

# ÉLABORATION D'UN TEST SPÉCIFIQUE POUR LA DÉTERMINATION DU CISAILLEMENT DANS LE BÉTON

**Ridha BOULIFA\*, Mohammed Laïd SAMAI\*\*, Mohammed Tayeb BENHASSINE\*\***

\* Laboratoire de mécanique des sols et des structures. Université Mentouri, Constantine, Algérie

\*\* Département de Génie Civil, Université Mentouri, Route Ain El Bey Constantine 25000, Algérie

Email : re.boulifa@gmail.com

## 1. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Le béton a un comportement complexe difficile à représenter par une seule loi macroscopique homogène. Cette difficulté est liée notamment à la forte hétérogénéité du béton qui est un matériau composite. Selon la direction de la sollicitation par rapport à celle de la fissuration, on distingue trois modes de fissuration (Baron, 1982) :

Mode 1 : le déplacement des lèvres de la fissure est perpendiculaire au plan de propagation.

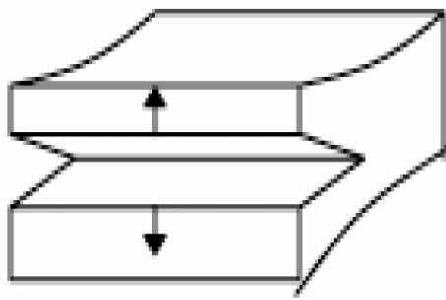
Mode 2 : le déplacement des lèvres de la fissure est dans le plan de propagation et parallèle à la direction de propagation.

Mode 3 : le déplacement des lèvres de la fissure est dans le plan de propagation et il est perpendiculaire à la direction de propagation.

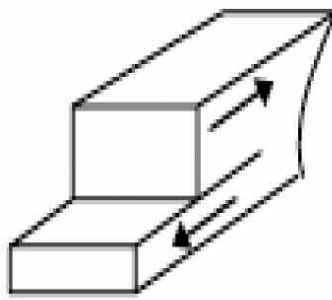
Pour connaître le comportement des éléments structuraux en béton armé en cisaillement, tels les poteaux et les poutres sous une action tangente, il est nécessaire de considérer le mode 2, intervenant soit seul soit en compagnie du mode 1 (mode mixte). En effet, la difficulté majeure réside dans l'élaboration d'un procédé expérimental suffisamment fiable pour bien représenter le comportement en cisaillement du béton et qui soit relativement simple pour qu'il puisse être exploité dans un contexte industriel.

A l'échelle macroscopique, si la composante de glissement est plus forte que la composante d'extension maximale non uniforme au niveau du plan de cisaillement, alors le plan de rupture en cisaillement-compression est contrôlé par l'orientation du plan de cisaillement maximum définie par le champ de compression. Différentes méthodes développées dans ce contexte sont utilisées pour expliquer le mécanisme de transfert du cisaillement. Dans ce cas, la solution la plus proche est celle qui définit le rapport de cisaillement. Ce rapport est un paramètre important influant d'une manière déterminante sur le choix de la méthode de calcul (Wong *et al.* 2007). Les méthodes basées sur le cisaillement direct sont pratiquement applicables au calcul avancé des poutres en béton armé (Loov *et al.* 1994), des structures courbes et des fondations en caisson (Walraven *et al.* 1987).

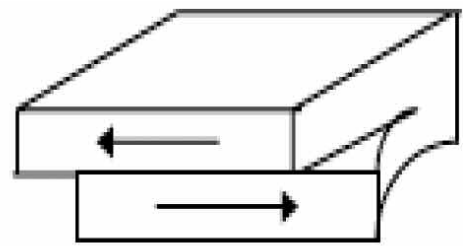
La présente recherche s'intéresse au mécanisme de transfert du cisaillement pour le béton seul par le développement d'un procédé expérimental permettant la détermination de l'influence de l'orientation du plan de rupture par cisaillement sur la relation effort-glissement. L'étude expérimentale se veut une prospection du développement d'une méthode d'essai sur un spécimen en béton où un plan de rupture par cisaillement est créé suite à un



Mode 1: Ouverture (traction)



Mode 2: Cisaillement plan



Mode 3: Cisaillement anti-plan

**Figure 1. Les trois modes fondamentaux de propagation de fissure (Baron, 1982)**

chargement hors axes. Le spécimen correspond à un cylindre en béton entaillé sur les deux extrémités par l'emplacement de corps déformables au moment du coulage. La forme d'éprouvette permet de réaliser un glissement longitudinal (en termes de déformation) parallèle à l'axe du cylindre. La variation de l'épaisseur de la zone concernée par le cisaillement permet de modifier l'inclinaison du plan de rupture.

## 2. SYNTHÈSE CRITIQUE DES ESSAIS PROPOSÉS POUR LA DÉTERMINATION DU CISAILLEMENT

### 2.1. Essai de cisaillement plan d'Iosipescu

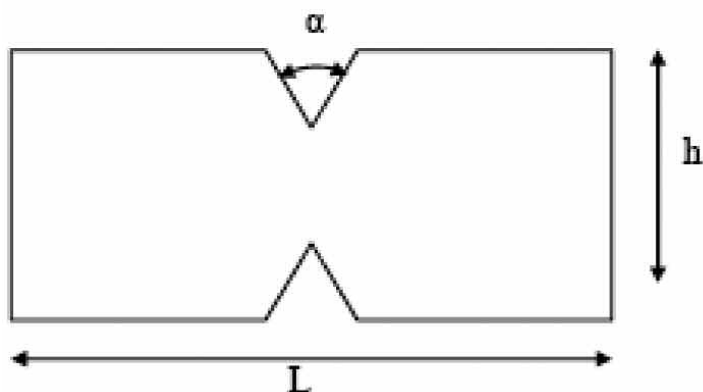
Les spécialistes savent qu'il est fort difficile de soumettre des éprouvettes à des contraintes de cisaillement pur. Des machines intéressantes sont celles qui permettent de travailler suivant la méthode proposée par Iosipescu (Iosipescu, 1967).

