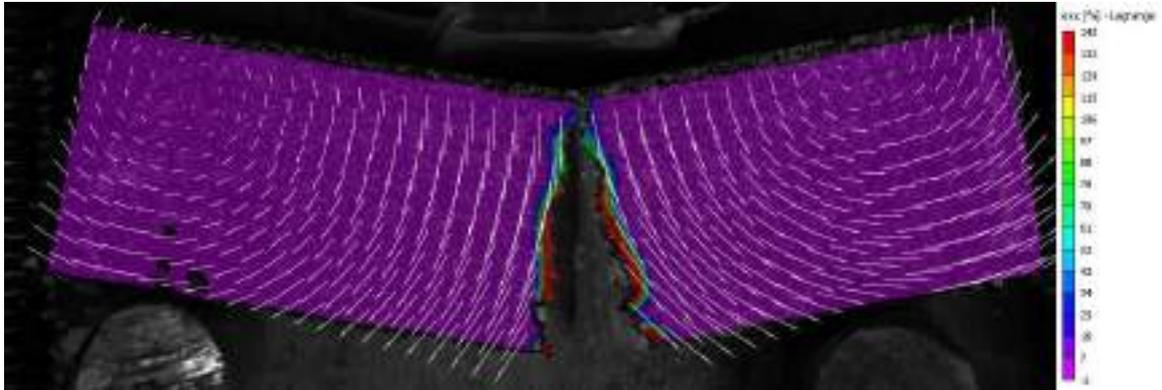
b- Déformation transversale ( $\epsilon_{yy}$  %)



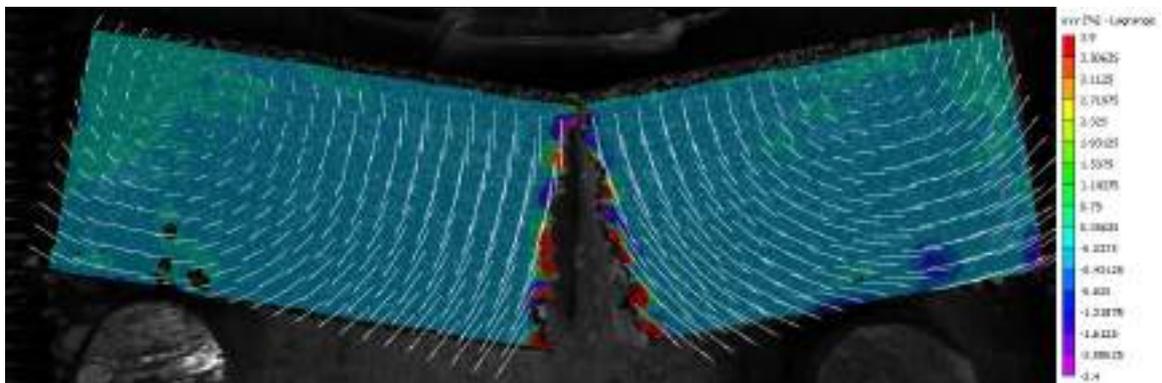
c- Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{xy}$  %)

Fig.III.14 La déformation longitudinale, la déformation transversale et la déformation de cisaillement - Essai NaCl\_P1H-avant la rupture

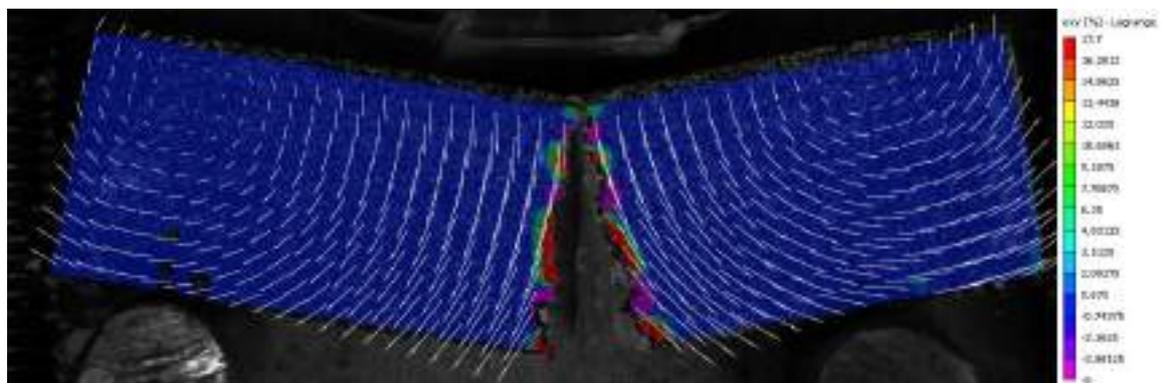
La figure III.15 présente les déformations longitudinales, les déformations transversales et les déformation de cisaillement obtenues de la corrélation d'images et VIC2D pour l'essai flexion (NaCl\_P1H), au moment de la rupture.



a- Déformation longitudinale ( $\epsilon_{xx}$ %).



b- Déformation transversale ( $\epsilon_{yy}$  %)



c- Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{xy}$  %)

Fig.III.15 La déformation longitudinale, la déformation transversale et la déformation de cisaillement - Essai NaCl\_P1H-au moment de la rupture

La figure III.16 présente la force appliquée sur une poutre de kaolin soumise aux solutions (KOH(361 MPa), K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (109.3 MPa) et NaCl (37.6 MPa)) en fonction du déplacement.

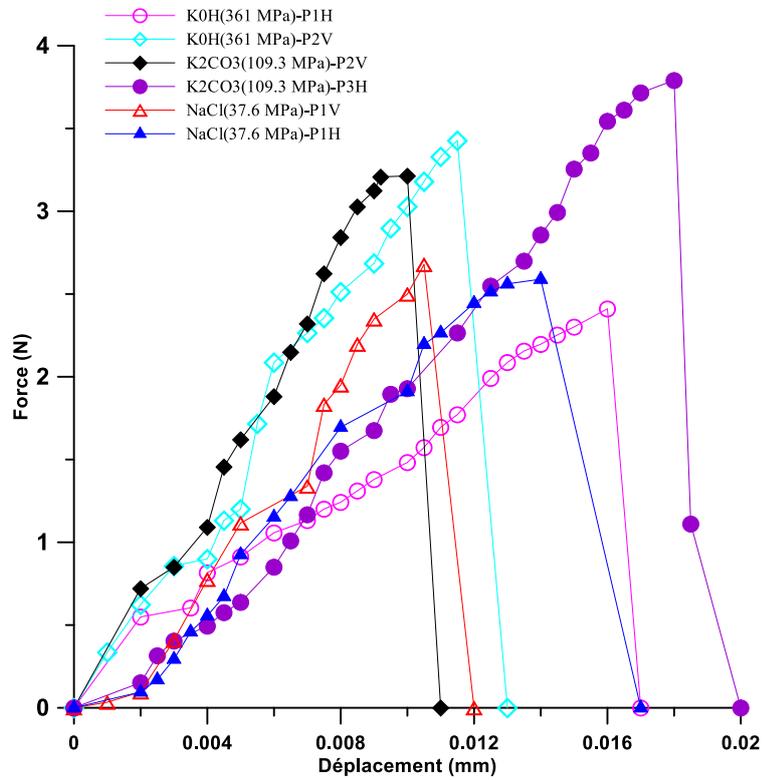


Fig. III.16 La force en fonction du déplacement- Essais flexion(KOH-P1H,KOH-P2V, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-P2V, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-P3H, NaCl-P1H et NaCl-P1V)

## Chapitre 4. Analyse de l'hétérogénéité du matériau en fonction du chemin hydrique (dessiccation libre)

### 4.1. Objectif

Etudier expérimentalement les déformations (Horizontales, verticales, volumiques et déformation de la retraits) et la succion locale et la distribution de succion locale en argiles de synthèse (Kaolin K13) initialement saturé par réaliser des essai des dessiccation libre et corrélation d'image avec le logiciel (( VIC 2D )).

### 4.2. Etude des déformations volumiques globales

#### 4.2.1. Préparation des échantillons et réalisation des essais de dessiccation

Nous mélangeons la poudre de Kaolin (K13) avec de l'eau à une teneur en eau égale à 1,2 fois sa limite de liquidité ( $W=1.2 WL$ ), puis le mélange poudre-eau est malaxé à l'aide d'un malaxeur pendant 10 minutes afin d'obtenir une boue homogène. La boue est ensuite versée dans une bassine puis protégée par un film plastique et du papier aluminium et laissée au repos pendant 24 heures pour une meilleure homogénéité de la teneur en eau.

