

"Approche simplifiée d'évaluation de la fatigue et du dommage des matériaux thermoplastiques dans le cadre des missions d'audits des clients : Cas du PEHD"

" Fatima MAJID"¹,

"Mohamed EL GHORBA "¹

¹ " Ecole Nationale d'électricité et de mécanique, laboratoire de contrôle et de caractérisation mécanique des matériaux et des structures, Maroc, majidfatima9@gmail.com "

Résumé :

Le remplacement des tubes en polyéthylène haute densité (PEHD) est très coûteux. Pour de nombreux utilisateurs, tolérer des pertes d'exploitation à cause des problèmes de fabrication n'est pas du tout acceptable. Pour cette raison, ils s'engagent dans de nombreuses missions d'audit auprès des usines de fabrication pour vérifier la conformité technique des matériaux produits vis-à-vis les codes internationaux en vigueur. Voilà pourquoi les fabricants sont de plus en plus prudents et soucieux par rapport aux essais standards à effectuer afin d'assurer une bonne qualité des produits et répondre aux spécifications des codes.

Le PEHD est largement utilisé dans les différents domaines industriels tels que la tuyauterie à haute pression et le revêtement interne et externe des pipes. Lors de l'utilisation de ces matériaux de nombreuses spécifications doivent être respectées et vérifiées pour éviter les dommages matériels et les pertes d'exploitation , à cause des erreurs de conception ,et le mauvais déroulement des essais standards. Les règles de conception sont précisées par les différents codes ISO, DIN, ASTM, BS et ASM.

Dans cet article, un examen des codes ASTM et ISO qui prennent en charge les polymères PEHD est présenté; spécifiquement une étude des méthodes de calcul à la fatigue, et du dommage de PEHD et des essais à entreprendre à travers les différents codes, est discutée.

une comparaison des résultats expérimentaux des essais de traction et du calcul de dommage est faite pour de nombreux polymères thermoplastiques tels que l'ABS, le PVC et le PEHD. Enfin, nous avons pu établir une procédure montrant les déclencheurs du besoin d'audit et ses différentes étapes.

Mots clés: PEHD, Fatigue, Dommage, Normes des polymères, Audit de contrôle, ISO, ASTM , thermoplastiques.

1. Introduction

La production des tubes à commencé depuis les milieux des années 1950. L'utilisation des tubes en PEHD a énormément augmenté, en raison de sa polyvalence et les avantages qu'elle présente par rapport aux tubes d'acier et de béton

L'utilisation des tubes en PEHD a connu une migration dans le temps qui se manifeste par l'évolution des gammes de produit de PEHD du PE40 au PE100. Ces gammes de produit ont connus des améliorations significatives dans les caractéristiques de la résine de fabrication et dans les procédés de fabrication des tubes en PEHD. Cette évolution n'est pas parfaite et des incidents et des accidents sur les tubes produits apparaissent de temps en temps. Ces incidents induisent des pertes énormes pour les clients en matière de coût et peut être de confiance au choix des matériaux polymères comme le PEHD au profit d'autre type de matériaux. Un taux important des produits achetés par les clients présente des non-conformités généralement difficilement détectables à la réception des produits. Pour ceci, les clients organisent dans la plupart des cas des visites d'audit et de contrôle de qualité auprès des fabricants pour s'assurer que la production des tubes en PEHD se passe conformément aux normes et répondent aux exigences des essais mécaniques de routine. Ces essais vont permettre l'évaluation du dommage et assurer la prédiction de la durée de vie des tubes en PEHD produits. De plus, ces contrôles obligent les fabricants à être plus exigeant en matière d'assurance de la qualité des tubes en PEHD produits. Ils engagent des mécanismes d'essais autonomes et permanent. Et ils envisagent des investissements importants pour se doter du matériel et des équipements nécessaires pour la réalisation des essais suivant la normes [1,3].

Les essais de fatigues sont parmi les essais les plus couteux et sont difficiles à assurer pour ce genre de mission d'audit. Ces essais s'opèrent en mode dynamique et nécessite l'intervention des organismes agréés. Dans cette perspective, une simplification des procédures d'essais s'impose en optant pour des essais statiques au lieu des essais dynamiques qui s'avèrent couteux et difficiles. La théorie unifiée présente l'avantage d'assurer une très bonne évaluation du dommage sans recourir aux essais dynamiques [11] [12].

