

INFLUENCE DU FLUAGE SUR LES ORGANES DE LUTTE CONTRE LES INFILTRATIONS DANS LES MASQUES D'ÉTANCHÉITÉ DES BARRAGES EN TERRE

Kamal GHOUILEM¹, Rachid MEHADDENE², Mohammed KADRI³

¹ CLaboratoire LGEA, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou BP 17 RP, Tizi-Ouzou 15000, Algérie, ghouilem@yahoo.fr

² Laboratoire LGEA, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou BP 17 RP, Tizi-Ouzou 15000, Algérie, rmehaddene@yahoo.fr

³ Laboratoire LGEA, Université Mohammed Bougara Boumerdes, Algérie, dzkadri@yahoo.fr

CONTEXTE

L'objectif de cette étude, était de déterminer s'il est possible de construire des barrages en enrochement avec masque amont en béton bitumineux sur des dépôts d'alluvions granulaires. Pour ce faire, la prédiction de son comportement sous l'effet de fluage et de la température constitue un élément important, dans la mesure où la détermination des déformations de fluage sous l'effet de la poussée hydrostatique de l'eau pendant le remplissage du barrage, constitue l'axe principal de notre recherche.

A titre illustratif, l'édification d'un barrage en enrochement avec masque en béton bitumineux revient moins coûteux que d'autre solution (voir tableau suivant).

Type de barrage	Montant en 10 ⁶ DA
Masque en béton bitumineux	189,0
Noyau en béton bitumineux	191,8
Noyau argileux épais	198,5
Masque en béton armé	198,7

Le tableau résume le coût de chaque solution, il résulte de cette étude économique que la solution du masque en béton bitumineux présente le plus d'avantages en particulier au point de vue :

- Coût,
- Etanchéité totale du barrage,

- Inspection du masque à tout moment,
- Réparation facile en cas de défaillance,
- Réalisation après exécution des travaux de remblai,
- Adaptation à une déformation raisonnable de la recharge amont sous l'effet de son propre poids et de la charge de l'eau du réservoir, suite à la consolidation de la fondation.

A signaler, que cette solution d'étanchéité peut s'appliquer à plusieurs types d'ouvrage tels que :

Barrages, canaux, réservoirs, bassins de lagunage d'eaux usées, bassins de stockage de boues industrielles, décharges contrôlées, etc...

Son importance réside dans l'excellente résistance du bitume à de nombreux produits chimiques et aux micro-organismes.

1. INTRODUCTION

Le fluage est une caractéristique majeure d'un comportement non linéaire des matériaux, dans laquelle le matériau continue de se déformer sous une charge constante, il peut provoquer des déformations considérables des ouvrages (2 à 3 fois la déformation instantanée en 3 ans). Le béton bitumineux a un comportement viscoélastique, il est le siège de déformations différées très importantes.

Les barrages en enrochement avec masque amont en béton bitumineux sont de plus en plus utilisés à travers le monde, ils sont constitués de blocs qui peuvent atteindre des dimensions importantes (de quelques dizaines de cm à 1m. Dans notre étude, nous avons pris un barrage de hauteur 72m étanché par un masque amont en béton bitumineux de 20cm d'épaisseur soumis au chargement hydrostatique croissant allant de 0 à 7.2 MPa (figure 1). La digue du barrage est constituée d'un matériau homogène (roche) de caractéristiques physique données en tableau 1.

La déformation permanente est considérée comme étant la première cause générant des dégâts aux enrobés bitumineux [1]. Compte tenu de leurs caractéristiques dues à la nature thermoplastique du liant, le comportement des mélanges d'asphalte est influencé par les conditions d'environnement tels que: régime de pluies, température, gel. Notons que les mélanges bitumineux sont des corps noirs qui absorbent de la chaleur [2].

Il est noté que le phénomène du Fluage dans le domaine plastique est extrêmement complexe. Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés afin de représenter ce phénomène. Ceux-ci ont pu inclure en fonction du temps: la variation de la température, les déformations au fluage et contrainte déformations. Cet article se limite à l'illustration du fluage pour un temps de 20000 heures de chargement hydrostatique du parement amont d'un barrage avec masque amont en béton bitumineux.