Nous avons réalisé des essais dessiccation libre en utilisant différents Supports :

- Essais dessiccation libre avec support de téflon (FD2) (réalisé par IGHIL AMEUR).
- Essais dessiccation libre avec support de PTFE (FD5)
- Essais dessiccation libre avec support de Papier abrasif (FD6)

Après avoir préparé la boue, nous avons préparé un échantillon ses dimensions sont de l'ordre de 190 mm de longueur, 130 mm de largeur et 3 mm de hauteur. Nous faisons du mouchetis (peinture mouchetée noire) pour exactitude de la corrélation.



a. Support de téflon

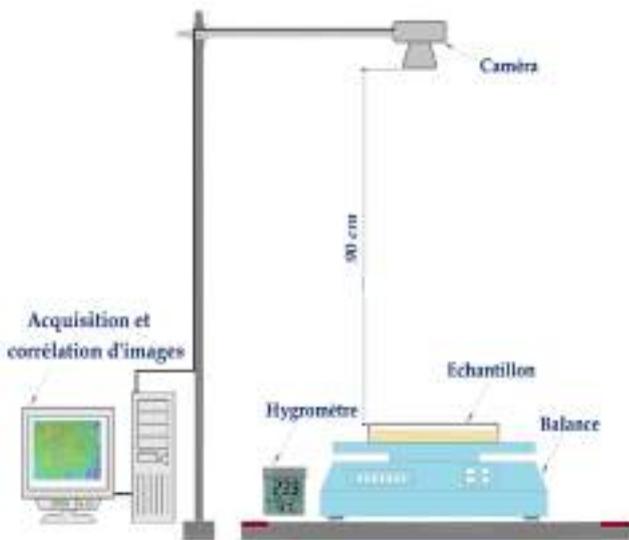


b. Support PTFE



c. Support Papier abrasive

Fig.IV.1 Les supports (Téflon, PTFE et Papier abrasif) utilisés pour réaliser les essais dessiccation libre



a. Dispositif expérimental (Dessiccation libre)

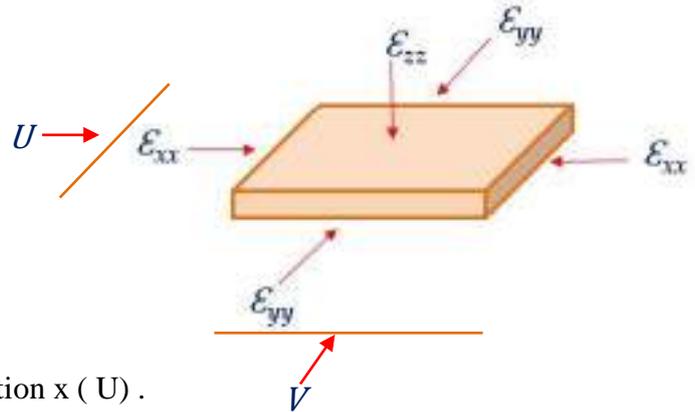


b. Traitement des données

Fig.IV.2 Dispositif expérimental utilisés pour réaliser les essais dessiccation.

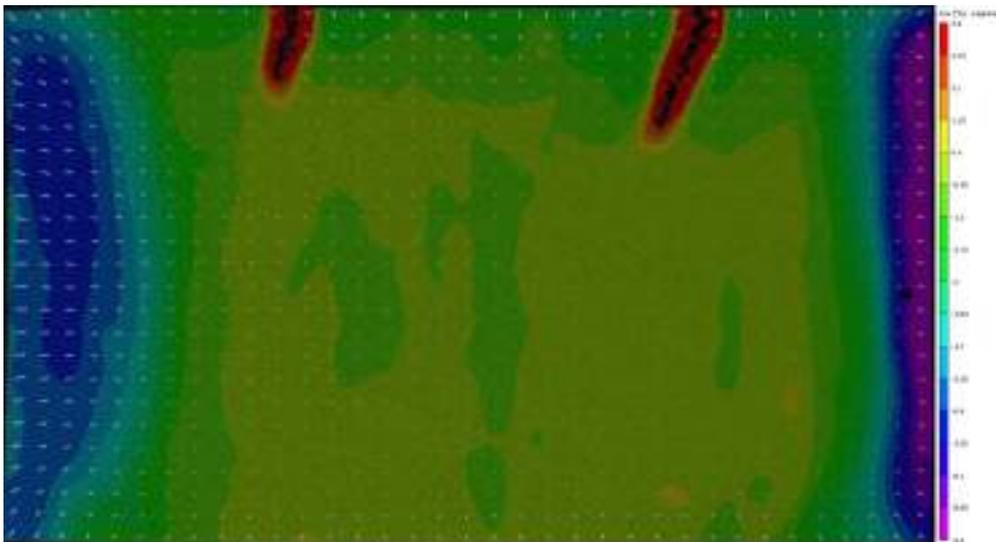
### 4.2.2. Résultats

De la corrélation d'image on a obtenu :

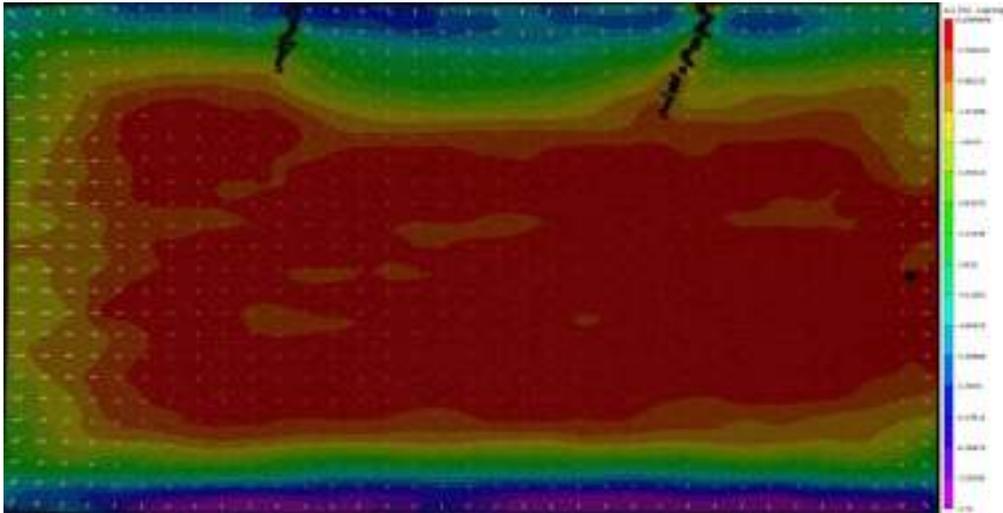


- Déplacement longitudinal, à la direction x ( U ) .
- Déplacement transversale, à la direction y ( V ).
- Les déformations longitudinales locales, les déformations transversales locales et les déformation de cisaillement locales ( $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$  et  $\epsilon_{xy}$ ).
- Les déformations principales majeure et les déformations principales mineur ( $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ ).

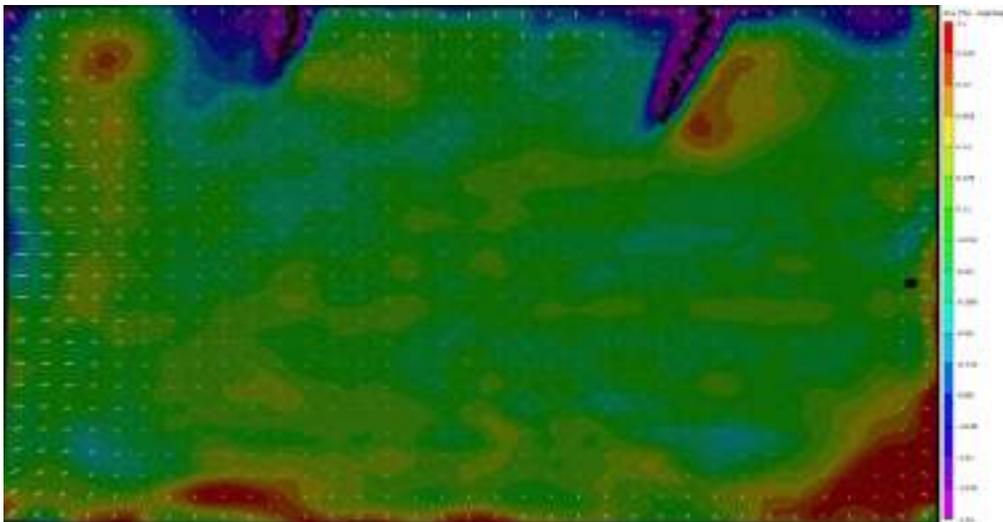
Le figure IV.3 présente les corrélation d'images pour l'essai dessiccation libre avec support PTFE (FD5) au temps 13h et à la teneur en eau 30.5 % .