L'essai Iosipescu consiste à appliquer une sollicitation de cisaillement, sous la forme d'un couple de forces, à une

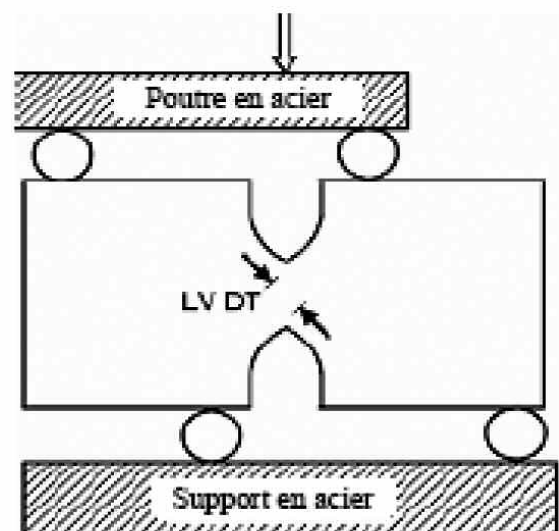
éprouvette entaillée. Le montage d'essai est composé de deux parties identiques antisymétriques placées de part et d'autre de l'éprouvette et présentées entre les têtes de la machine d'essai.

Walrath et Adams (Adams *et al.* 1987) ont adopté un nouveau montage à partir de l'essai Iosipescu qui s'est imposé comme l'essai standard pour les matériaux composites (ASTM) (Pierron *et al.* 1997). Petterson (Petterson, 2002) a vérifié expérimentalement, grâce à la corrélation d'images, que la distribution du champ de cisaillement n'était pas homogène et symétrique dans la partie centrale de l'éprouvette.

Hawong et al. (Hawong *et al.* 2003) ont également montré l'influence de l'angle d'entaille sur la répartition du champ de déformation du cisaillement grâce à des mesures par photoélasticité sur un matériau isotrope (résine). L'analyse de la rupture d'échantillons Iosipescu unidirectionnels à  $0^\circ$  conduit à la conclusion qu'on ne peut pas déterminer directement la valeur de la résistance au cisaillement avec cet essai. On montre l'influence de la traction transverse sur la rupture, ainsi que la présence de concentrations de contraintes (Pierron, 1994). Pour le cas du béton seul, la géométrie du spécimen d'essai de cisaillement d'Iosipescu a été étudiée par un certain nombre de chercheurs ces dernières années avec des



a). Paramètres géométriques



b) Montage d'essai Iosipescu

**Figure 2. Essai d'Iosipescu**

résultats contradictoires (Derradj *et al.* 2007). Les résultats pour les plus grandes contraintes principales absolues prouvent que des contraintes de tension sont créées aux racines des deux entailles. Ces contraintes de tension peuvent être le résultat de la rupture en mode I et expliquer probablement ce mode ou le mode mixte observé dans les essais employant le «Iosipescu test specimen geometry» (Derradj *et al.* 2007). La distribution des contraintes entre les racines des deux entailles prouve que des entailles peu profondes donnent une distribution de contraintes semblable à celle développée dans l'essai de tension indirect.

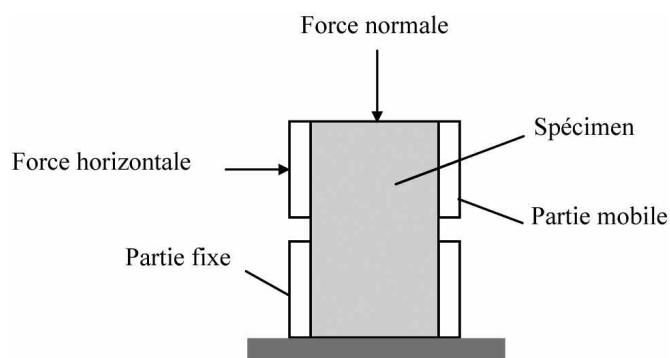
## 2.2. Essai de cisaillement direct

L'essai de cisaillement direct est couramment utilisé pour la détermination de la résistance au cisaillement des sols et des roches dans le domaine de géotechnique. La figure 3 montre le principe de base de l'appareil.

L'appareil se compose d'une partie inférieure fixe et d'une partie supérieure mobile. Une force verticale constante est appliquée au sommet de la boîte de cisaillement et une force horizontale est appliquée à la partie mobile de la boîte. Lors de l'essai de cisaillement, le déplacement horizontal, le déplacement vertical et la force sont complètement contrôlés. Les dimensions du modèle de boîte sont de 140×140×300 mm. Ce modèle peut être adapté aux spécimens de béton coulé.

Le principal inconvénient de l'utilisation de ce test pour la détermination du cisaillement des bétons réside dans la présence de vides entre le béton et la paroi intérieure de la boîte de cisaillement à cause des phénomènes de durcissement et de retrait du béton après le coulage. Donc, le mauvais contact entre le spécimen et la boîte peut donner lieu à une répartition non uniforme des contraintes et influencer sur la nature des résultats. En plus, le frottement entre les lèvres de la fissure après le pic conduit à un comportement rigidifiant de la structure et ne reflète pas le comportement fragile en cisaillement malgré l'ouverture complète de la fissure.

La conception du test ne permet pas au mécanisme d'engrainement des agrégats d'être dominant du fait que le spécimen peut se dilater et la force normale n'est pas suffisante pour bloquer totalement la dilatation (Wong *et al.* 2007).



