

## IMPACT DES TUBES EN PVC RIGIDE : EVALUATION DU DOMMAGE PAR ANALYSE DIMENSIONNELLE DE L'AIRE DE LA ZONE D'IMPACT

Christian FOKAM BOPDA<sup>1\*</sup>, Mohammed CHERGUI<sup>1</sup>,  
Mohamed El GHORBA<sup>1</sup>, Kalifa MANSOURI<sup>2</sup> et Mohamed MAZOUZI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Contrôle et de Caractérisation des Matériaux, B.P 8118,  
Oasis-Route El Jadida – ENSEM - Casablanca, Maroc

<sup>2</sup>Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Bd hassan II,  
Mohamedia Maroc

(Reçu le 10 Décembre 2009, accepté le 22 Mai 2010)

---

\* Correspondance et tirés à part, e-mail : [fokam79@yahoo.fr](mailto:fokam79@yahoo.fr)

### RÉSUMÉ

Cet article présente une méthode d'évaluation du dommage expérimental des tubes en PVC rigide soumis à un impact localisé et cela pour plusieurs niveaux d'énergies distincts. Il s'agit de proposer une expression du dommage expérimental défini sur une caractéristique de l'impact facilement mesurable en conditions d'exploitation.

Dans un premier temps, des essais d'impacts sont effectués sur des tronçons de tubes en PVC rigide, à l'aide d'un percuteur de masse 16kg lâché d'une hauteur  $h$  variant de 0 à 2m. Dans un second temps, une étude des propriétés résiduelles des tubes impactés, conduite grâce à l'essai de traction en statique sur des éprouvettes plates prélevées aux alentours de la zone impactée, a permis de mieux appréhender le comportement post-impact de ces tubes. Cette investigation sur les propriétés post-impact permet de définir le niveau du dommage atteint via le modèle de la théorie unifiée de Bui Quoc. Par analogie à ce dernier, une expression du dommage est définie en fonction de l'aire de la zone impactée.

**Mots-clés :** *Endommagement, empreinte, traction, essais d'impact, PVC rigide, craquelure*

### ABSTRACT

**Impact of rigid PVC pipes: Evaluation of damage by a dimensional analysis method of the area of impacted zone**

This research work mainly presents a method of evaluating experimental damages on rigid PVC pipes when subjected to localized impacts using

different energy levels configurations. Here, an expression of experimental damages linked to impacts easily measurable under operating conditions, is to be defined.

In the first phase of the experiment, impact tests are performed on sections of rigid PVC pipes, with the use of an object weighing 16 kg dropped from a height (h), ranging from 0 m to 2m. The second phase, mostly concentrates on studying the characteristics and properties of the pipes after impact test. Using samples of flat surfaces taken from the area of impact on the pipes and subsequently subjecting them to pressure test, helps understand the behavior and nature of the pipes after the various impact. Through the unified model theory of Bui Quoc, a study of post-impact properties of the pipes, allows us to determine the level of damage on the them.

**Keywords :** *Damage, empreinte, tensile, impact test, rigid PVC, craze*

## I - INTRODUCTION

Les matériaux plastiques occupent une grande part des canalisations d'adduction d'eau potable en raison de sa facilité d'installation et de coûts relativement bas. Néanmoins, des statistiques récentes indiquent que les pertes dans les réseaux d'eau potable atteignent en moyenne 35% dans un pays comme le Maroc [1] et dans la plupart des cas, le matériau est souvent mis en cause [2].

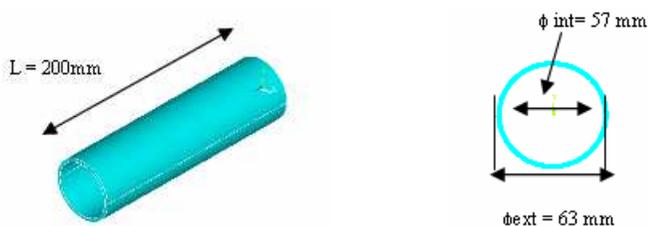
En effet, lors de la pose des tubes en chantier, ceux-ci sont souvent soumis à des impacts accidentels tels que les cailloux, marteaux, etc.... Il devient important pour les ingénieurs de connaître sa tenue mécanique résiduelle à l'impact et son aptitude à résister à la pression d'adduction. Pour cela, une estimation de l'état du dommage du matériau est donc nécessaire.