Une partie des résultats obtenus a permis de mettre en évidence l'influence de la température sur les déformations de fluage (ϵ_{cr}) en appliquant le modèle de l'équation (1), L'étude est illustrée sous cinq valeurs de température différentes à savoir (25°C, 35°C, 45°C, 55°C et 65°C) et sous trois contraintes différentes (1.69, 3.6 et 5.29 MPa). Le

masque en béton bitumineux est de type HL3 (voir Tableau 2).

Cependant, les mécanismes à l'origine du fluage ne sont pas encore clairement élucidés. La stabilité de la couche bitumineuse est étroitement liée à sa résistance aux efforts

Paramètre de la roche	Valeurs
(Densité) ρ (kg/m ³)	2000
(coefficient de Poisson) ν	0.3
(Cohésion) C (kPa)	12
(Module d'élasticité) E (MPa)	70
(Perméabilité) K (m/s)	1 E -5
(Angle de frottement) ϕ (°C)	37

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du matériau roche

de cisaillement dépendants des valeurs des contraintes appliquées sur le masque d'étanchéité amont.

2. MODÉLISATION PAR ANSYS

Le logiciel Non commercial ANSYS, est l'un des simulateurs puissants d'analyse structural basé sur la méthode des éléments finis. Il est ainsi utilisé dans l'analyse et l'évaluation transitoire des transferts thermique dans les matériaux, le calcul de champ de contraintes résiduelles pendant le chargement, etc. L'analyse effectuée par ANSYS inclut deux étapes, à savoir une étape de modélisation et une étape de calcul [3]. La 1ère étape consiste à modéliser la structure en élément finis en choisissant l'élément qui convient au type d'analyse à effectuer, comme par exemple : l'élément **PLANE 55** convient pour les problèmes thermiques et l'élément **PLANE 42** pour l'analyse de structure. La 2^e étape, est subdivisée en trois à savoir :

1. L'étape pré- processeur : qui consiste à introduire la géométrie du problème, propriétés des matériaux tel que (constantes du fluage, le module de rigidité, coefficient de poisson, densité, conductivité thermique, etc..) et les conditions au limite.
2. Tandis que, dans l'étape solution, on choisit le type d'analyse qu'on doit effectuer.
3. Finalement, les résultats de la solution effectuée sont observés dans l'étape post-processeur.

Afin, de modéliser le fluage, le modèle utilisé dans notre étude est le modèle donné en équation (1). On considère que le matériau est isotropique, et la méthode de solution de base utilisée est celle de Newton-Raphson. Le modèle de déformations incrémentales, équation (1) est appliqué pour évaluer le fluage sous différentes températures (25°C, 35°C, 45°C, 55°C et 65°C) pour trois nœuds chargés différemment avec des contraintes de (1.69, 3.6 et 5.29 MPa).

$$\epsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3+1} e^{-C_4/T/C_3+1} \quad (1)$$

Avec :