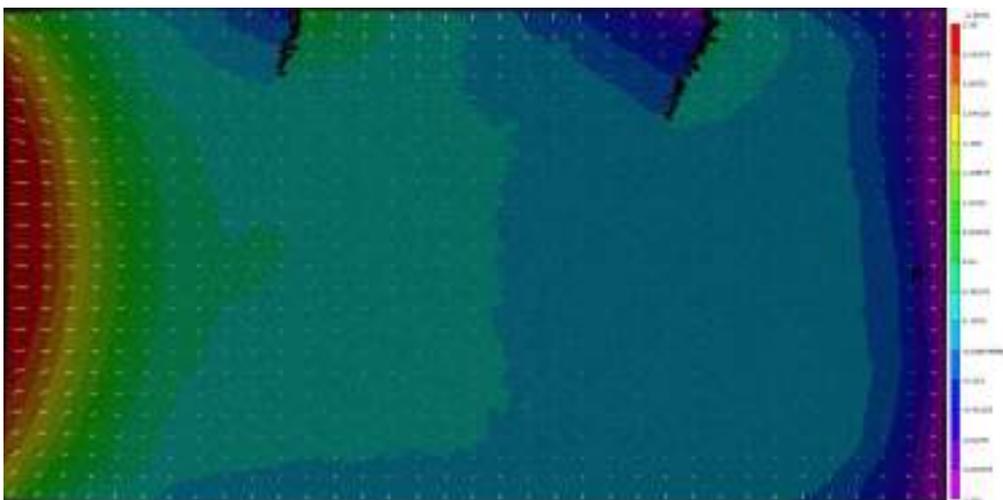
a- Déformation longitudinale( $\epsilon_{xx}$  %)



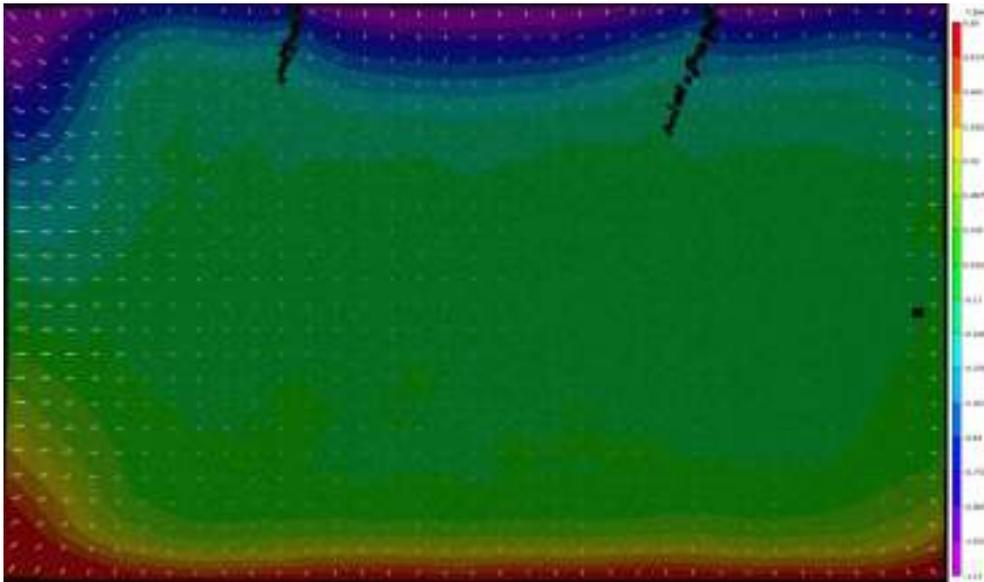
b- Déformation transversale ( $\epsilon_{yy}$  %)



c- Déformation de cisaillement ( $\epsilon_{xy}$  %)



d- Déplacement longitudinal, à la direction x (U mm)



e- Déplacement transversale, à la direction y (V mm)

Fig.IV.3 La déformation longitudinales , la déformation transversale, la déformation de cisaillement, le déplacement longitudinal et le déplacement transversale pour essai dessiccation libre avec support PTFE (FD5)

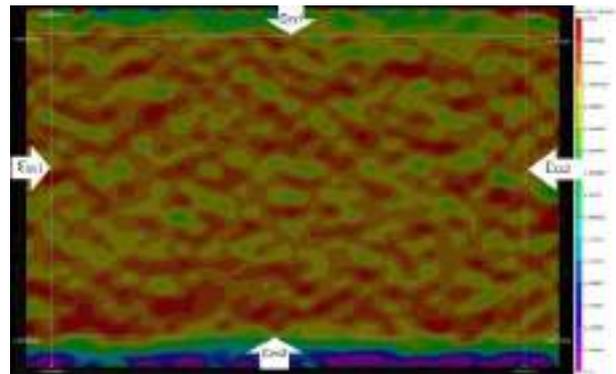
De la figure IV.3, nous constatons que les déformations longitudinales positives sont entre 0.443 % et 5.1 % distribué au milieu de l'échantillon et la déformation positive maximale concentrée au deux côtés de la fissure, les déformations longitudinales négatives sont entre -0.487 % et -9.8 % distribué aux bords de l'échantillon et la déformation négative maximale concentrée aux bords latérales. La déformation transversale positive est 0.2 % distribué au milieu de l'échantillon, Les déformations transversales négatives sont entre -0.3 % et -7.8 % distribué au tout l'échantillon et la déformation négative maximale concentrée au bord supérieur et au bord inferieur de l'échantillon. Les déformations de cisaillement positives sont entre 0.1 % et 1.12 %, les déformations de cisaillement négatives sont entre -0.07 % et -1.6 %, la déformation négative maximale concentrée au deux côtés de la fissure. Le déplacement longitudinal positif est entre 0.192 mm et 2.28 mm, le déplacement positif maximal concentré au bord gauche de l'échantillon et diminuer vers le centre. Le déplacement longitudinal négatif est entre -0.016 mm et -1.06 mm, le déplacement négatif maximal concentré au bord

droit de l'échantillon et diminuer vers le centre. Le déplacement transversal positif est entre 0.025 mm et 0.97 mm, le déplacement positif maximal concentré au bord inférieur de l'échantillon et diminuer vers le centre, le déplacement transversal négatif est entre -0.11 mm et -1.19 mm, le déplacement négatif maximal concentré au bord supérieur de l'échantillon et diminuer vers le centre.

Nous estimons les déformations horizontales longitudinales et transversales ( $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ) globale à partir des déformations ( $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ) locale :

$$\epsilon_{xx}^{globale} = \epsilon_{xx1}^{locale} + \epsilon_{xx2}^{locale}$$

$$\epsilon_{yy}^{globale} = \epsilon_{yy1, moy}^{locale} + \epsilon_{yy2}^{locale}$$



Et mesurer expérimentalement la teneur en eau de laquelle on peut estimer l'indice des vides à partir des résultats de Wei (2014) et Indarto (1991) dans Taibi (1994).

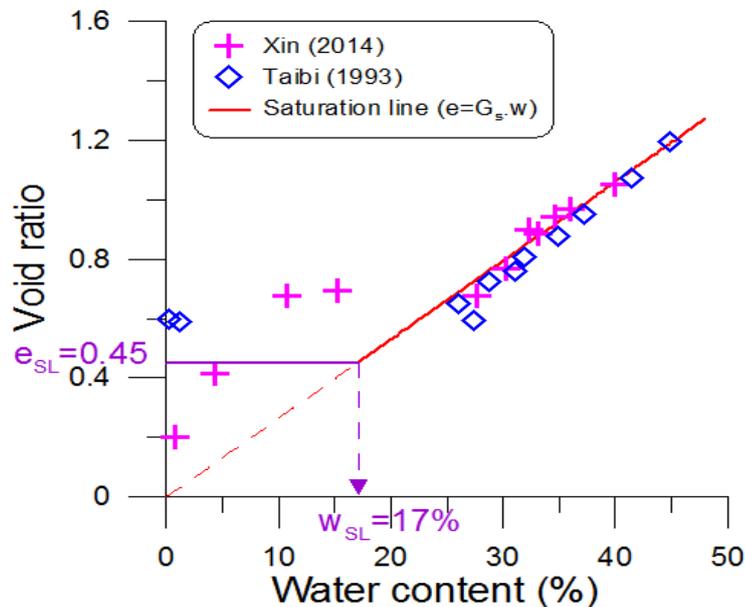


Fig.IV.4 La teneur en eau en fonction de l'indice des vides  
(les résultats expérimentaux de Wei (2014) et Indarto (1991) dans Taibi (1994))

Les déformations volumique ( $\varepsilon_v$ ) et les déformations verticales ( $\varepsilon_{zz}$ ) peuvent se calculer à partir des relations suivantes :

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_v - (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})$$

La figure IV.5 présente la teneur en eau globale en fonction du temps, la figure IV.6 montre la humidité relative en fonction du temps, pour les essais de dessiccation libre.

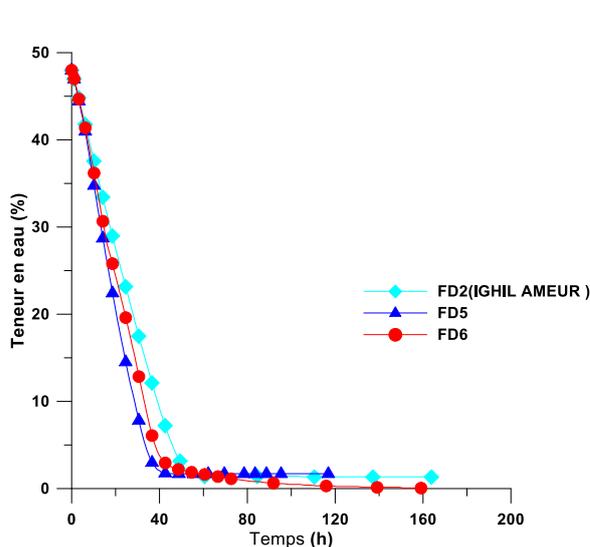


Fig.IV.5 Teneur en eau en fonction de temps

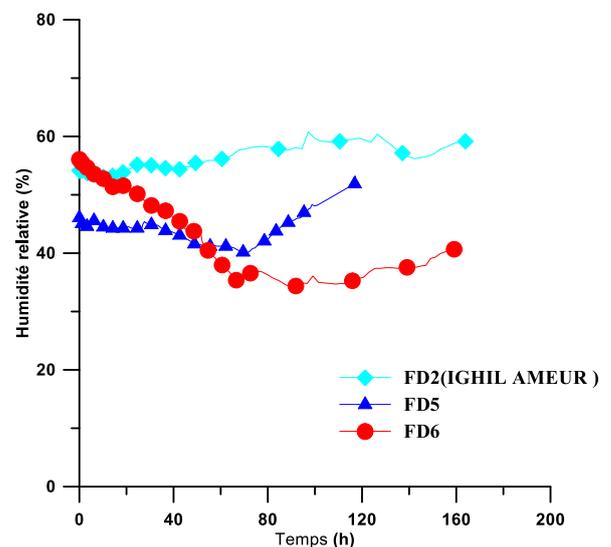


Fig.IV.6 Humidité relative en fonction de temps

La figure IV.7 présente les déformations volumiques globales en fonction du temps, la figure IV.8 montre les déformations volumiques globales en fonction de la teneur en eau pour des essais de dessiccation libre, nous constatons que les déformations volumiques s'accroissent avec la diminution de la teneur en eau jusqu'à ce que la teneur en eau soit arrivée à la limite de retrait, ensuite, les déformations deviennent stables.