On optant pour cette approche simplificatrice des essais dynamiques, les auditeurs auront à recourir à des essais plus rapide et plus simple pour se prononcer sur la conformité des matériaux audités et obtenir des résultats simulables à ceux obtenus par l'armada des essais dynamiques.

Dans cet article, une présentation des essais statiques à entreprendre et de l'approche simplificatrice proposé sera détaillée en comparant le PEHD à d'autre polymères objet de l'utilisation de la théorie unifiée.

2. Normes, contrôle qualité et essais standards

Les contrôles effectués par les clients finaux, auprès des fabricants des tubes en PEHD, exigent un échantillonnage des tubes depuis la chaîne de production. Ces échantillons subiront plusieurs essais standards, dites essais de routine. Ces essais ont pour but la validation des caractéristiques déclarées dans les fiches de produit des tubes en PEHD. Donc, les essais commencent par des simples essais de caractérisation à travers des essais de traction statique. Ensuite des essais de détermination de l'indice de fluidité ainsi que la résistance à la pression interne.

D'autres essais peuvent être entrepris optionnellement pour quantifier et évaluer le dommage à travers des essais de fatigue et des essais d'identification de la propagation de la fissure et de la détermination des facteurs d'intensité de contrainte.

Les matériaux plastiques, généralement, et le polyéthylène spécifiquement sont gérés par différentes normes et standards internationaux, à savoir La Société Américaine des Tests et des Matériaux (ASTM) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Le PEHD peut être fabriqué selon les normes ISO ou ASTM. Chaque norme possède des propriétés physiques typiques. Les standards ISO prévoient les caractéristiques ci-dessous et adopte le système européen comme système d'unité.

Propriété	Méthode d'essai	Unité
Density (compound)	ISO 1872-2 / ISO 1183	kg/m ³
Melt flow rate (190°C / 5.0 kg)	ISO 1133	g/10 min
Tensile Modulus (1 mm/min)	ISO 527-2	MPa
Tensile Strain at Break	ISO 527-2	%
Tensile Stress at Yield (50 mm/min)	ISO 527-2	MPa
Carbon Black Content	ASTM D1603	%
Carbon Black Dispersion	ISO 18553	valeur
Oxidation Induction Time (200°C)	EN 728	min
Resistance to rapid crack propogation (S4 test, Pc at 0°C. Test pipe 250 mm, SDR11)	ISO 13477	bar
Resistance to slow crack growth (9.2 bar, 80°C)	ISO 13479	h

Figure 1. Propriétés d'un matériau thermoplastiques suivant les standards ISO

Les standards ASTM prévoient les caractéristiques ci-dessous et adoptent le système américain comme système d'unité,

Propriété	Méthode d'essai	Unité
Density (compound)	ASTM D	gms/cc
Water Absorption	ASTM D570 (24 hr)	%
Melt Flow Index	ASTM D1238 (E)	gms/10 min
High Load Melt Flow Index	ASTM D1238 (F)	gms/10 min
Environmental Stress Crack Resistance	ASTM D1693 (C)	°F, hrs
Ring Environ. Stress Crack Resistance	ASTM D1693 (C)	°F, hrs
Yield Tensile Strength	ASTM D-638 (2 ft/min)	psi
Ultimate Tensile Strength	ASTM D-638 (2 ft/min)	psi
Elongation at Break	ASTM D-638 (2 ft/min)	%
Softening Temperature	ASTM D1525	ft.lbs/in. notch
Brittleness Temperature	ASTM D746	°F
Flexural Modulus	ASTM D3350	°F
Modulus of Elasticity	ASTM D638	psi
Hardness	ASTM D2240	psi

Figure 2. Propriétés d'un matériau thermoplastiques suivant les standards **ASTM**

Nous pouvant récapituler les principaux comme suit :

Propriété	Méthodes d'essai	
Gamme de pression	ASTM D2837	ISO 9080
Densité	ASTM D1505	ISO1183
Contrainte admissible	ASTM D638	ISO 527
l'allongement à la rupture	ASTM D638	ISO 527
Module de flexion	ASTM D638	ISO 178
Durté	ASTM D2240	ISO 858
Coefficient de dilatation thermique	ASTM D696	ISO 11356-2
Température de ramollissement	ASTM D1525	ISO 308
Température de fragilisation	ASTM D746	-

Figure 3. Principaux Propriétés d'un matériau thermoplastiques suivant les standards ASTM et ISO

Les standards ISO et ASTM ont beaucoup de points en commun et sont généralement similaires. Même si les méthodes d'évaluation des caractéristiques suivant les deux normes sont légèrement différentes à cause des méthodes différentes d'essai, il est important que le choix de la gamme des tubes en PEHD doit respecter les exigences minimum déterminées par les études d'ingénierie en utilisant l'un ou l'autre des deux normes.