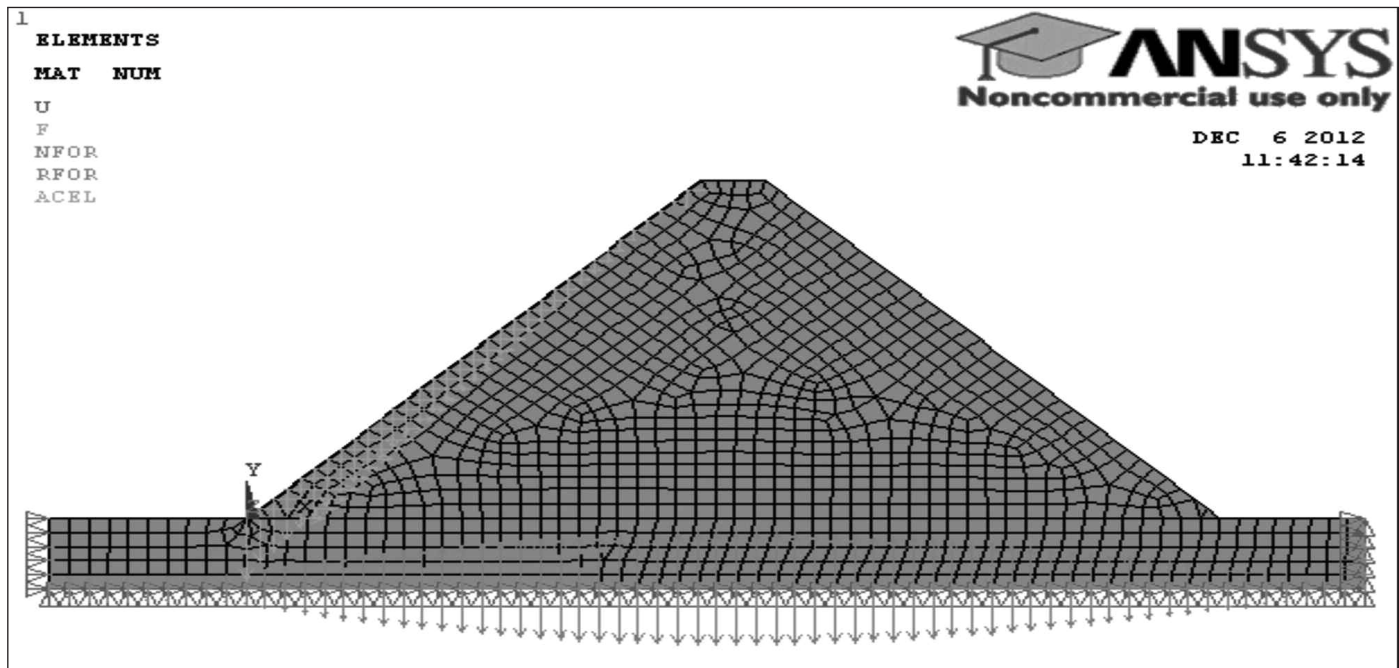


Figure 1 : Discrétisation de la structure et Illustration du chargement hydrostatique du masque amont

- ϵ_{cr} : Déformations de fluage (creep strain)
- σ : Contrainte équivalente (equivalent stress)
- t : Temps du chargement (time at end of sub – steps)
- **C1, C2, C3, C4** : Paramètres de fluage, donnés si après : C1 = 41.10-8 1/s, C2 = 1.48, C3 = -0.63, C4=0,
- **T** : Température du milieu en Kelvin

2.1. Paramètres de fluage du model appliqué

Les paramètres de fluage C1, C2 et C3, C4 utilisés dans l'étude qu'on a effectuée, sont donnés en fonction du type du béton bitumineux et de sa composition, voir tableau 2. En tous, il y a cinq types de mélange d'asphalte qu'on peut utiliser dans la confection des masques d'étanchéité amont des barrages. L'étude qu'on a menée, consiste à déterminer les déformations (ϵ_{cr}) dues au fluage donnée en équation (1), du masque amont des barrages sous des contraintes hydrostatiques croissantes allant de **0** à **7.2MPa** déterminées par la relation : $\sigma = \rho gh/1m^2$.

Le model qu'on a employé est celui représenté par Maxwell Kelvin voight (voir figure 2). Le ressort élastique du model de maxwell représente le module d'élasticité (E) du matériau, la viscoélasticité de l'amortisseur représente la déformation en fonction du temps qui est proportionnelle au contraintes appliquées (σ), et inversement proportionnelle à la viscosité du matériau (η). La réponse viscoélastique de l'amortisseur est représentée par (σ/η). La réponse du model de kelvin voight est différente de celle du model de maxwell. Au lieu d'égalité de contrainte dans le ressort élastique et l'amortisseur visqueux, ce model représente la combinaison des deux sous une contrainte donnée. L'amortisseur du model de maxwell représente le patin, il est responsable du phénomène d'écoulement. La valeur de la viscosité (η_v) est la quantité d'équilibre du patin dans le matériau.

2.2. Discrétisation de la structure

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités à traiter le problème en éléments finis à deux dimensions

	Paramètre des matériaux				
	Elastique		Paramètres de Fluage		
	E(kPa)		C1 (x10-8)	C2	C3
HL3	950000	0.41	41	1.48	-0.63
SMAL	80000	0.42	509	1.04	-0.78
SMAG	800000	0.42	138	1.31	-0.68
SP19D	1600000	0.39	66	1.20	-0.68
SP19E	1400000	0.40	72	1.20	-0.64

Tableau 2 : Paramètres de fluage et d'élasticité pour les différents types des bétons bitumineux [4]