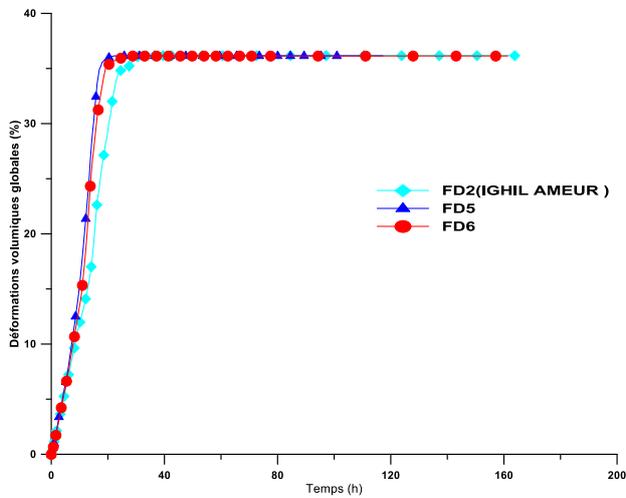


Fig.IV.7 Les déformations volumiques globales en fonction du temps

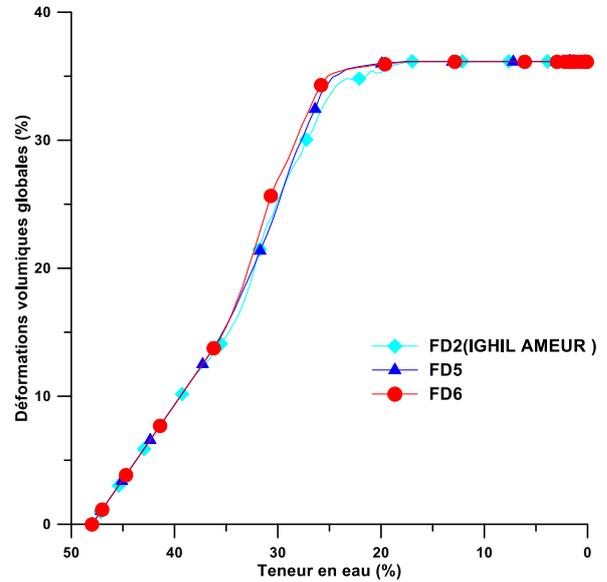


Fig.IV.8 Les déformations volumiques globales en fonction de la teneur en eau

La figure IV.9 présente les déformations globales horizontales et les déformations globales verticales pour les essais dessiccation libre (FD2, FD5 et FD6) en fonction du temps et la figure IV.10 montre les déformations globales horizontales et les déformations globales verticales pour les essais dessiccation libre (FD2, FD5 et FD6) en fonction de la teneur en eau.

Nous constatons qu'il y a une anisotropie entre les déformations longitudinales et les déformations transversales, et la dernière plus importante que l'anisotropie entre les déformations horizontales.

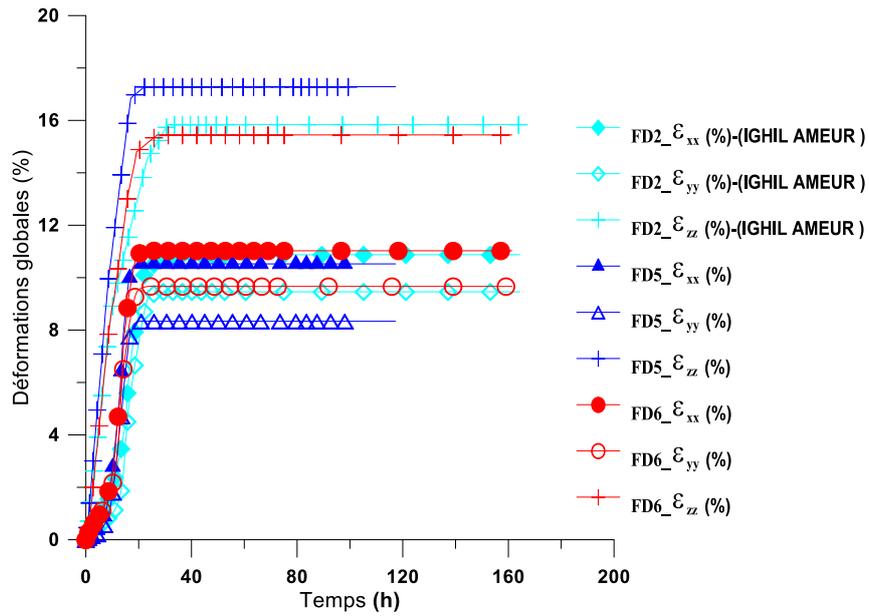


Fig. IV.9 Les déformations globales horizontales et les déformations globales verticales pour les essais dessiccation libre (FD2-IGHIL AMEUR, FD5 et FD6) en fonction du temps

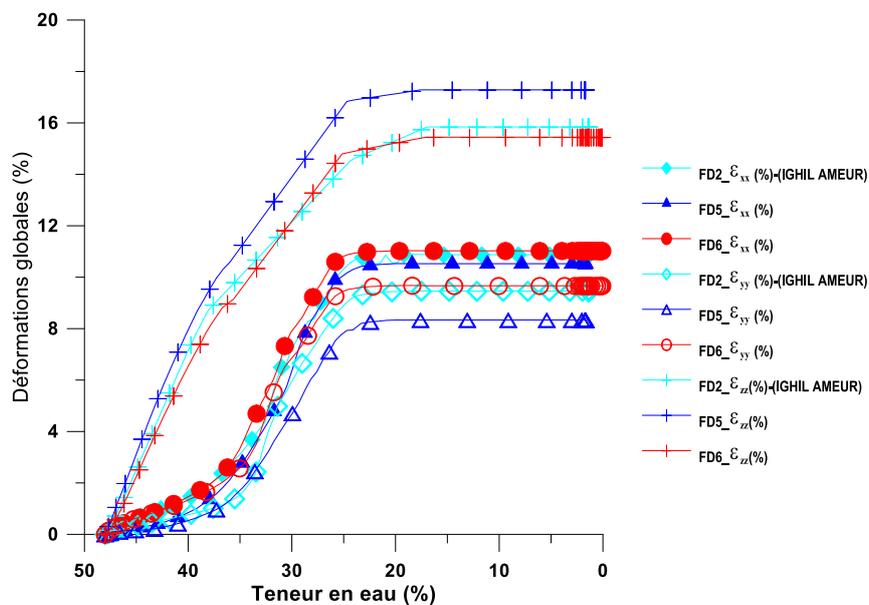


Fig. IV.10 Les déformations globales horizontales et les déformations globales verticales pour les essais dessiccation libre (FD2-IGHIL AMEUR, FD5 et FD6) en fonction de la teneur en eau.

### 4.3. Les déformations volumiques et la succion ( locale )

#### 4.3.1 Théorie et les calculs

Nous supposons que la teneur en eau locale est égale la teneur en eau globale, et ça nous permet de estimer l'indice des vides locaux, les déformations volumique (  $\varepsilon_v$  ) locales et les déformations verticales (  $\varepsilon_{zz}$  ) peuvent sont Calculé des relations suivants :

$$\varepsilon_v^{loc.}(\%) = \frac{\Delta e^{loc.}}{(1 + e_0^{loc.})} * 100$$

$$\varepsilon_{zz}^{loc.} = \varepsilon_v^{loc.} - (\varepsilon_{xx}^{loc.} + \varepsilon_{yy}^{loc.})$$

Ou nous somme obtenus les valeurs des déformations (  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  ) locaux de la corrélation d'image.

L'équation utiliser pour calculer la succion locale s'écrit comme suit :

$$s = -\gamma_w \cdot \frac{R \cdot T}{M_w} \cdot \ln Hr$$

Avec :

$\gamma_w$  = Poids volumique de l'eau ( 1000 kg/m<sup>3</sup> ).