**Figure 3. Configuration de base de l'essai de cisaillement direct**

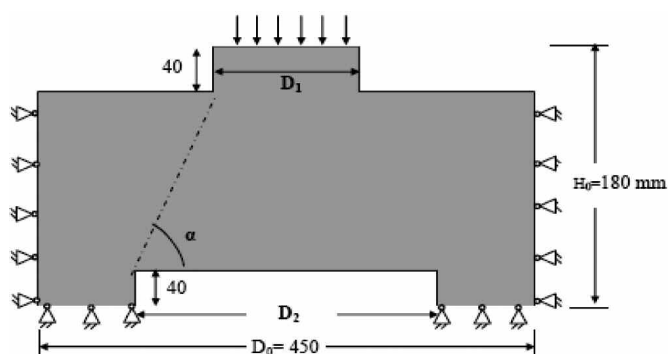
## 3. CONCEPTION DU TEST PROPOSÉ

### 3.1. Introduction

Pour la présente étude, le développement d'un essai de cisaillement permettant de fournir des relations simple de type :  $\sigma(t) = F(\varepsilon(T))$ , avec  $T < t$ , demeure indispensable pour comprendre le comportement en glissement plan, sachant que :  $\varepsilon(T)$  représente l'historique de déformation, l'état de contrainte au temps  $t$  et  $F$  une fonctionnelle.

Il est proposé dans ce qui suit un nouvel essai mécanique de laboratoire visant à définir expérimentalement cette relation qui caractérise le comportement en cisaillement des bétons.

### 3.2. Principe de l'essai



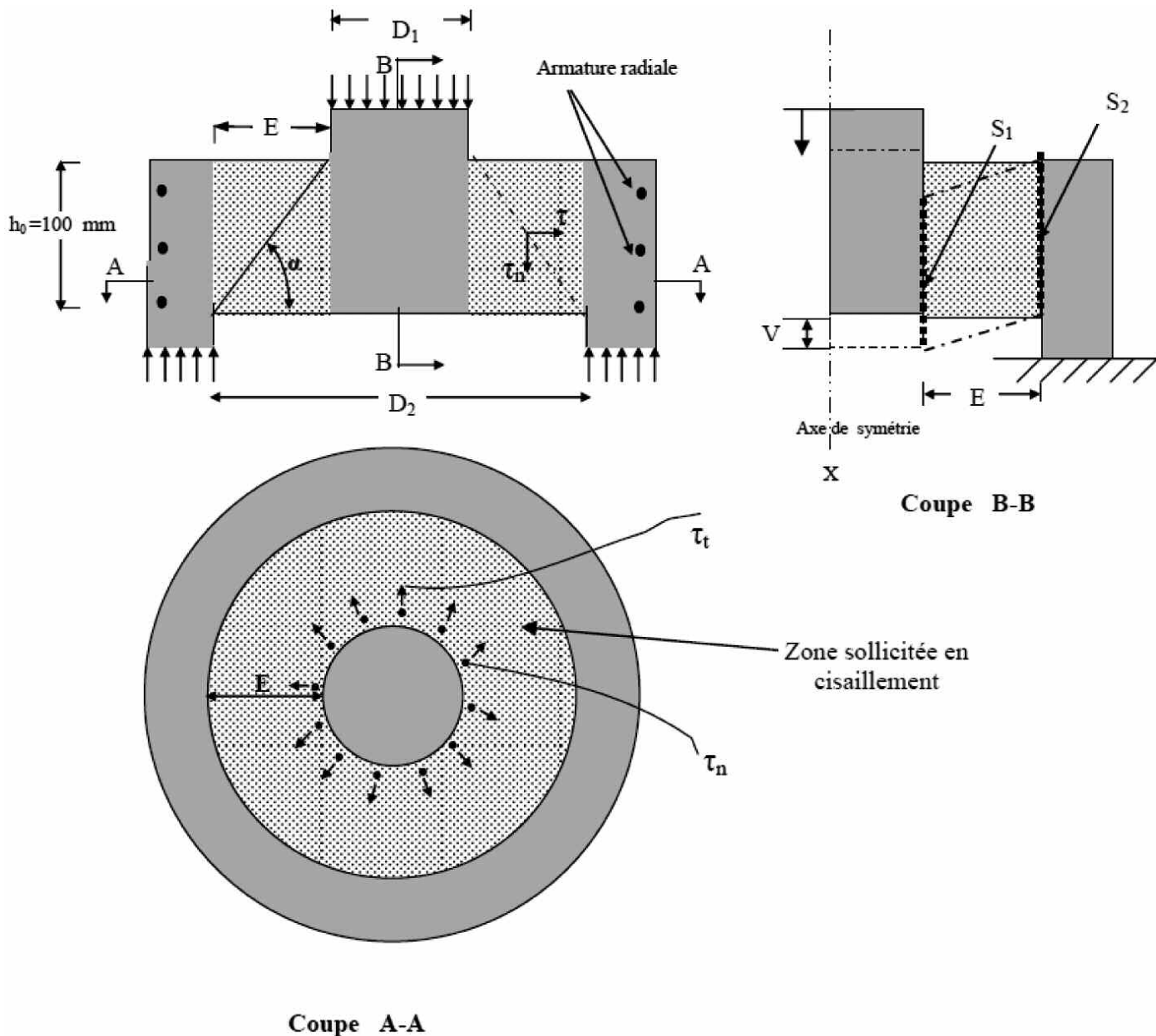
**Figure 4. Dimensions et condition aux frontières**

Le principe de l'essai est basé sur la création de zones de contraintes nulles à l'aide de placement de corps déformables en polystyrène au moment du coulage de l'éprouvette. Donc, de nouvelles conditions aux frontières sont créées permettant de transformer la sollicitation de compression en un état de cisaillement plan sur une zone bien déterminée (figure 4).