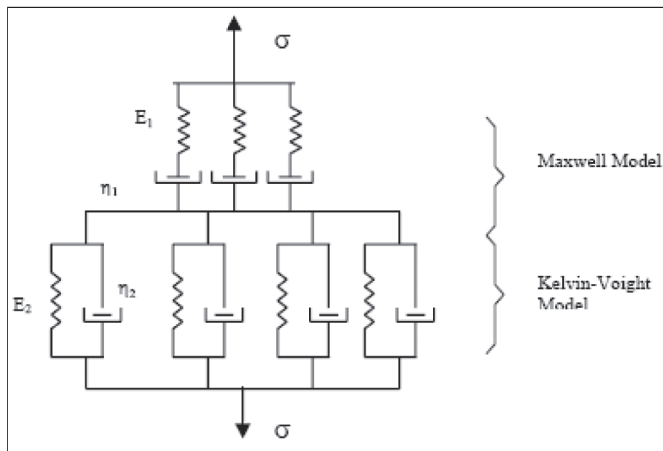


Figure 2 : Modèles de Maxwell et Kelvin Voigt

montré en figure 1. Dans ces modèles, le corps du barrage (digue), le sol de fondation ainsi que le masque d'étanchéité en béton bitumineux ont respectivement : 701, 335 et 105 éléments finis. La discrétisation de la structure entière est faite à base des éléments en 2D, de type rectangulaire à quatre nœuds (PLANE 42). Le nombre de nœuds au niveau de la digue, le sol de fondation et le masque amont sont de l'ordre de 670, 408 et 144 nœuds respectivement. La matrice des éléments est calculée en utilisant la méthode d'intégration numérique de Gauss [5]

L'étude se focalise sur la modélisation d'un masque en béton bitumineux de deux couches successive, de 20cm d'épaisseur, du barrage **Ghrib** situé sur le cours supérieur de Oued Chlef, en Algérie. Le masque est plaqué sur le talus amont par l'intermédiaire d'une couche drainante en béton de ciment poreux de 10 centimètres d'épaisseur, à laquelle il est rendu adhérent par un enduit bitumineux [6] (voir figure 3 et figure 4 suivantes).

Construit entre 1926 et 1938, le barrage du **Ghrib** a été des premiers ouvrages en enrochement réalisé avec un masque

amont en béton bitumineux. Ce masque a rempli convenablement son rôle d'étanchéité souple, malgré la disparition en 1952 de sa protection thermique en béton poreux [7].

2.2.1. Caractéristiques principales du barrage Ghrib

- Longueur en crête : 270 m,
- Largeur à la base : 148 m,
- Hauteur maximum : 72 m,
- Pentes talus amont : varient de 2/3 à 1/1,
- Pente talus aval : 5/4,
- Capacité de la retenue : 300.10^6 m^3 .

Ce type de barrage n'est pas autre qu'un barrage en enrochement [8] qui est constitué par un tas de cailloux à grande échelle, qui résiste par sa masse aux efforts auxquels il est soumis. Mais n'étant pas étanche par lui-même, il faut lui adjoindre un organe d'étanchéité qui constitue la partie la plus délicate, aussi bien au stade du projet qu'à celui de la réalisation.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce qui suit nous allons illustrer à travers les figures suivantes, les déplacements, les déformations, les contraintes de cisaillement du masque et de la structure (sens X et Y), l'évolution de la température en fonction de la profondeur du masque ainsi que les déformations de fluage sous différentes températures et pressions hydrostatiques.

3.1. Déplacements du masque amont et de la digue

Cette étude a été réalisée en utilisant les procédures d'analyse statique par élément finis du logiciel ANSYS 14. Le