Il existe dans la littérature, différents modèles du dommage qui permettent de prédire pour une sollicitation donnée l'état d'endommagement du matériau [3]. La majorité de ces modèles sont définis sur des grandeurs difficilement mesurables en conditions d'exploitation. Il en résulte une difficulté d'application desdits modèles. Le but de ce travail est de proposer une démarche simple et rapide à la portée des opérateurs en chantier, permettant d'évaluer le niveau du dommage de tubes soumis à une sollicitation d'impact. La première partie de ce travail est consacrée à la présentation des dispositifs expérimentaux utilisés (machine d'impact et Machine de mesure Tridimensionnelle MMT). Par la suite, une analyse et une confrontation des dommages définis sont présentées en dernière partie de l'article.

## II - PARTIE EXPÉRIMENTALE

### II-1. Matériel

Les tubes utilisés sont constitués essentiellement de polychlorure de vinyle (PVC rigide), provenant d'une même coulée. Les dimensions du tube sont : diamètre 63 mm et épaisseur 4.5mm (*Figure 1*). La longueur du tube est fixée par la norme des essais d'impacts.



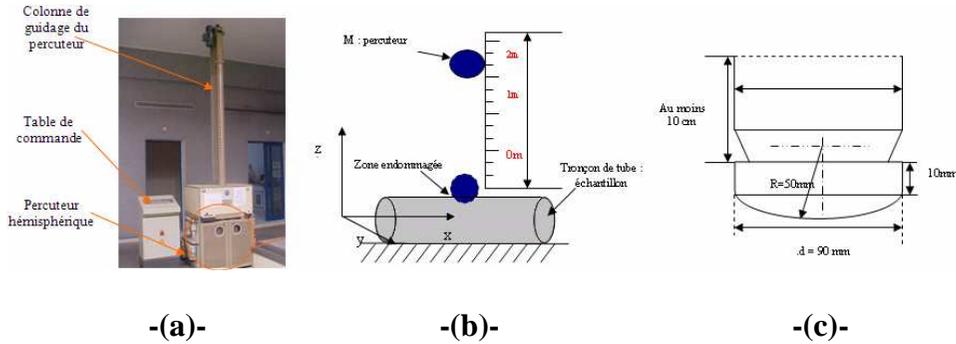
**Figure 1 :** Dimensions de l'éprouvette tronçon de tube pour essai d'impact

**Tableau1 :** Propriétés mécaniques du PVC rigide

Propriétés	Valeurs
Module d'élasticité	3200 MPa
Contrainte de rupture en traction	75 MPa
Allongement à la rupture en traction	100 %
Résistance à la rupture en compression	50 – 75 MPa

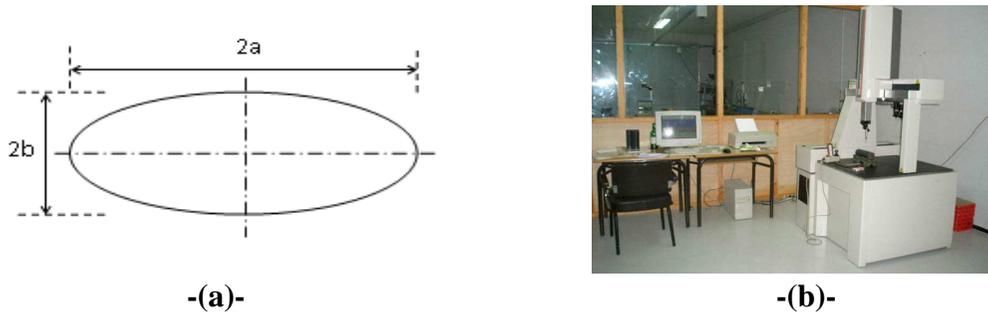
### II-2. Machine d'impact

Ce dispositif, permet le lâché d'un poids appelé percuteur d'une hauteur choisie sur un tronçon de tube (*Figure 2a et 2b*). Le tronçon de tube est positionné sur un support en « V ». Une barre cylindrique en acier est introduite dans le tube pour éviter le rebond du percuteur. Nous avons utilisé un percuteur de tête hémisphérique (rayon  $R = 50\text{mm}$ ) et de masse 16kg (*Figure 2c*). Les hauteurs de lâchés sont comprises entre 0 et 2m. La masse, la hauteur et la vitesse permettent le calcul de l'énergie cinétique d'impact.