Les déformations horizontales sont empêchées par une cage d'armatures radiales mise en place au moment du coulage de l'éprouvette. L'utilisation de cette technique a conduit à mettre au point une méthode d'essai de rupture en cisaillement d'une éprouvette cylindrique dans laquelle l'appui (plateau de presse) est considéré comme une paroi indéformable. Ce dispositif permet d'assurer la perpendicularité des génératrices du cylindre ainsi que la répartition et l'homogénéité des contraintes sur la génératrice supérieure.

Le nouveau mode proposé, basé sur des analyses physiques et sur des observations expérimentales, introduit la notion de déformation «déviatorique» équivalente responsable de l'endommagement par glissement qui s'ajoute à l'endommagement par extension. Ces deux types de dégradation (endommagement par extension et par glissement) sont considérés simultanément pour décrire le mécanisme de transfert de cisaillement (figure 5).

Du fait de la loi de parité des contraintes tangentes sur deux facettes perpendiculaires, le déplacement vertical



**Figure 5. Mécanisme de transfert de cisaillement**

relatif entre les deux faces intérieure et extérieure du cylindre creux engendre un flux de cisaillement vertical équilibré par des contraintes tangentes sur la surface latérale d'éprouvette. Donc, suivant les dimensions des corps déformables. La surface de rupture prend une forme conique de diamètre supérieur  $D_1$  et diamètre inférieur  $D_2$  (figure 6). La variation de dimension  $E = (D_2 - D_1)/2$  donne l'inclinaison du plan de rupture.

### 3.3. Mesure de déformation

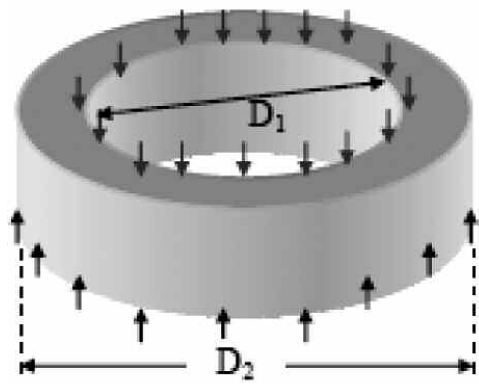
On considère que les deux parties de l'éprouvettes (le cylindre plein de diamètre  $D_1$  et le cylindre creux d'épaisseur  $(D_0 - D_2)/2$ ) ne subissent pas des déplacements transversaux. La déformation longitudinale de l'éprouvette est donc déterminée par le déplacement imposé du plan de la génératrice supérieure par rapport au plan de la génératrice

inférieure. On suppose de plus que ce déplacement se réduit à une composante sur l'axe longitudinal de cylindre plein  $x$ , qu'on notera  $V$ .

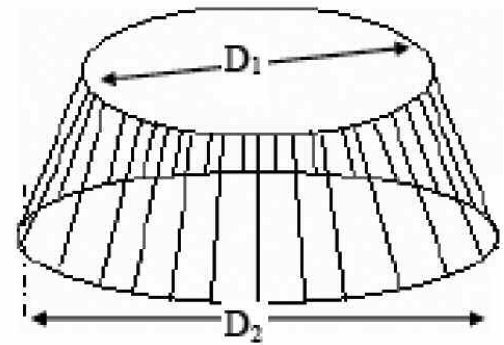
Si on considère que les deux plans  $S_1$  et  $S_2$  (figure 5) ne subissent pas de déplacements transversaux et que l'épaisseur de béton délimitée par les deux sections  $S_1$  et  $S_2$  est très faible, le modèle présente un problème de cisaillement classique. On suppose qu'au temps  $t = 0$ , la force tangentielle  $T$  est nulle ainsi que le déplacement imposé  $V$ . On connaît de plus l'évolution des conditions aux limites sous la forme de fonctions  $T(t)$  ou  $V(t)$ . Toutes ces quantités, cinématiques et statiques, sont représentées sur la figure 7. Il est possible d'exprimer  $\tau$  en fonction de l'histoire du cisaillement  $\gamma$  sous la forme générale :

$$\dot{\tau}(\mathbf{x}_l, t) = G \dot{\gamma}(\mathbf{x}_l, t) \quad [1]$$



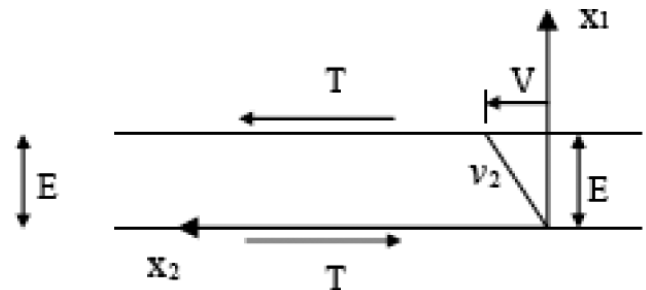
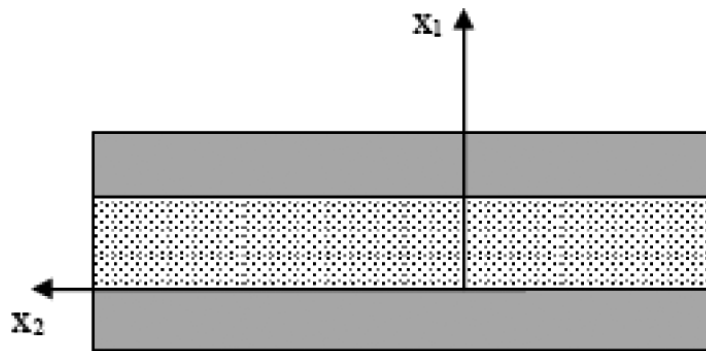


Répartition des contraintes sur la zone de cisaillement



Surface de rupture

**Figure 6. Orientation de la bande de cisaillement**



**Figure 7. Présentation d'un problème de cisaillement pour milieu continu classique**

Avec :

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \quad [2]$$

$$\gamma = 2 \varepsilon_{12} \quad [3]$$

$$\dot{T}(t) = \dot{\tau}(x_1, t) \quad [4]$$

Pour mesurer le glissement longitudinal (déplacement V) entre les deux sections cylindriques  $S_1$  et  $S_2$ , des capteurs de déplacement LVDT (linear voltage displacement transducer) peuvent être utilisés. Pour permettre l'utilisation des LVDT, des supports métalliques sont utilisés. La précision des capteurs de déplacement est de 0,2% de la course totale du LVDT (25mm).