3. Fatigue et dommage des pipes en PEHD

Le dommage prématuré engendré sur les tubes en PEHD représente le soucis majeur de la plupart des clients utilisant ce genre de pipes. Ces dommages prématurés, peuvent avoir plusieurs origines tel que l'usure par l'abrasion, les attaques chimiques, l'affaiblissement par les rayons UV suite à l'exposition au soleil et surtout des défauts intrinsèques aux matériaux générés lors du procédé d'élaboration ou d'extrusion. Cette situation explique pourquoi nous atteindrons pas la durée de vie prévue par les normes ISO 9080 et ASTM D2837 qui dépasse 50 ans. Ces endommagement, se manifeste par des accidents engendrant parfois des pertes d'exploitation énormes dépassant les pertes matériels directes qui sont généralement peu significatives.

Les méthodes de test à la fatigue sont les mêmes que celles utilisé pour les métaux, avec prise en compte des différences évidentes entre les deux matériaux [2]. Le comportement à la fatigue des matériaux plastiques dépend principalement de la température, de l'environnement, des sollicitations [3], du poids de la molécule et de la densité du poids de la molécule.

La déformation des matériaux plastiques est due à l'énergie mécanique produite à l'issue d'un chargement cyclique. Une bonne partie de cette énergie se transforme en chaleur dans le matériau à cause de la faible conductivité thermique des plastiques. Ainsi, l'élévation de la température dans le matériau dépend du chargement appliqué et du taux de déformation, et bien évidemment les pertes hystérésis augmentent [1]. L'autre partie est due spécialement aux bandes de cisaillement, aux micros vides et aux microfissures [2]. A l'état amorphe d'un polymère, les chaînes moléculaires sont en désordre. Mais à l'état cristallin, les chaînes sont en ordre sur de grandes distances. Les défauts usuels sont constatés lors de la phase de fabrication (Extrusion et injection)

Comme pour les métaux, l'endommagement par fatigue [4] pour les polymères passe par l'initiation d'une microfissure puis sa propagation et enfin la rupture. la rupture par fatigue est la cause de 50 à 90 % de toutes les défaillances mécaniques. Selon [Fatemi,2010],[NASA 1994] pour le métal et aussi [A. J. KINLOCH et R. J. YOUNG,1985] pour les polymères, Les microfissures de l'ordre de de 10 à 100 micro consomme 60 à 80% de la résistance à la fatigue .ç-a-d de la durée de vie du matériau,Ceci est la raison pour laquelle il ya tant d'intérêt dans le comportement des petites fissures de croissance.

La théorie unifié consiste à évaluer le dommage statique (D_s) basé sur des essais de traction ,dont les variables sont les contraintes σ_u qui est la valeur de la contrainte ultime à l'état initial, non endommagé, σ_a qui est la valeur de la contrainte ultime pour différents niveaux d'endommagement et σ_a qui est la contrainte avant la rupture [11][12].

$$D_s = \frac{1 - \frac{\sigma_{ur}}{\sigma_u}}{1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_u}} \quad (1)$$

4. Performance et dommage des tubes en PEHD vis à vis d'autres matériaux

Les polymères peuvent être répartis suivant leurs performances comme suit, les polymères hautes performances comme le PVDF, les matériaux techno plastiques comme le PET et le PPC et les polymères standards comme le PEHD, le PVC et l'ABS. A l'encontre du PVC et de l'ABS qui sont des matériaux amorphe, le PEHD est un matériau semi-cristallin. Cependant, le PEHD est plus performant que le PVC et moins performant que l'ABS [10].

Le calcul de l'énergie spécifique a montré, que la performance des polymères, est meilleur que les métaux et que les matériaux plastiques sont performants au fur et à mesure que leurs contraintes σ augmentent,

La capacité d'absorption et de restitution d'énergie par unité de masse subissant une déformation élastique qui s'exprime par la relation :

$$\frac{w}{m} = \frac{\sigma^2}{2\rho E} \quad (2)$$

Avec σ est la contrainte élastique, ρ est la masse volumique et E est le module d'élasticité.