R = Constante des gaz ( 18.016  $\frac{J}{mol \cdot k}$  ).

T = Température (k).

$M_w$  = Masse molaire de l'eau ( 18.016 \*10<sup>-3</sup> g/mol).

Hr = Humidité relative (%).

### 4.3.2. Résultats

Nous avons calculé les déformations volumiques locales et la succion locale dans trois zones différents sur une ligne horizontale et une ligne verticale dans chaque zone.

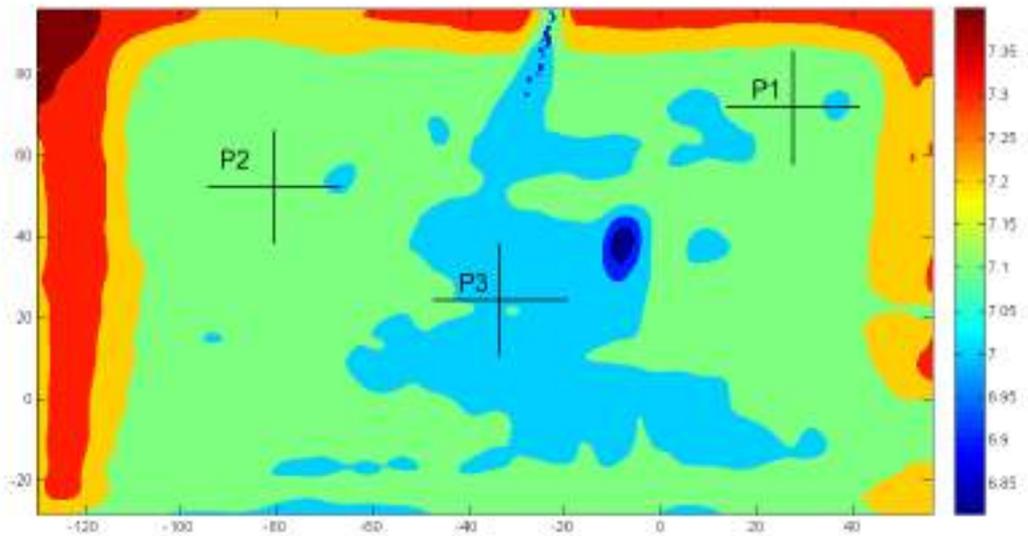


Fig.IV.11 Les zones dans lesquelles les déformations volumiques locales la succion locale sont mesurées

#### 4.3.2.1. Les déformations volumiques locales

Le figure IV.12 présente les déformations volumiques locales dans les trois zones et dans les deux directions(horizontale et verticale) en fonction du temps pour l'essai dessiccation libre avec support de Papier abrasif (FD6). Nous constatons que les déformations volumiques locales sont homogène dans les trois zones

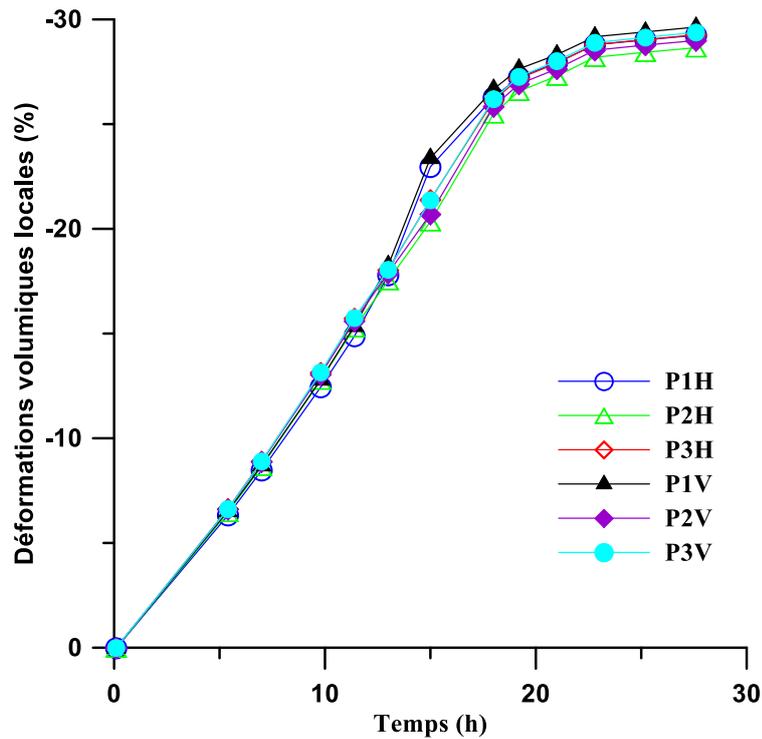


Fig. IV.12 Les déformations volumiques locales en fonction du temps  
Essai dessiccation libre avec support de Papier abrasif (FD6)

Le figure IV.13 présente les déformations volumiques locales pour les essais dessiccation libre ( avec support de téflon (FD2), avec support de PTFE(FD5) et avec support de Papier abrasif (FD6))du début des essais à la moment de arriver à la limite de retrait où les déformations volumiques devient stables. L'essai dessiccation libre avec support de téflon est arrivé à la limite de retrait à 31h, l'essai dessiccation libre avec support de PTFE est arrivé à la limite de retrait à 22.8h, l'essai dessiccation libre avec support de Papier abrasif est arrivé à la limite de retrait à 27.6h,

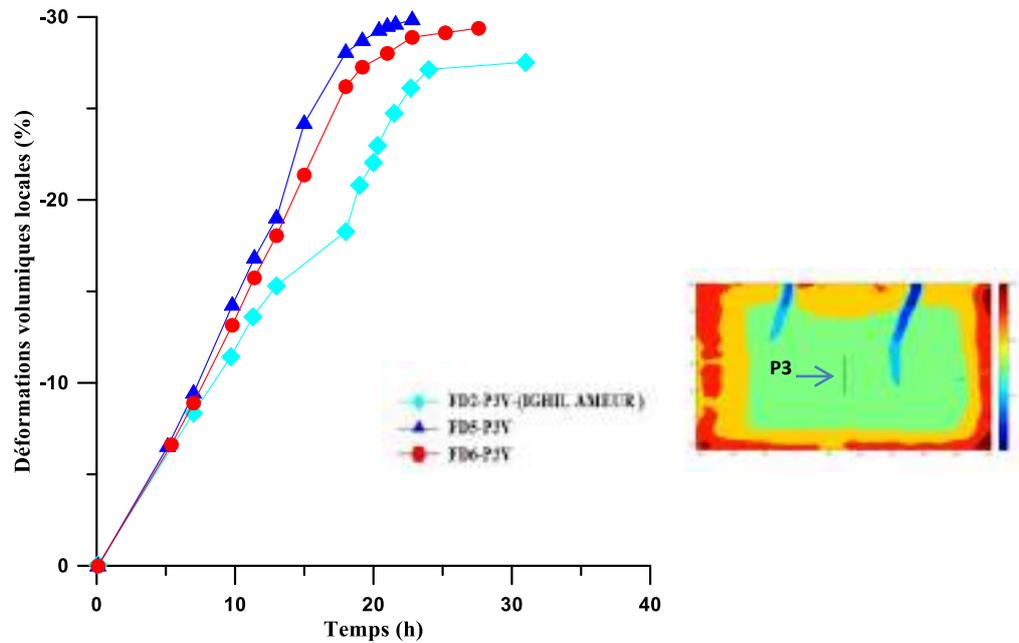


Fig. IV.13 Les déformations volumiques locales en fonction de temps

Essais dessiccation libre (FD2(IGHIL AMEUR), FD5 ET FD6)

#### 4.3.2.2. Les déformations verticales locales ( $\epsilon_{zz}^{loc.}$ )

Nous avons calculé les déformations verticales locales dans dix zones différents et nous avons pris les moyenne des résultats.

$$\epsilon_{xx}^{locale} = \text{moyenne}(\epsilon_{xx1,moy}^{locale} + \epsilon_{xx2,moy}^{locale})$$

$$\epsilon_{yy}^{locale} = \text{moyenne}(\epsilon_{yy1,moy}^{locale} + \epsilon_{yy2,moy}^{locale})$$

$$\epsilon_{zz}^{locale} = \epsilon_v^{locale} - (\epsilon_{xx}^{locale} + \epsilon_{yy}^{locale})$$

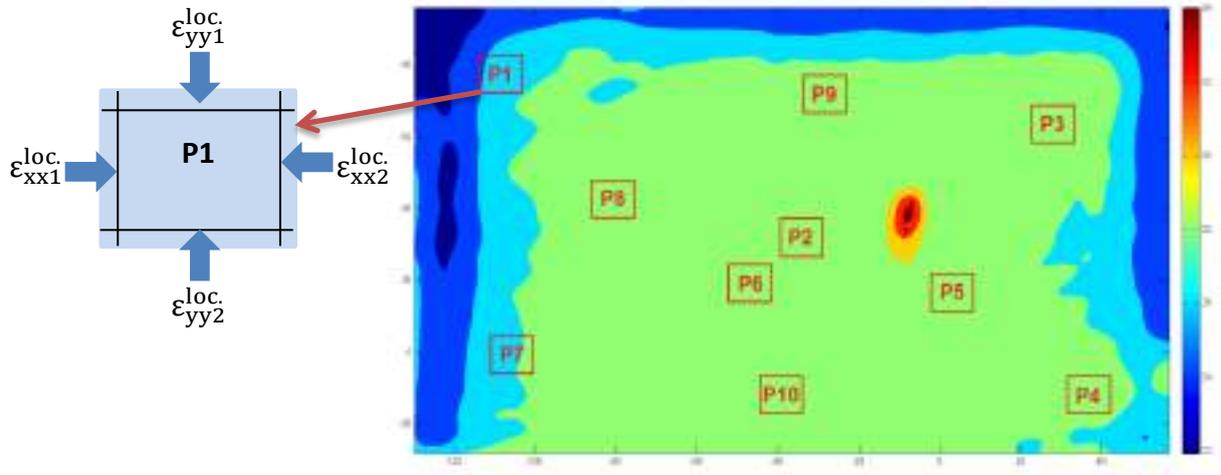


Fig.IV.14 Les zones sur lesquelles les déformations verticales ont été mesurée.