### 3.4. Étude expérimentale

Les essais ont été réalisés sur une machine d'essai universelle de type «Shenck RBS3000» avec une force d'essai maximum égale à 3000 kN (figure8). Le dispositif d'essai est lié à un système de contrôle informatisé par carte d'acquisition, qui permet d'obtenir des courbes «contrainte-déplacement» d'une grande précision.

Pour l'étude du comportement à l'échelle globale, on doit respecter des dimensions suffisamment grandes devant celles des plus gros granulats. On admet généralement qu'un rapport de 5 à 10 est suffisant.

Pour une formulation illustrée sur le tableau 1, on propose de réaliser 3 essais pour chaque inclinaison différente du plan de rupture. Les géométries proposées sont illustrées sur le tableau 2. Les essais ont été réalisés au delà de 28 jours. La résistance à la compression est déterminée à partir des essais sur trois éprouvettes de diamètre 160mm et de hauteur 320mm.



**Figure 8. Machine d'essai et dispositif de moulage**

Eau/ciment	Ciment (CPA) Kg	Sable de mer (Kg)	Gravier 4-8 (mm) (Kg)
0.5	350	701.15	973.83

**Tableau 1. Composition de 1m<sup>3</sup> de béton**

Dénomination de l'éprouvette	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	E (mm)	$\alpha$ (degrés)
B50E14	84,4	370	142,8	35
B50E10	100	300	100	45
B50E7	120	260	70	55

**Tableau 2. Caractéristiques géométriques des éprouvettes**

### 3.5. Résultats et commentaires

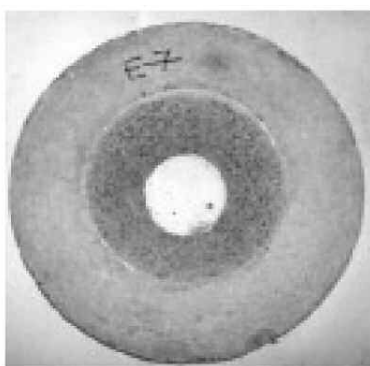
La résistance moyenne de compression est de 20 MPa. Les figures ci-après montrent le mécanisme d'endommagement obtenu par l'essai proposé.

La morphologie de la rupture est identique pour les éprouvettes B50E7 et B50E10 mais, complètement différente

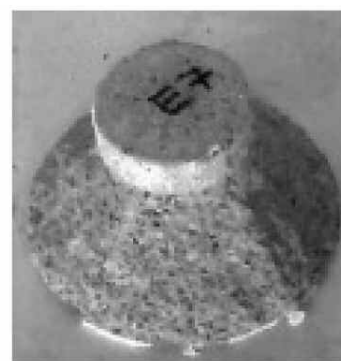
pour l'éprouvette B50E14. La rupture se produit par arrachement d'un cône de béton pour le cas de B50E7 ( $\alpha=55^\circ$ ) et de B50E10 ( $\alpha=45^\circ$ ). La fissuration est obligée de suivre un plan prédéfini selon la géométrie des corps déformables utilisés au moment du coulage. Les microfissures coalescent en une seule macro-fissure d'inclinaison  $\alpha$  par rapport à l'horizontale. L'éprouvette se décompose en deux frag-



a. Vue de dessus de la partie extérieure de l'éprouvette



b. Vue de dessous de la partie extérieure de l'éprouvette

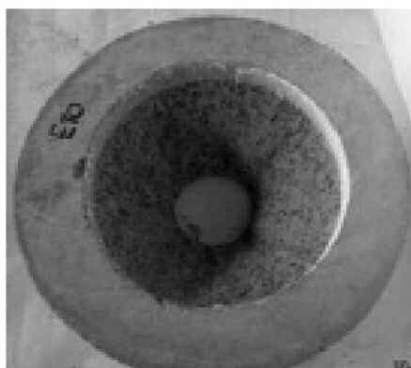


c. Plan de rupture

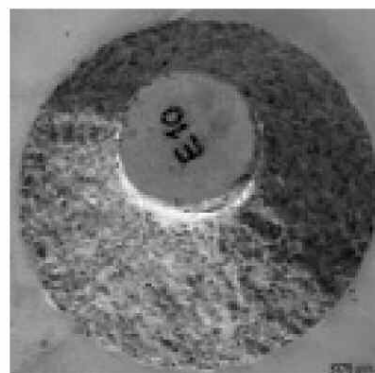
**Figure 9. Mécanisme de rupture (Eprouvette B50E7)**



a. Vue de dessus de la partie ext. de l'éprouvette

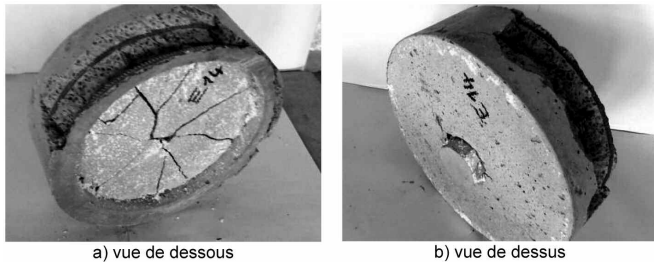


b. Vue de dessous de la partie ext. de l'éprouvette



c. Plan de rupture

**Figure 10. Mécanisme de rupture (Eprouvette B50E10)**



**Figure 11. Mécanisme de rupture (Epreuve B50E14)**

ments intacts, une partie centrale de forme conique et une partie extérieure de forme cylindrique.