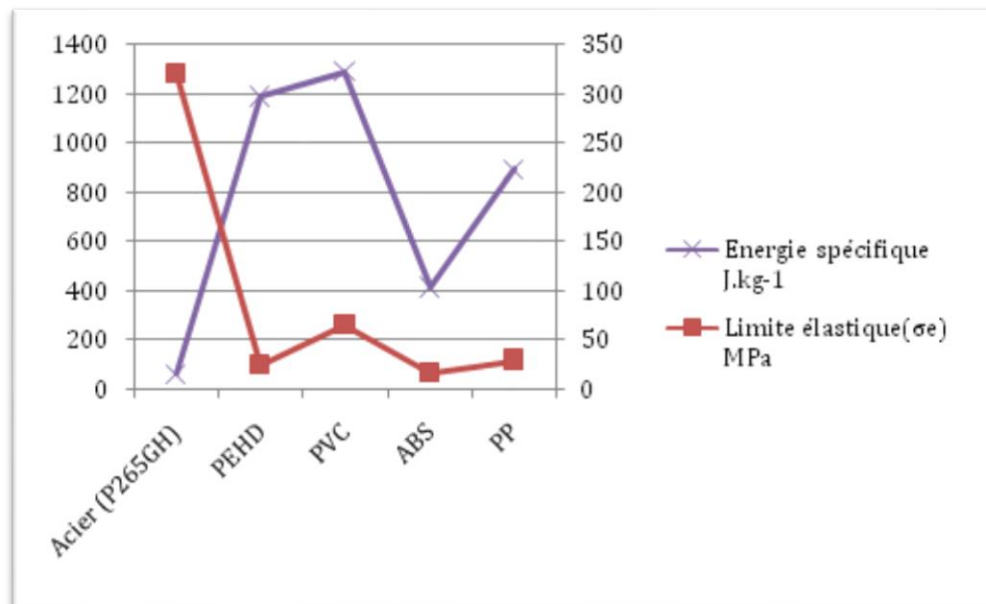
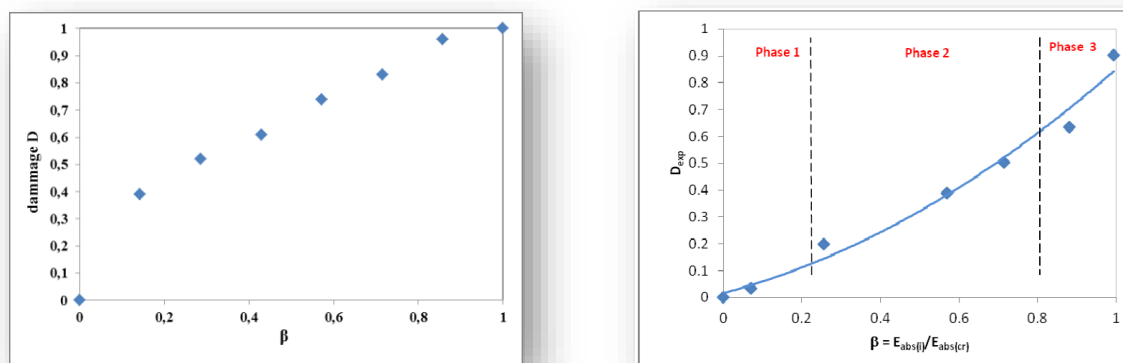


Figure 4. Evolution de l'énergie spécifique et de la limite élastiques pour les quelques matériaux thermoplastiques et l'acier P265GH

Plusieurs études expérimentales se sont intéressées à la caractérisation des matériaux thermoplastiques comme le PVC et l'ABS par des simples essais de traction. L'exploitation de ces essais de traction, nous permettra de caractériser ces matériaux et d'établir un modèle de leur comportement. Et en se basant sur le principe de la théorie unifiée et en faisant des caractérisations après avoir créé des défauts artificiels, nous pouvons évaluer le dommage et prédire la durée de vie des échantillons de contrôle sélectionner par les clients en mission d'audit..

Une série d'essais a été réalisée sur des plaquettes rectangulaires du polymère ABS. Ces plaquettes, qui sont endommagées artificiellement avec des entailles de 1 mm à 7 mm, ont montrées que le dommage passe par deux phases, la première est dite phase d'initiation de dommage et la seconde est une phase critique qui atteint un dommage de 0,98 et une troisième phase de rupture totale, figure 5 [6][8].

D'autres essais d'impacts à faibles vitesses ont été effectués sur des tubes en PVC. Les essais de traction réalisés sur des éprouvettes normalisées prélevées aux alentours de la zone d'impact des tubes, ont permis une évaluation du dommage via le modèle de la théorie unifiée de Bui Quoc, figure 5 [5].



a) ABS

b) PVC

Figure 5. Evolution of the damage versus the fraction of life[6][8] avec β est une fraction de vie en fonction des entailles pour l'ABS et en fonction de la zone impactée pour le PVC[5].