**Figure 2 :** (a) machine d'impact de marque allemande UTS TESTSYSTEME, (b) schéma synoptique de la machine d'impact, (c) dimensions du percuteur hémisphérique

L'impact du percuteur laisse sur le tronçon de tube, une empreinte de forme elliptique que nous appellerons : zone impactée (**Figure 3a**). Les dimensions des différentes empreintes sont mesurées à l'aide d'une Machine de Mesure Tridimensionnelle : MMT (**Figure 3b**).

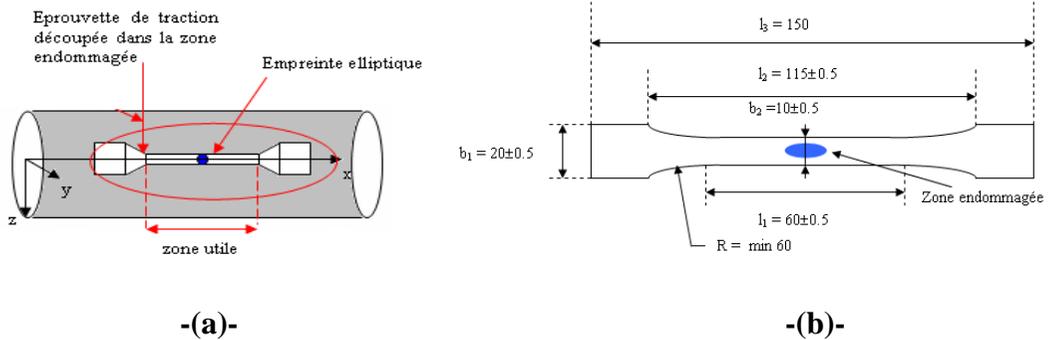


**Figure 3 :** (a) schéma de la zone d'impactée. (b) Machine de Mesure Tridimensionnelle (MMT) de marque Mitutoyo type Euro c Strato.

### II-3. Machine de traction

A la suite des essais impacts, des éprouvettes de traction sont prélevées aux alentours de la zone impactée, telles que présentées dans la **Figure 4**.

Les essais de traction (**Figure 5**) sont réalisés à température ambiante, à faible vitesse de déformation  $0.06\text{ms}^{-1}$ , de façon à limiter les phénomènes d'auto échauffement du matériau. Les caractéristiques mécaniques, notamment la limite d'élasticité sont relevées.



**Figure 4 :** (a) zone d'usinage des éprouvettes de traction sur le tube.  
 (b) dimensions éprouvettes de traction



**Figure 5 :** Machine de traction UTS TESTSYSTEME

### III – RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats expérimentaux issus des mesures effectuées par MMT et de la machine de traction sont regroupés dans le tableau 2 : aire de la zone impactée ( $S_i$ ), et la contrainte au seuil d'élasticité résiduelle en traction ( $\sigma_{yr}$ ). Par analogie à la fraction de vie en fatigue [4], nous définissons le paramètre adimensionnelle  $\beta$  comme étant l'énergie d'impact à une hauteur  $h_i$  quelconque, rapportée à l'énergie d'impact maximale à la rupture correspondant à une hauteur  $h_{max}$  (**Tableau 2**)