Pour le cas de B50E14 ( $\alpha=35^\circ$ ), la rupture ne se produit pas suivant le plan prédéfini. On remarque que le béton autour de l'armature radiale s'endommage et la fissure se propage sur la surface inférieure de l'éprouvette (figure 11a). La rupture se produit par flexion de la partie centrale de l'éprouvette qui engendre simultanément des fissurations dans les fibres inférieures de la partie centrale (zones tendues) et dans le plan diamétral d'éprouvette malgré la présence d'une cage d'armatures radiales de haute adhérence.

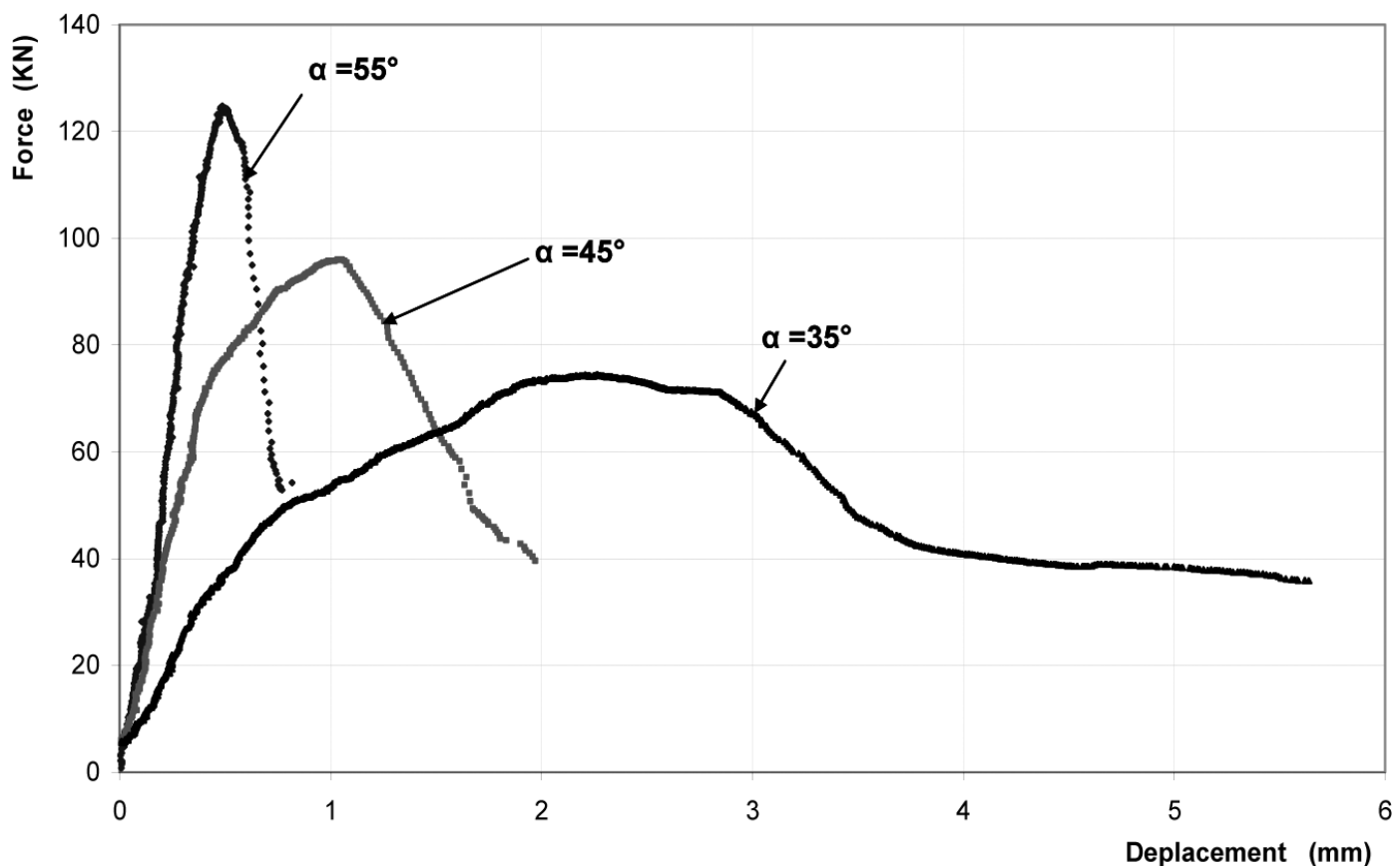
Trois courbes, représentant les réponses en force-déplacement des éprouvettes B50E7, B50E10 et B50E14, sont superposées dans la figure 13. Dans la première partie des courbes, plus l'angle du plan de rupture est faible et plus la courbe force-déplacement présente une partie non linéaire relativement importante jusqu'à la rupture. L'éprouvette, après rupture, est plus ductile.

Suivant la direction de la normale du chargement par rapport au plan de fissuration, l'effort de rupture en cisaillement de l'éprouvette B50E7 est nettement supérieur à celui de B50E10. L'éprouvette B50E14 présente l'effort de rupture le plus faible.