Et pour caractériser le PEHD, une série d'essais d'éclatement basée sur la pression interne, sur des tubes sous pression pour la canalisations de l'eau potable a permis de confirmer cette démarche..



Figure 5. Le bain d'éclatement, et l'exemple d'une éprouvette éclatée

5. Audit de la conformité technique

Le contrôle de la conformité des matériaux par les clients finaux passe par un processus logique permettant de se prononcer sur la conformité des matériaux vis-à-vis les codes et les normes .

Le besoin en audit émane de la nécessité de procéder à des pré-réception avant de d'acheter des tubes en PEHD et aussi des défauts qui apparaissent en début de la durée de vie des tubes en PEHD achetés. La vérification passe par des essais statiques et dynamiques suivant les exigences de la norme. Tout d'abord, les auditeurs commencent par des essais statiques en se basant principalement sur des essais de traction pour caractériser le matériau. Ensuite, ils lancent des essais dynamique pour évaluer la durée de vie du matériau et quantifier le dommage.

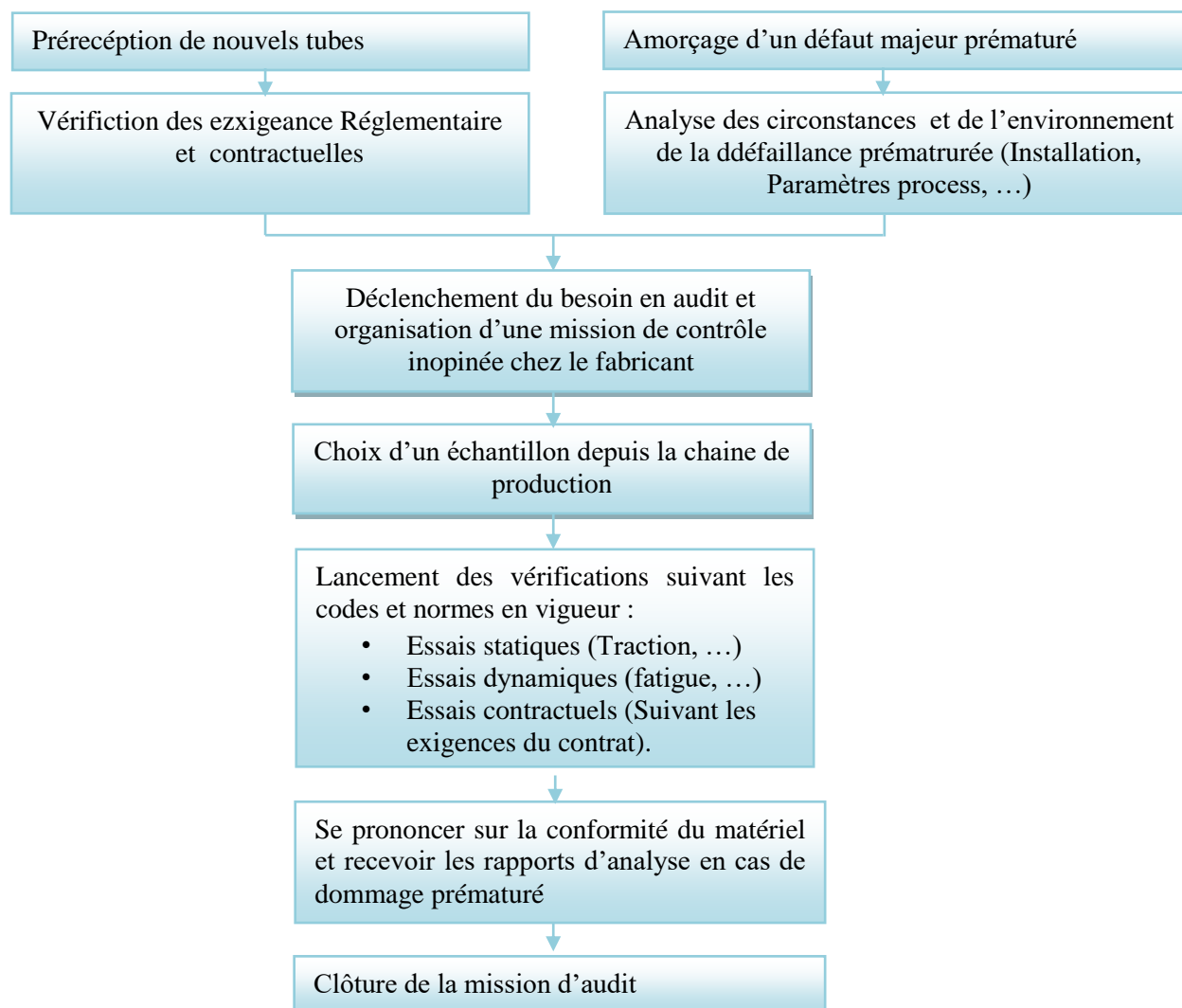


Figure 6. Processus de déclenchement et d'exécution du besoin d'audit

6. Conclusion

Le présent article a démontré la nécessité et l'importance des audits et des contrôles effectués par les clients finaux auprès des fabricants des polymères thermoplastiques. Dans cet article, nous avons présenté le cas du PEHD en comparaison à d'autres matériaux thermoplastiques et à l'acier P265GH utilisé dans la fabrication des tubes en acier sous pression. En effet, nous avons pu proposer une approche énovante permettant d'assoir les règles de contrôle de la conformité technique des tubes en PEHD nouvellement produits. Ainsi nous avons présenté une approche simplificatrice de l'armada des essais dynamiques à prévoir pour évaluer et quantifier le dommage et tirer profit tout simplement des essais de traction statiques. Donc, la réalisation des essais statiques permettra à la fois de confirmer les caractéristiques des tubes en PEHD et de procéder à l'évaluation du dommage et de prédire la durée de vie moyennant la création de défauts artificiels et l'utilisation de la théorie unifiée.