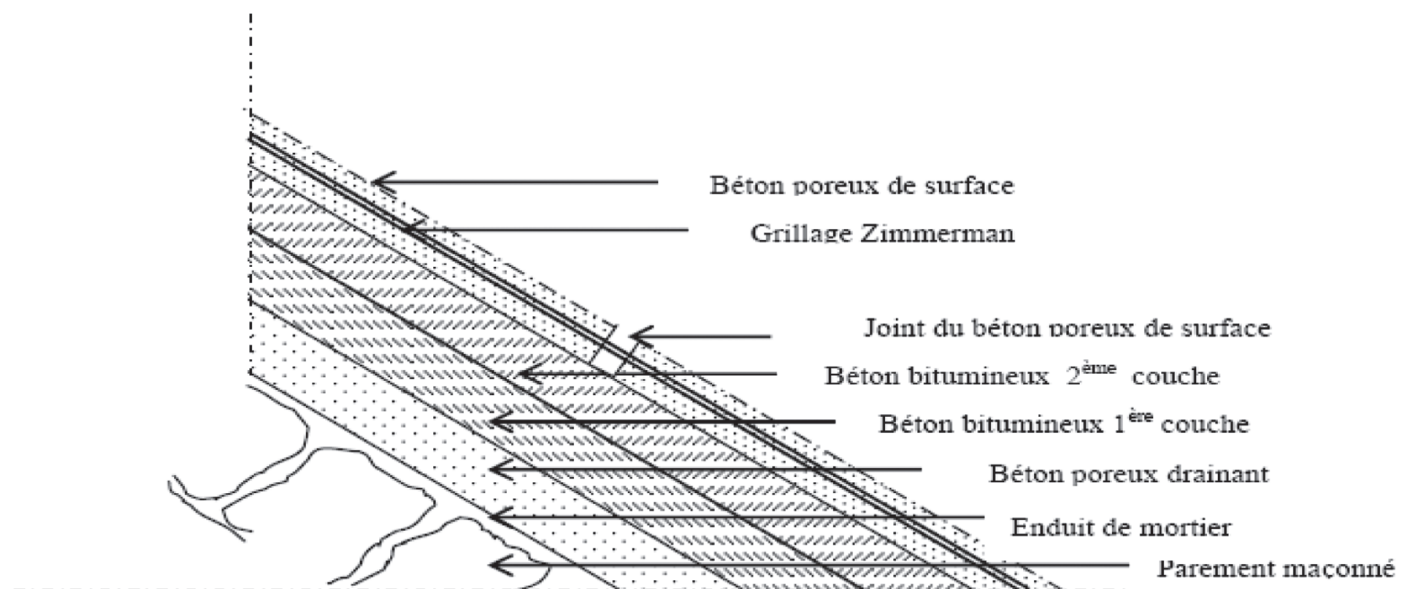


Figure 3 : Illustration d'une coupe de masque en béton bitumineux

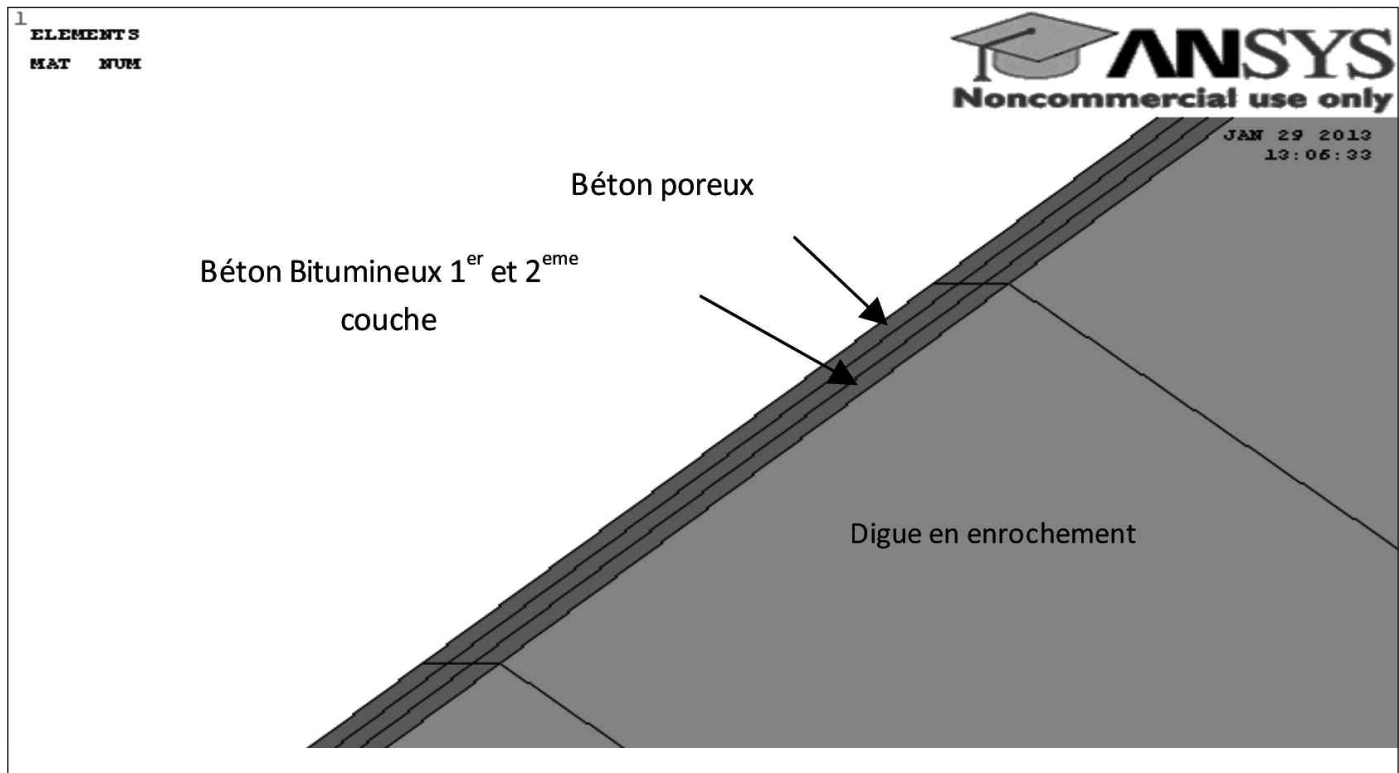


Figure 4 : Discrétisation du masque amont en éléments PLANE 42

barrage en enrochement avec masque amont en béton bitumineux repose sur un dépôt d'alluvions granulaires. Il a une hauteur de 72m, une longueur de 148m et il est discrétisé en couches d'éléments (PLANE 42) à 4 nœuds, de 2.12m de longueur (Figure 1). Chaque couche simule l'addition d'une couche de remblai en représentant un accroissement de charge appliquée. Les résultats des observations

faites par [7] au cours de l'exploitation des barrages algériens avec masque en béton bitumineux ont montrés que : les tassements modérés des massifs et du terrain d'appui, sont de l'ordre de 30 à 35cm pour le barrage du **Ghrib** de 15 cm pour Bouhanifia et de 20 cm pour l'Ighil Emda. La figure 5 suivante, illustre le déplacement du masque et de la digue sous l'effet du chargement hydrostatique.