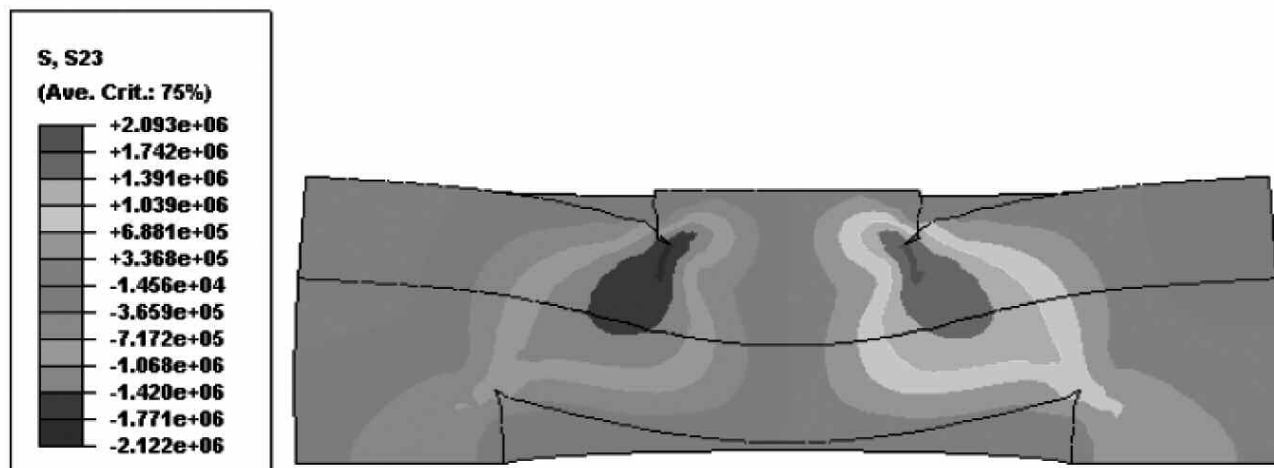
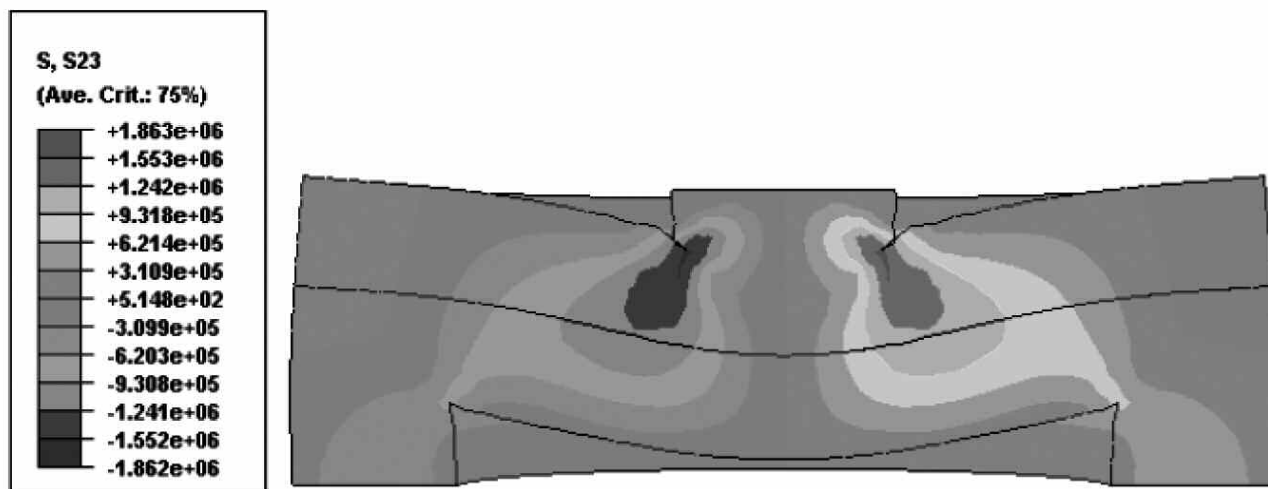
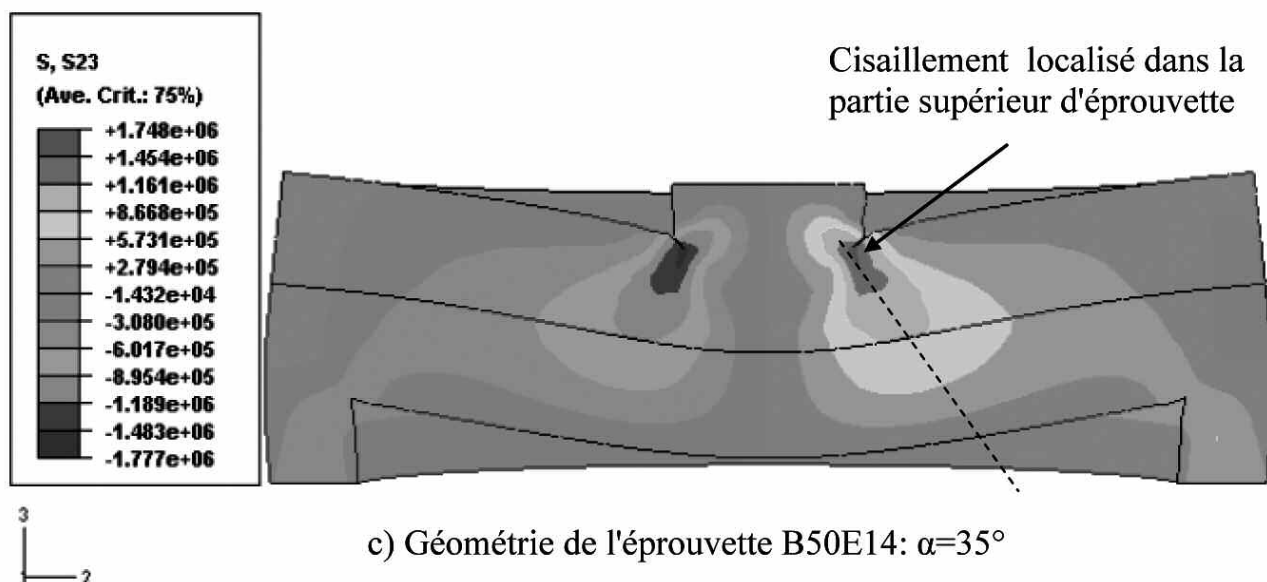