Dans cet article, nous nous sommes basés sur les caractéristiques principales du matériau PEHD qui sont la module d'élasticité, la limite élastique, la limite à la rupture et les caractéristiques propre à la constitution du matériau qui sont la densité et la masse volumique. Une comparaison des énergies spécifiques des différents matériaux comparés nous a permis de constater une proportionnalité entre la limite élastique des différents matériaux et l'énergie spécifique de ces derniers. Enfin, nous avons pu établir une procédure montrant les déclencheurs du besoin d'audit et ses différentes étapes.

7. Bibliographie

- [1] A. Kumar, fundamentals of polymer engineering , *Second Edition Revised and Expanded*. 2001.
- [2] F. W. Billmeyer and J. Wiley, *Textbook of Polymer Sc Third Edition*. 1984.
- [3] S. Maiti and P. H. Geubelle, "A cohesive model for fatigue failure of polymers," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 72, no. 5, pp. 691–708, 2005.
- [4] R. P. M. Janssen, D. De Kanter, L. E. Govaert, and H. E. H. Meijer, "Fatigue life predictions for glassy polymers: A constitutive approach," *Macromolecules*, vol. 41, no. 7, pp. 2520–2530, 2008.
- [5] K. Mansouri, C. B. Fokam, M. Chergui, and M. El Ghorba, "Revue de Génie Industriel Impact des tubes PVC rigide : Méthodologie numérique de détermination du craquelage et corrélation dommage / craquelage," pp. 13–23, 2012.
- [6] H. Farid, K. Elhad, M. Elghorba, F. Erchiqui, and M. Chergui, "damage Characterization of a thin plate Made of ABS under uniaxial solicitation Damage Characterization of a Thin Plate Made Of ABS under Uniaxial Solicitation," no. January 2016, pp. 10–17, 2013.
- [7] R. a Pethrick, E. M. Pearce, and G. E. Zaikov, *POLYMER PRODUCTS and POLYMER CHEMICAL PROCESSES POLYMER CHEMICAL PROCESSES*. 2014.
- [8] I. Makadir, M. Barakat, M. Elghorba, and H. Farid, "Study of Damage to ABS Specimens Submitted To Uniaxial Loading," pp. 5–8, 2015.
- [9] M. Subramanian, *Basics of Polymers: Fabrication and Processing Technology*. 2015.
- [10] E. C. Engineering, F. M. Books, and J. Us, *I . W .*.
- [11] M. Elghorba, Évolutions du dommage et de la propagation de la fissure sous chargement cyclique de l'acier A36 et l'aluminium 6351-T6. 1986.
- [12] Dubuc, Julien, et al., Unified theory of cumulative damage in metal fatigue (Cumulative damage in metal fatigue, suggesting unified theory applicable to stress or strain controlled conditions)." WRC Bulletin (1971): 1-20.