Le figure IV.15 présente les déformations verticales locales en fonction de la teneur en eau pour l'essai dessiccation libre avec support de PTFE (FD5)

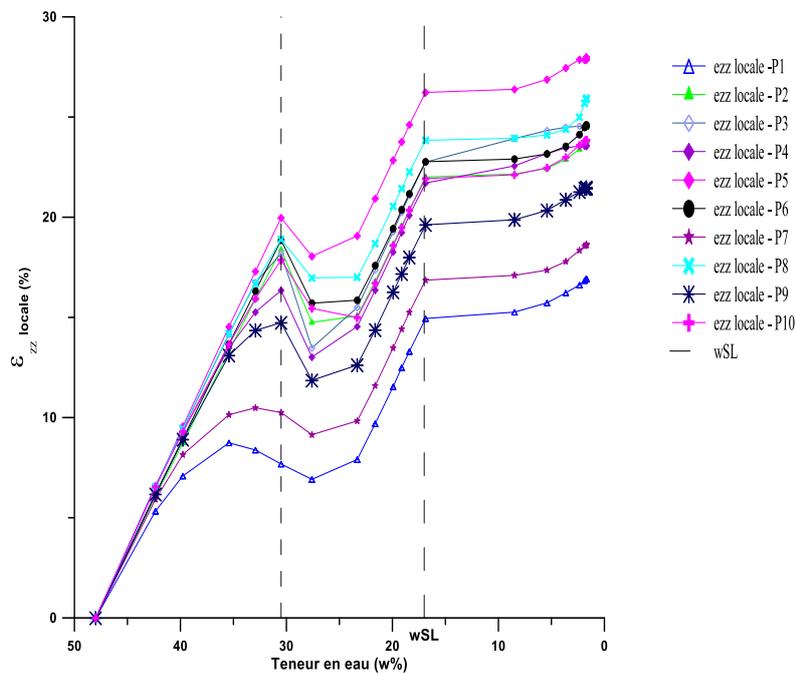


Fig.IV.15 Les déformations verticales locales(%) en fonction de la teneur en eau (%)

(Essai dessiccation libre avec support PTFE)

Dans figure IV. 15 nous constatons que les valeurs des déformations verticales chutent entre la teneur en eau (30.5%) et la teneur en eau (17 % wSL) ce qui est physiquement impossible, donc nous allons modifier les valeurs selon les résultats expérimentaux de Xin WEI (2014).

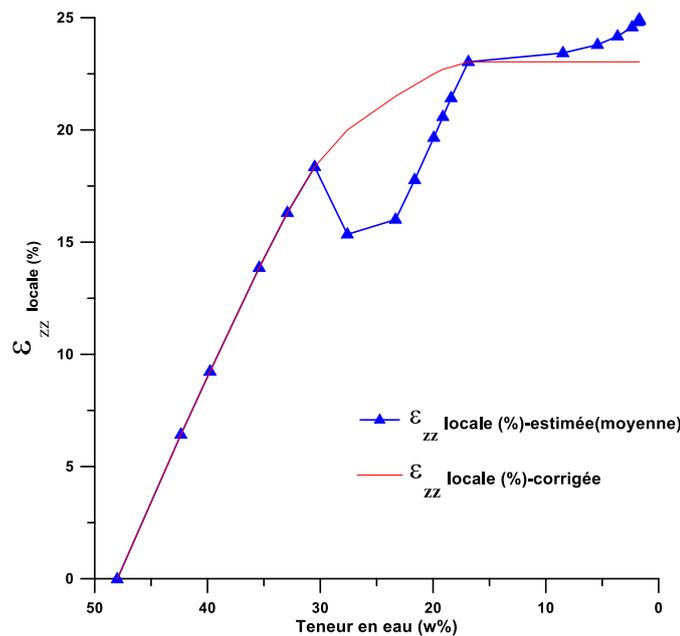


Fig.IV.15 Les déformations verticales locales (%) estimée moyenne et Les déformations verticales locales (%) corrigée en fonction de la teneur en eau (%) (Essai dessiccation libre avec support PTFE(FD5))

La figure IV.16 présente les déformation verticales locales moyenne corrigée en fonction du temps pour l'essais dessiccation libre avec support de téflon (FD2), l'essai dessiccation libre avec support de PTFE et l'essai dessiccation libre avec support de Papier abrasif.

La figure IV.17 montre les déformation verticales locales moyenne corrigée en fonction de la teneur en eau pour l'essais dessiccation libre avec support de téflon (FD2), l'essai dessiccation libre avec support de PTFE et l'essai dessiccation libre avec support de Papier abrasif.

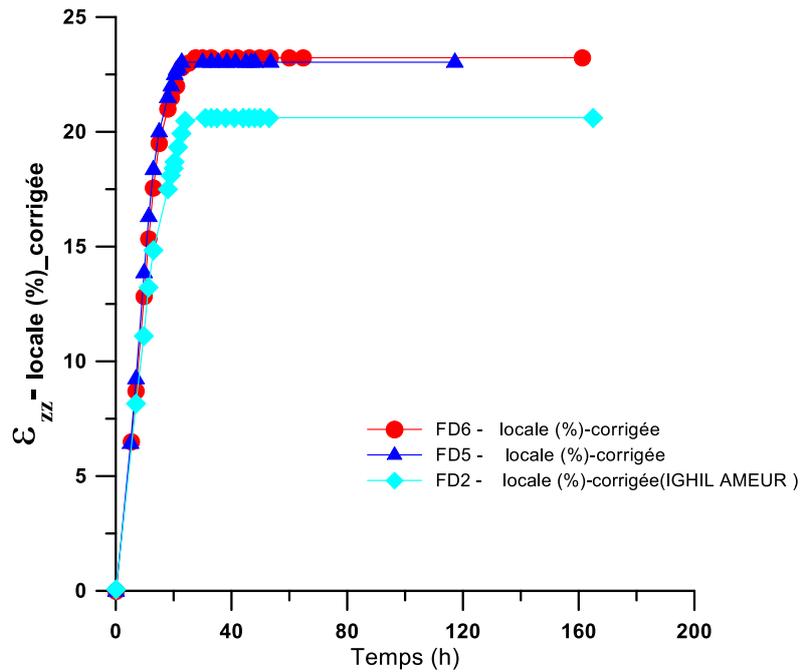


Fig. IV.16 montre les déformation verticales locales moyenne corrigée en fonction du temps – Essai (FD2, FD5 et FD6)

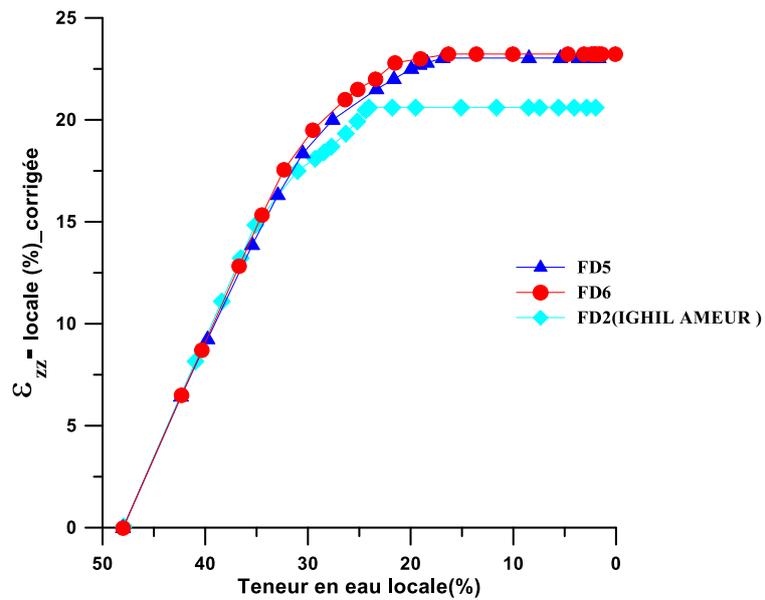


Fig. IV.17 montre les déformation verticales locales moyenne corrigée en fonction de la teneur en eau  
Essai (FD2, FD5 et FD6)

### 4.3.2.3. La succion locale

Le figure IV.18 présente la succion locale en fonction du temps, le figure IV.19 montre la succion locale en fonction de la teneur en eau pour l'essai dessiccation libre avec support de téflon (FD2) et l'essai dessiccation libre avec support de PTFE (FD5). Nous constatons que la succion locale inversement proportionnelle à la teneur en eau.