**Figure 12. Inclinaison du plan de rupture (Epreuves B50E7 et B50E10)**

L'inclinaison du plan de cisaillement influe d'une manière directe sur le comportement du béton en cisaillement. En effet, la dimension E est inversement proportionnelle à la rigidité flexionnelle de la partie centrale de l'éprouvette. La flexibilité de la partie centrale engendre des rotations de la paroi verticale du plan diamétral ce qui explique l'endommagement de la partie inférieure de la paroi extérieure de l'éprouvette B50E14 (zone tendue). La relation effort-déplacement montre pour l'éprouvette



**Figure 13. Courbe effort-déplacement**

a) Géométrie de l'éprouvette B50E7:  $\alpha=55^\circ$ b) Géométrie de l'éprouvette B50E10:  $\alpha=45^\circ$ c) Géométrie de l'éprouvette B50E14:  $\alpha=35^\circ$ **Figure 14. Profils des contraintes de cisaillement**



B50E14 un comportement ductile et l'endommagement est de type diffus. La partie descendante explique la réponse de la partie extérieure de l'éprouvette après fissuration où les armatures radiales empêchent le déplacement transversal du béton endommagé.

## 4. DISCUSSION

La figure 14 présente les profils des contraintes de cisaillement obtenus en élasticité par le logiciel de calcul ABAQUS. La simulation est effectuée en trois dimensions.

Une comparaison des profils de contrainte de cisaillement permet de conclure que :

- La zone de cisaillement produite par le type de chargement croît avec l'accroissement de l'inclinaison  $\alpha$ .
- Pour le cas de l'éprouvette B50E14, le cisaillement maximum produit par ce type de chargement est localisé au niveau de la partie supérieure de l'éprouvette avec une inclinaison supérieure à  $35^\circ$  (figure 14-c).

## 5. CONCLUSIONS

Le présent article présente les résultats expérimentaux d'une nouvelle conception d'essais pour évaluer le comportement en cisaillement du béton. L'essai réalisé sur trois types d'éprouvettes ayant trois inclinaisons différentes du plan de rupture.

- On peut dire que l'inclinaison de  $55^\circ$  réduit les effets de flexion comparativement aux inclinaisons de  $45^\circ$  et  $35^\circ$ . La charge nécessaire pour la rupture augmente avec l'inclinaison  $\alpha$ . Lorsque la composante du glissement est plus forte que celle de traction ou compression, la rupture se produit par cisaillement.
- Pour  $\alpha=45^\circ$  et  $\alpha=55^\circ$ , l'essai montre que la rupture se produit par cisaillement dans le plan prédéfini. L'inclinaison du plan de rupture réduit les contraintes circonférentielles et le béton reste intact dans la partie extérieure de l'éprouvette et ne subit pas de fissuration, bien que l'éprouvette présente une résistance à la rupture plus importante.
- Pour l'inclinaison de  $35^\circ$ , la géométrie de l'éprouvette favorise l'émergence du moment de flexion et la rupture se produit par flexion de la partie centrale et par traction de la partie extérieure de l'éprouvette.

En conclusion, on peut dire que la méthodologie d'essai proposée permet de décrire le mécanisme de transfert de cisaillement et d'identifier l'enveloppe de rupture des spécimens. Le procédé est capable de décrire d'une façon fiable et simple le comportement du béton au cisaillement et ce pour différentes inclinaisons possibles, surtout lorsque l'on veut prendre en compte la fragilité de ce matériau ainsi que la symétrie de révolution et la déformation unidirectionnelle du corps d'éprouvette.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

Fourd B., Ghabrial, N. S., «Comportement du béton en compression et cisaillement combinés». La Technique Française du Béton Précontraint. *Publication de l'association Française du Béton pour le IXe Congrès International de la Fabrication Internationale de la Précontrainte.*, Juin 1982, Stockholm.

Gotuwka V., Siwak J M., Kondo D. «Etude du béton sous sollicitations de torsion compression combinées : Evaluation de la contrainte tangentielle de fissuration». *Matériaux et Constructions*, vol. 32, 1999, p. 445-451.

Baron J., «La résistance a la propagation de fissure In le béton hydraulique». Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris. 1982.

Wong R.C.K., Ma S.K.Y., Wong R.H.C., Chau K.T. «Shear strength components of concrete under direct shearing». *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, p. 1248-1256.

Loov R.E., Patnaik A.K., «Horizontal shear strength of composite concrete beams with a rough interface». *PCI Journal*, vol. 39, n°1, 1994, p.48-65.

Walraven J.C., Frenay J., Puijssers A. «Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members ». *PCI Journal*, vol. 32, n°1, 1987, p.66-84.

Adams Donald, Walrath David. «Current Status of the Iosipescu Shear Test Method». *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, N°6, 1987, p.494-507.

Pierron F., Vautrin A., « Measurement of the in-plane shear strengths of unidirectional composites with the Iosipescu test », *Composites Science & Technology*, vol. 57, 1997, p. 1653-1660.

Pettersson K.B. «Development of the inclined double notch shear test for determination of interlaminar properties of composite laminates». Thesis, KTH Stockholm, 2002.

Hawong J.S., Shin D.C., Baek U.C. «Validation of pure shear test device using finite element method and experimental methods». Thesis, School of Mechanical Engineering, South Korea, 2003.

Pierron Fabrice., Vautrin Alain., L'essai de cisaillement plan d'Iosipescu: modélisation et méthodologie expérimentale pour les composites, Thèse nouveau doctorat, Université de soutenance, Lyon, 1994.

Derradj Mohamed, Kaci Salah. «Numerical study of compact shear (Mode II) type test specimen geometry». *Materials and Structures*. 2007.

Gideon P.A.G, van Zijl. «Improved mechanical performance: Shear behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC)». *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, p.1241-1247.

N. Iosipescu, «New accurate method for single shear testing of metals». *Journal of Materials*, vol. 2, 1967, p.537-566.