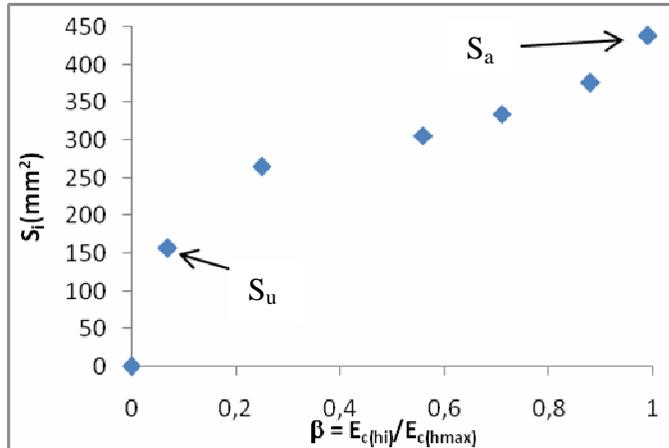
L'évolution de l'aire de la zone impactée  $S_i$  et de la contrainte seuil d'élasticité en traction  $\sigma_{yr}$  en fonction de  $\beta = E_{c(hi)}/E_{c(hmax)}$ , sont présentées dans la **Figure 6**.

**Tableau 2** : Valeurs des dimensions mesurées de l'aire de la zone d'impact ( $S_i$ ) et contrainte seuil élastique résiduelle ( $\sigma_{yr}$ )

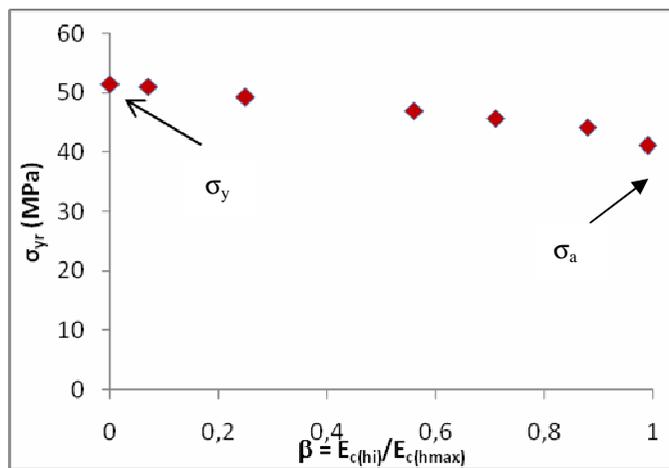
Désignation : h / m	m (kg)	h (m)	$E_{c(hi)}$ (J)	$\beta =$ $E_{c(hi)}/E_{c(hmax)}$	$S_i$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{yr}$ (MPa)
0 / 16kg	16	0	0	0	0	$\sigma_y = 51,49$
0.2 m / 16kg	16	0.2	18	0,07	157,07	51,11
0.5 m / 16kg	16	0.5	65.43	0,25	265,07	49,21
1m / 16kg	16	1	145.86	0,56	306,30	47,03
1.25m / 16kg	16	1.25	182.78	0,71	334,77	45,71
1.5 m / 16kg	16	1.5	225.56	0,88	375,81	44,20
1.7 m / 16kg	16	$h_{max} \geq$ 1.7	254.47	0,99	438,25	41,12

$m$  : masse du percuteur,  $h$  : hauteur de lâchée du percuteur,  $E_{c(hi)} = (1/2) * mv^2$  : énergie cinétique de chute,  $S_i$  : aire de la zone impactée,  $\sigma_{yr}$  : contrainte limite d'élasticité résiduelle.

De la **Figure 6**, on constate que la courbe de la contrainte seuil d'élasticité évolue en sens inverse de celle de l'aire de la zone d'impact. En effet, la contrainte  $\sigma_{yr}$  décroît d'une valeur de 51.49MPa (matériau vierge : non impactée) pour  $\beta = 0$  à une valeur de 41.12MPa pour  $\beta = 1$  (représentant la rupture lors de l'essai d'impact). Tandis que l'aire de la zone impactée croît progressivement d'une valeur nulle (tube non impacté) à une valeur maximale de 438.25mm<sup>2</sup> mesurée avant rupture par impact. Cette évolution divergente entre l'aire de la zone impactée et la perte de résistance du matériau peut s'expliquer de l'observation de la zone impactée (**Figure 7**).