Le figure IV.20 montre la distribution de la succion locale pour l'essai dessiccation libre avec support de PTFE (FD5). Nous constatons que la succion locale maximal concentré au bord droit de l'échantillon et diminuer vers le centre.

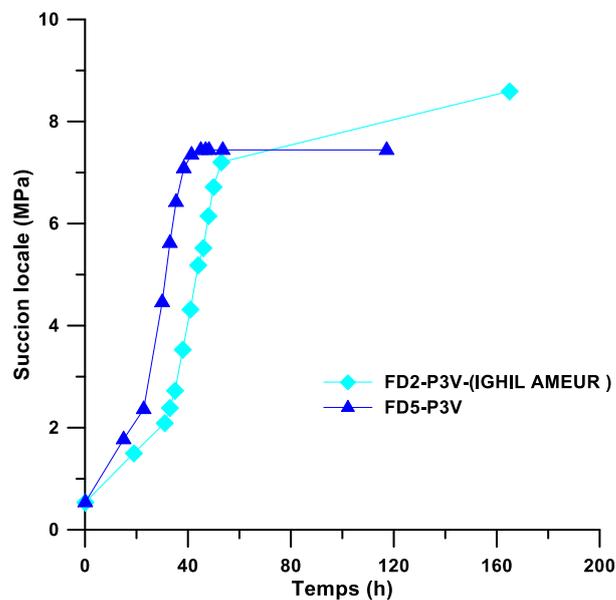
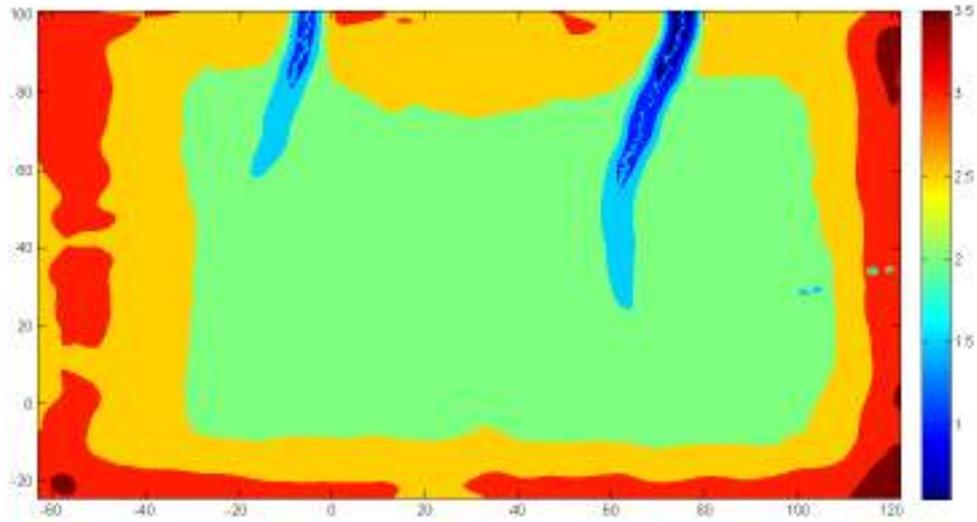
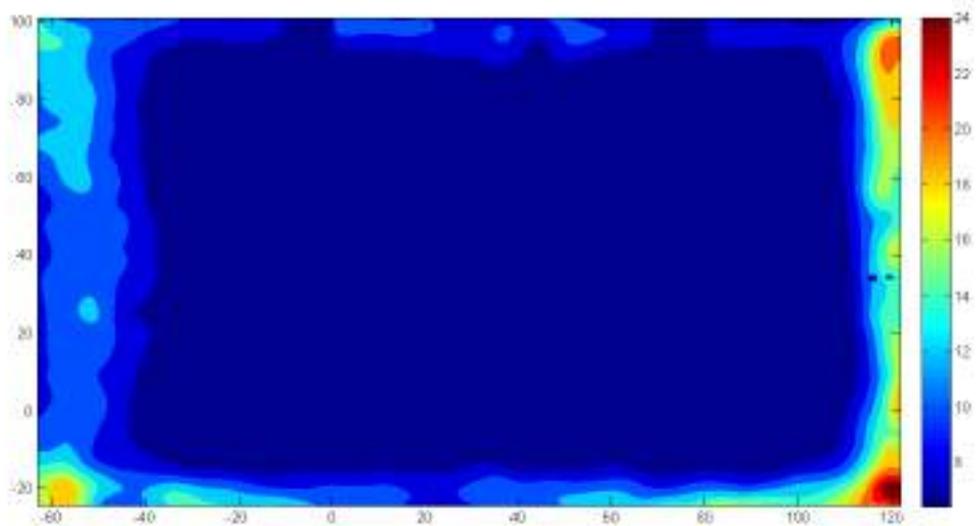


Fig. IV.18 La succion locale en fonction du temps – Essais FD2 et FD5



a- La distribution de la succion locale- Essai dessiccation libre (FD5).  
t : 22.8h  
w : 16.869% (wSL)



b- La distribution de la succion locale- Essai dessiccation libre (FD5).  
t : 117.23h  
w : 1.7% (la fin de l'essai)

Fig. IV.20 La distribution de la succion locale- Essai dessiccation libre (FD5).

#### 4.3.2.4. Les déformations de retrait locale ( $\varepsilon_r^{loc.}$ )

La déformation de retrait locale dépend de la déformation volumique locale qui intervient sous dessiccation.

(Péron et al 2009, Auvray et al 2014 et Wei et al 2016) ont trouvé une anisotropie entre les déformations horizontales et les déformations verticales. Elle est caractérisée par un rapport d'anisotropie ( $\eta$ ) définie par le rapport entre la déformation verticale ( $\varepsilon_{zz}$ ) et la déformation horizontale ( $\varepsilon_h$ ) :

$$\eta = \frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_h}$$

$\varepsilon_h$  est la moyenne entre les déformations longitudinale ( $\varepsilon_{xx}$ ) et transversale ( $\varepsilon_{yy}$ )

$$\varepsilon_h = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2}$$

L'équation reliant la déformation de retrait à la déformation volumique peut s'écrire en fonction de la déformation horizontale comme suit :

$$\begin{aligned} \varepsilon_v^{loc.} &= \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \\ &= (2 + \eta)\varepsilon_h \end{aligned}$$

$$\varepsilon_r^{loc.} = \frac{1}{2 + \eta} \cdot \varepsilon_v^{loc.}$$

Les résultats sont présentés sur la figure IV.21 en fonction du temps (a) et de la teneur en eau locale (b)

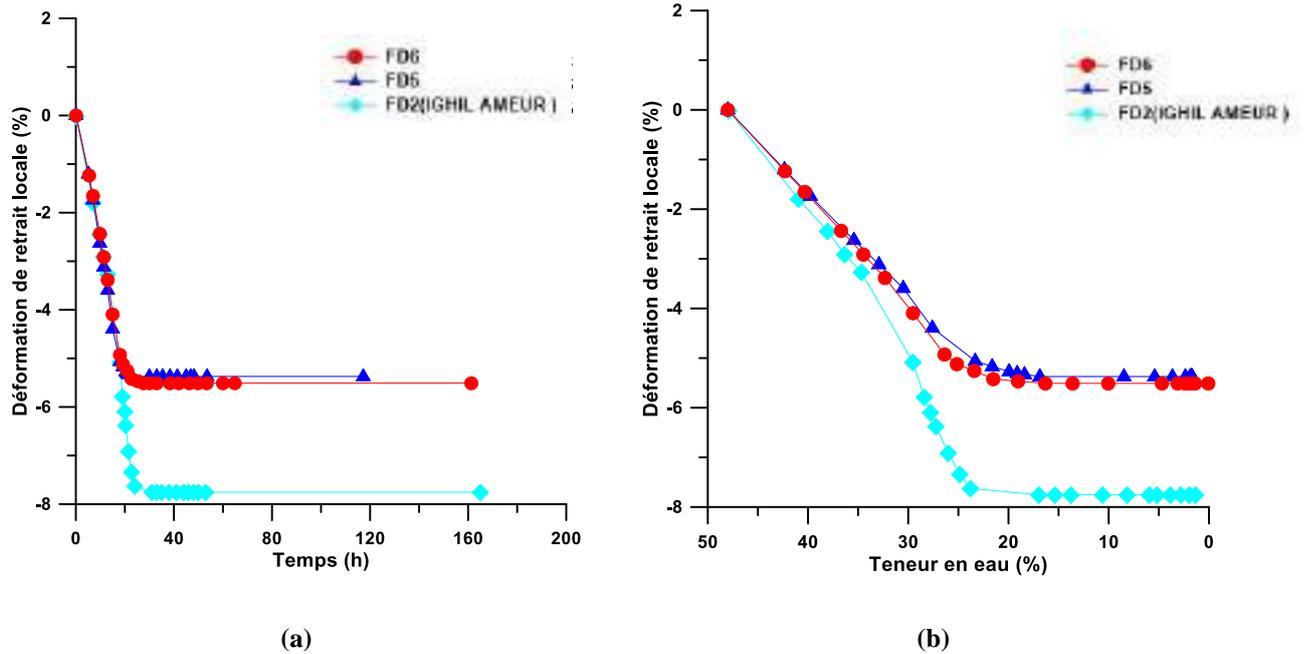


Fig. IV.21 La déformation de retrait locale sur chemin hydrique libre en fonction de  
(a) temps, (b) teneur en eau

#### 4.4. Analyse des fissures

Pendant l'évolution de la succion, des déformations traction et des déformations compression ont apparu dans l'échantillon. Nous avons analysé les zones des fissures par logiciel MATLAB, programme réalisé par Xin (2014) pour identifier les zones des déformations traction et les zones des déformations compression .

Le figure IV.22 présente l'analyse d'une zone contient fissure, nous constatons qu'il y a zone rouge aux deux côtes de la fissure, cette zone représente les déformations de traction, d'autre part, il y a zone bleu, cette zone représente les déformations de compression.

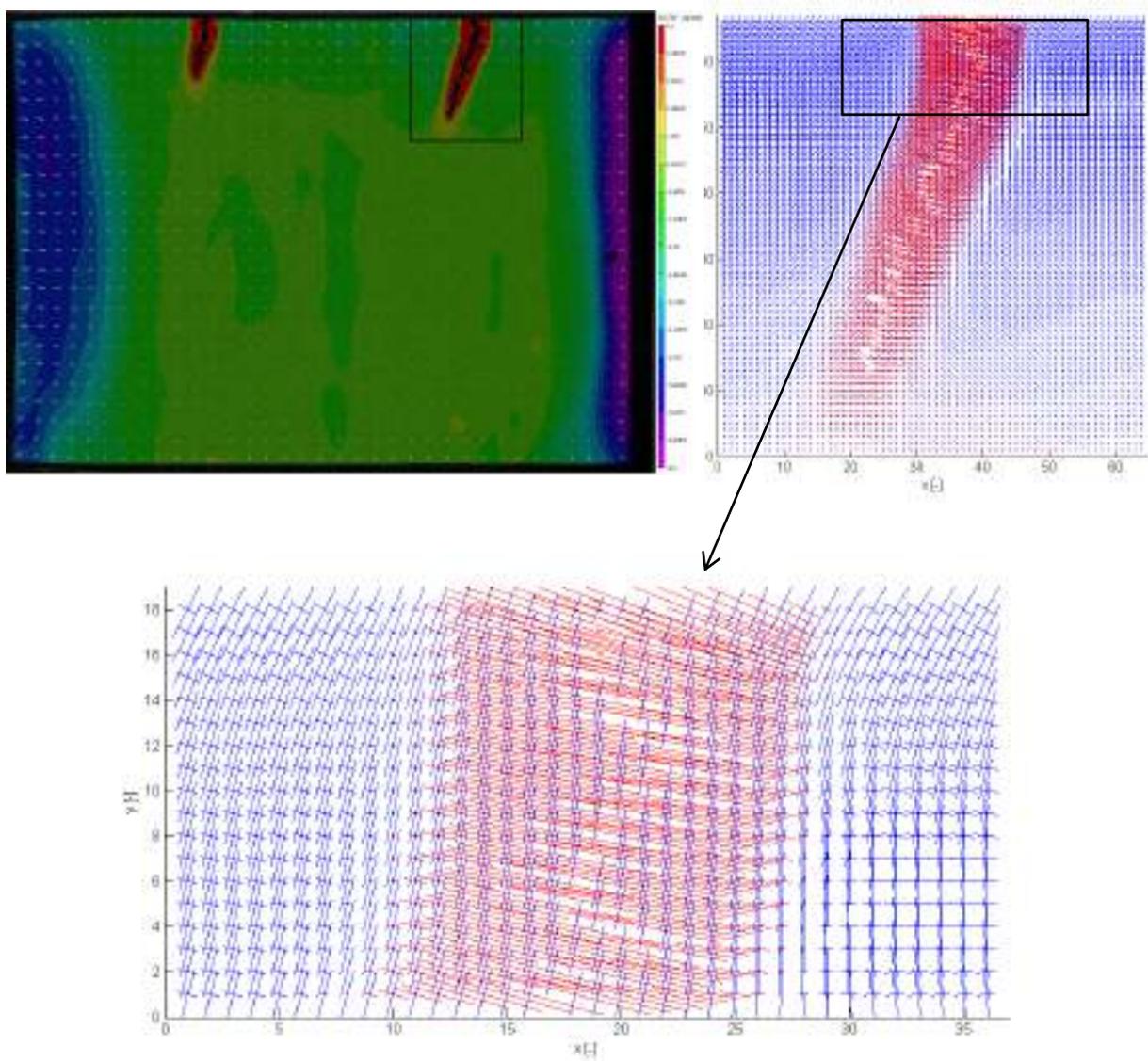


Fig. IV.22 Détection du mode de fissuration par les directions principales sous matlab.

Essai dessiccation libre avec support de PTFE (FD5)

## Conclusion générale

Dans la partie étude expérimentale à la flexion, des essais de flexion ont été réalisés sur des échantillons de Kaolin K13, initialement saturé, sous différentes succions soumises à la solution (KOH (361 MPa), K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ( 109.3 MPa) ou NaCl (37.6 MPa)). Nous constatons que le Kaolin est un matériel très ductile, ses courbes de force en fonction du déplacement tolère une très mince partie plastique. Nous remarquons aussi que lors de l'application d'une effort de flexion sur les poutres, nous constatons l'apparition des déformations de traction concentrées principalement au milieu ou la rupture se produit à cause d'eux.

Dans la partie analyse de l'hétérogénéité du matériau en fonction du chemin hydrique (dessiccation libre), des essais de séchage ont été réalisés sur un échantillon de Kaolin K13, initialement saturé, par la dessiccation libre et contrôlée. La limite de retrait  $w_{SL} = 17\%$  et l'indice des vides de retrait  $e_{SL} = 0.45$  (Wei (2014) et Indarto ( 1991) dans Taibi (1994)). La corrélation d'images numériques a permis d'identifier et analyser les mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures.

Des courbes les déformations (%) en fonction de la teneur en eau(%), nous avons constaté que les déformations sont inversement proportionnelle à la teneur en eau jusqu'à la limite de retrait et après les déformations deviennent stables, qu'il y a une anisotropie entre la direction verticale et horizontale. Cependant elle est relativement moins importante entre les deux déformations horizontales. Enfin, que le déplacement dirigé des bords vers le centre de l'échantillon.

Les déformations horizontales locale ( $\epsilon_{xx}$  et  $\epsilon_{yy}$ ) ont été obtenue de la corrélation d'images. Nous avons estimé la déformation verticale locale ( $\epsilon_{zz}$ ) par considère la teneur en eau globale de l'échantillon peut être à l'échelle locale, que les déformations volumiques locales sont homogènes, qu'il y a une anisotropie entre la direction verticale et horizontale des déformations et cet anisotropie a été utilisé pour estimer la déformation de retrait, que la succion locale est inversement proportionnel à la teneur en eau locale, que La succion locale dirigé des bords vers le centre de l'échantillon, et enfin que l'analyse des fissures, nous avons constaté que les déformations traction présentent sur les deux côtés de la fissure

## REFERENCES

- PROUDHON, H. (2005). Identification des mécanismes de fissuration dans un alliage d'aluminium
- Kodikara R.K., Barbour S.L. et Fredlund D.G. (2000). Desiccation cracking of soil layers, Proceedings of the Asian Conference in Unsaturated Soils, UNSAT ASIA 2000, Singapore, p 693-698.
- Bazant Z.P., Cedolin L. (1991) Stability of Structures – Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories, Oxford University Press.
- Kodikara J., Barbour S.L., Fredlund D.G. (1999) Changes in clay structure and behavior due to wetting and drying, proceedings of the 8th Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, Hobart, p 179- 186.
- Xin WEI : Étude micro-macro de la fissuration des argiles soumises à la dessiccation. Ecole Centrale Paris (2014).
- Taibi S. (1994) Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative – Etude expérimentale et modélisation, Doctoral dissertation, Ecole Centrale Paris, France.
- H.Peron, L. Laloui, T. Hueckel et L.B. Hu. (2009). Desiccation cracking of soils. Desiccation cracking of soils Failure in multiphase geomaterials, 13, 869-888.
- Indarto Indarto : Transition contre-courant co-courant d'un écoulement de gaz et d'un film liquide en conduite verticale (1991)
- Atmane KATTI : Etude expérimentale des fissurations dans les argiles de Bure et les argiles de synthèses soumises à des chargements statiques en flexion (2012)
- SIBELCO. (2011). Sibelco, sur Sibelco: [www.sibelco.fr](http://www.sibelco.fr) (Site internet)
- Fleureau JM, Kheirbek-Saoud S, Taibi S, Soemitro R (1992) Behaviour of clayey soils on drying- wetting paths. Can Geotech J 30(2)
- Peron H., Delenne J.Y., Laloui L., El Youssoufi M.S., « Discrete element modelling of drying shrinkage and cracking of soils», Computers and Geotechnics 36, 2009.