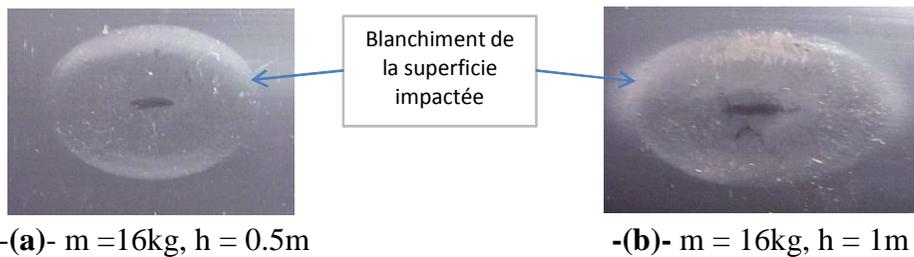


-(a)-



-(b)-

**Figure 6 :** Evolution en fonction du niveau d'impact subi  $\beta$  : (a) de la l'aire de la zone impactée «  $S_i$  » et (b) de la contrainte seuil d'élasticité résiduelle «  $\sigma_{yr}$  »

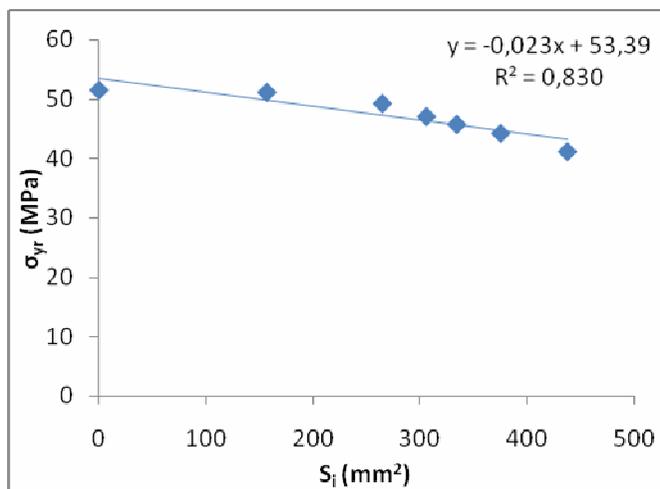


-(a)- m = 16kg, h = 0.5m

-(b)- m = 16kg, h = 1m

**Figure 7 :** Photographies de la zone impactée du tronçon de tube pour différentes hauteurs de lâchés du percuteur

On remarque sur ces photographies, que l'aire de la zone impactée est entièrement blanchie. Dans la littérature sur les polymères amorphes, le blanchiment permet la localisation macroscopique des phénomènes d'endommagement microscopiques [5, 6], de récentes études ont confirmé que le blanchiment était lié à l'apparition de défauts microscopiques dans la structure polymère [7] : craquelures, formation de cavités etc. Il est donc clair que l'étendue de l'aire de la zone d'impact traduit également dans une certaine proportion le dégât morphologique occasionné par l'impact. Le dégât occasionné étant dans cette étude, décelé par la perte des propriétés mécaniques, nous représentons dans la **Figure 8**, l'évolution de la contrainte limite d'élasticité résiduelle en fonction l'aire de la zone impactée.



**Figure 8** : Évolution de la contrainte ultime résiduelle en fonction de la superficie de la zone impactée

On remarque sur la **Figure 8**, que la contrainte limite d'élasticité résiduelle est corrélée linéairement à l'aire de la zone impactée. Cette corrélation démontre que l'aire de la zone d'impact est également une grandeur, capable de rendre compte du dégât occasionné par l'impact (relativement aux dimensions de la pointe du percuteur).

#### IV - EVALUATION DU DOMMAGE

La perte de résistance d'un matériau, suite à une sollicitation mécanique quelconque, est considérée comme signe macroscopique de la dégradation ou l'activation d'un mécanisme endommagement (à l'échelle micro) dans la structure. On trouve d'ailleurs dans la littérature des modèles du dommage

couplés à la résistance résiduelle mesurée [3]. On définit généralement comme endommagement le phénomène qui désigne la détérioration progressive ou toute modification microstructurale altérant les propriétés mécaniques macroscopiques d'un matériau [3].

Lors de l'élaboration de la théorie unifiée, Bui Quoc et al [8] ont proposé une formulation du dommage expérimental (dommage normalisé) couplée à une propriété mécanique usuelle : contrainte seuil d'élasticité (*équation 1*)

$$D_{Exp} = \frac{1 - \frac{\sigma_{yr}}{\sigma_y}}{1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_y}} \quad (1)$$

$\sigma_{yr}$  : contrainte seuil d'élasticité résiduelle pour un niveau d'impact quelconque,

$\sigma_y$  : contrainte seuil d'élasticité du matériau vierge ( $\sigma_y = 51.49 \text{MPa}$ ),

$\sigma_a$  : contrainte seuil d'élasticité résiduelle critique pour  $\beta = 1$  (**Figure 6b**).

La corrélation établie dans la **Figure 8**, permet de considérer l'aire de la zone impactée comme une propriété macroscopique caractérisant le dégât occasionné par l'impact. Par analogie au modèle dommage de *l'équation (1)*, nous proposons une formulation du dommage couplée à l'aire de la zone d'impact «  $S_i$  » :

$$D_{Sel} = \left( \frac{1 - \frac{S_i}{S_u}}{1 - \frac{S_a}{S_u}} \right)^\alpha \quad (2)$$

Où  $S_i$  : l'aire de la zone d'impact mesurée pour un impact quelconque,

$S_u$  : l'aire minimale en dessous de laquelle aucune perte de résistance n'est observée, elle caractérise d'une certaine façon le matériau vierge (**Figure 6a**),

$S_a$  : aire critique au delà de laquelle le tube rompt lors de l'impact,  $\beta = 1$  (**Figure 6a**),

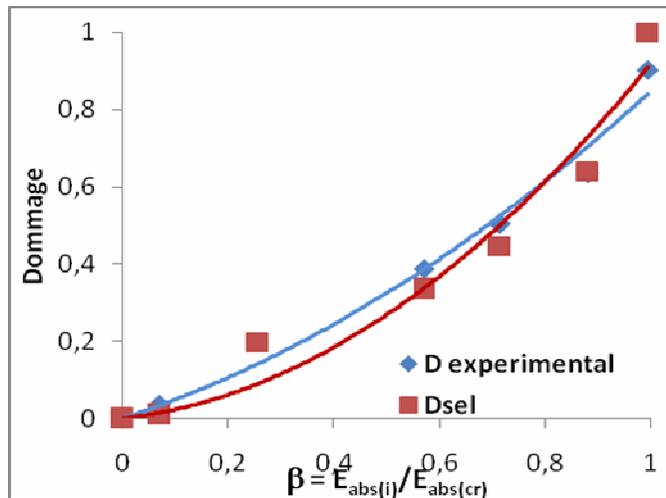
$\alpha$  : Coefficient de corrélation ( $\alpha$  est prise égal 2 par minimisation des écarts entre  $D_{Exp}$  et  $D_{Sel}$ , **Figure 9**).

A partir des *équations (1) et (2)*, les évolutions comparatives des dommages  $D_{Exp}$  et  $D_{Sel}$ , ainsi que les écarts relatifs correspondants, sont présentées dans la **Figure 9**.

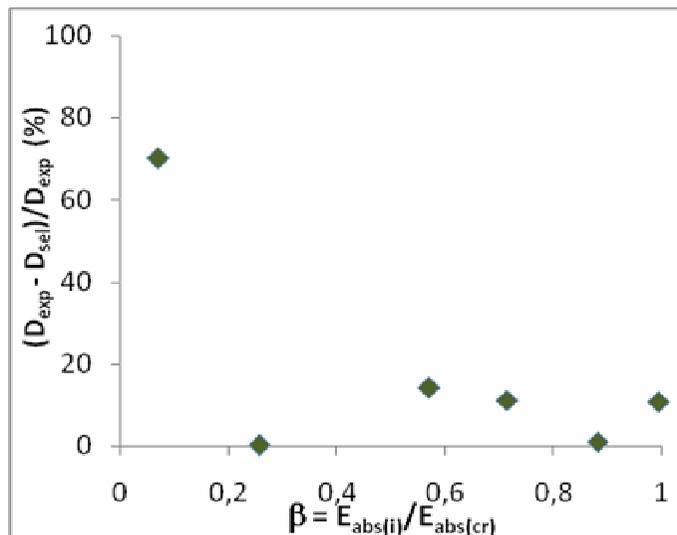
Sur la **Figure 9**, le dommage expérimental  $D_{Exp}$  croît progressivement d'une valeur  $D = 0$  (matériau non endommagé) à une valeur  $D = 1$  (matériau complètement endommagé). Le dommage  $D_{Sel}$  (avec  $\alpha = 2$ ) reproduit qualitativement correctement le dommage  $D_{Exp}$ . Néanmoins quantitativement, pour  $\beta \leq 0.7$ , le dommage  $D_{sel}$  sous-estime le niveau d'endommagement et au delà de  $\beta > 0.7$ , le dommage  $D_{sel}$  surestime légèrement le niveau d'endommagement. Hormis pour  $\beta \leq 0.25$  avec des écarts relatifs de l'ordre de  $\pm$

85%, les estimations  $D_{sel}$  sont quantitativement assez proche de  $D_{exp}$  et les écarts relatifs sont de l'ordre de  $\pm 15\%$ .

Malgré les écarts assez élevés pour des  $\beta$  faibles, les prédictions du dommage  $D_{sel}$  sont jugées satisfaisantes dans le cas où l'on souhaite déterminer le dommage critique de ruine de la structure (qui correspond à des  $\beta$  au delà de 0.25 pour les matériaux polymères).



-(a)-



-(b)-

**Figure 9 :** (a) Evolution comparative du dommage  $D_{exp}$  et  $D_{sel}$  pour  $\alpha=2$ .  
(b) écarts relatifs entre les courbes de  $D_{exp}$  et  $D_{sel}$

## V - CONCLUSION

Ce travail a consisté à une étude expérimentale des effets d'une sollicitation d'impact sur les tubes en PVC rigide. Le but de cette investigation est de proposer un modèle et une méthodologie simples permettant d'estimer en conditions d'exploitation l'état d'endommagement du matériau.

Les essais d'impact à l'aide d'un percuteur de masse 16kg lâchée de différentes hauteurs, ont permis d'observer le blanchiment de l'aire de la zone d'impact (dont les dimensions dépendent du niveau d'impact). Le blanchiment permettant de localiser et dans une certaine proportion de quantifier le dégât occasionné par l'impact, il en est de même de l'aire de la zone d'impact.

Les essais de traction effectués par la suite sur des éprouvettes prélevées de la zone impactée des tubes, ont montré la perte de résistance du matériau. Ainsi, nous avons évalué le niveau du dommage du matériau via le modèle de Bui Quoc (dommage couplé à la contrainte seuil d'élasticité résiduelle). Par analogie à cette expression du dommage de Bui Quoc, nous avons proposé une formulation du dommage couplée à l'aire de la zone d'impact. Ayant ainsi défini le dommage, sa comparaison avec celui de Bui Quoc montre qualitativement de bonne concordance, de même que quantitativement pour  $\beta \geq 0.25$ .

## RÉFÉRENCES

- [1] - Enquête KFW entwicklungsbank-NorthAfric, Maroc : Eau potable (2007)
- [2] - Rendements des réseaux d'eau potable, TSM n°4 bis-90 (2006)
- [3] - J. LEMAITRE, J. L. CHABOCHE, Mécanique des Matériaux solides, Dunod, Paris, (1996) 2e édit.
- [4] - A. LAFORET, J. LAMON, « Static fatigue of multifilament tows at high temperatures above 900°C », paper0316, Proceedings 13th European Conference on Composite Materials (ECCM 13), Stockholm, Sweden, June 2-5, (2008)
- [5] - R. ESTEVEZ, E. VAN DER GIESSEN, "Modeling and computational analysis of fracture of grassy polymers", *Journal of the mechanics and physics of solids* (2003).
- [6] - C. GAUTHIER, R. SCHIRRER, *Journal of Materials Science*, 35 (2000) 2121.
- [7] - B. P. GEARING, L. ANAND, "On modelling the deformation and fracture response of glassy polymers due to shear yielding and crazing". *Int. J. Sol. Struct.* v 41 (2004), 125-3150
- [8] - T. BUI QUOC, J. DUBUC, "Cumulative fatigue damage under strain controlled condition". *Journal of Material*, (1986), 718-737