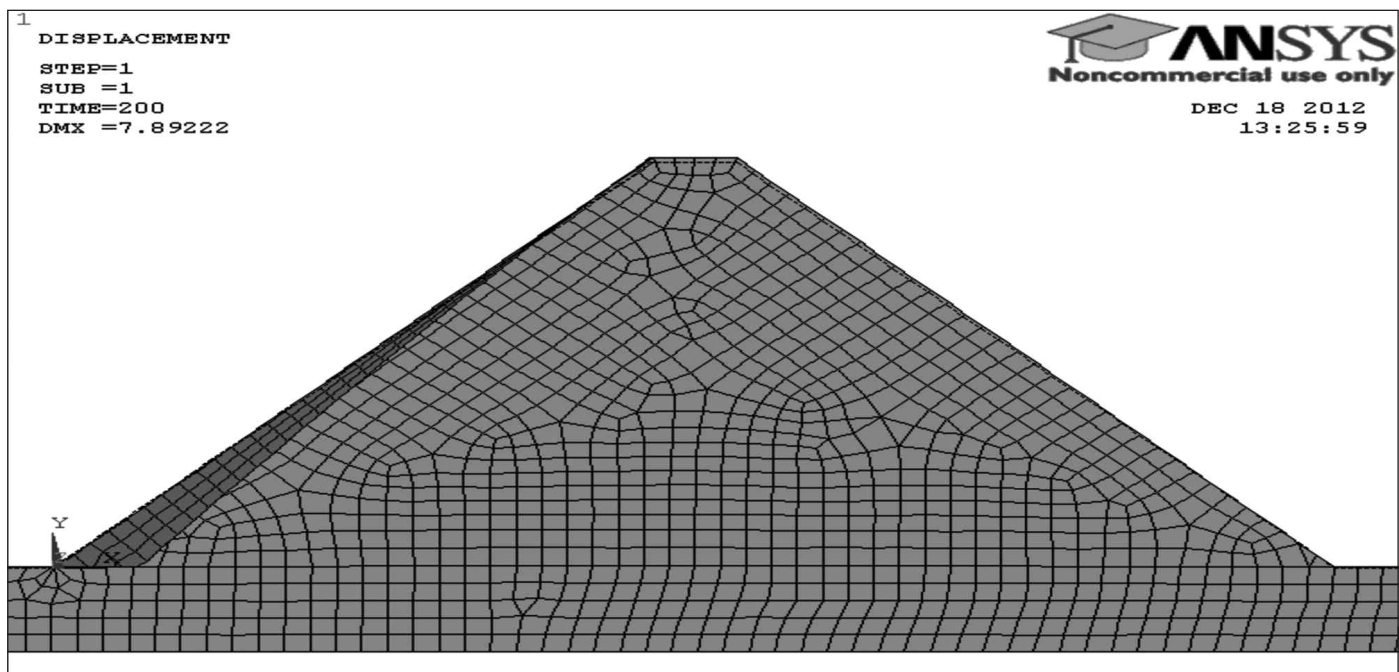


Figure 5 : Illustration des déplacements du masque et de la structure

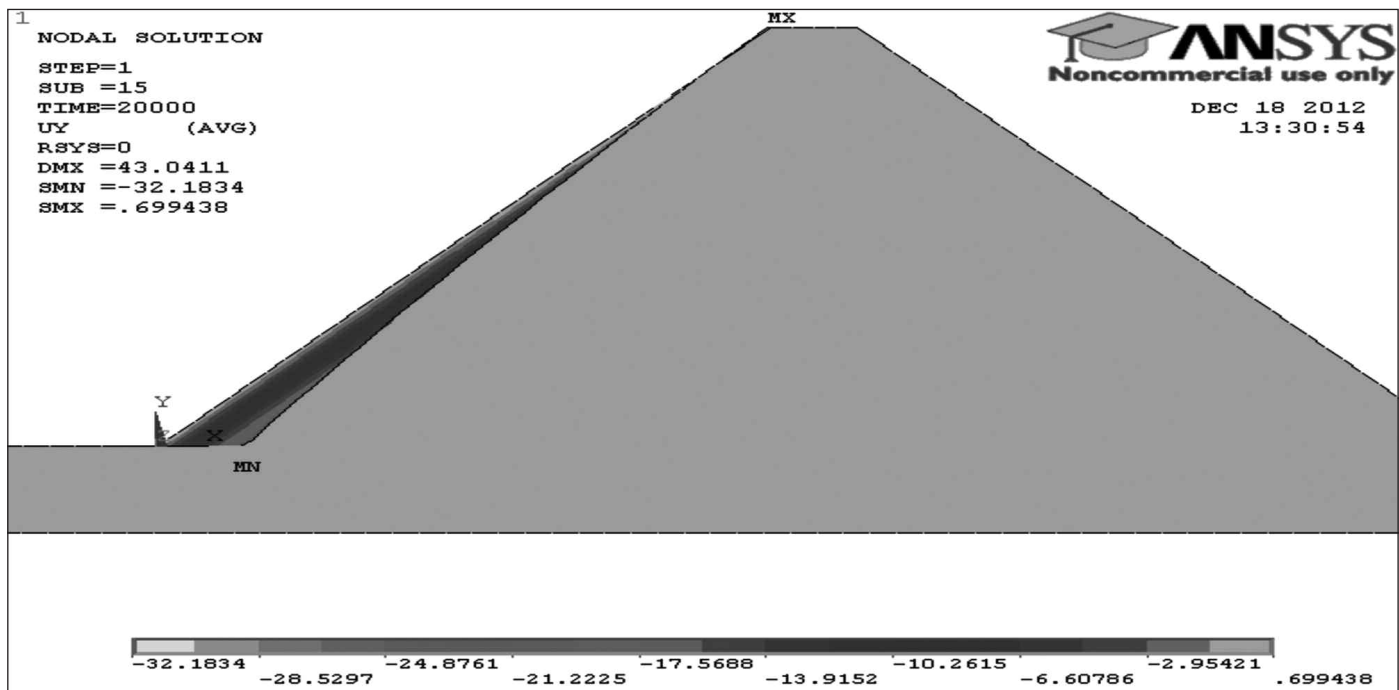


Figure 6 : Illustration des déplacements UY du masque

3.1.1. Déplacements UY

La figure 6 suivante, montre les déplacements UY du masque amont du barrage. Le déplacement maximum (tassement UY) est de 32.1834 cm et celui du corps du barrage est de l'ordre de 0.699cm. On constate que ces résultats sont en concordance totale avec ceux obtenus en observation par [7] sur le barrage **Ghrib**. Lorsque le pourcentage de blocs rompus est égal à 1% le tassement en crête du barrage est égal à 6,5 cm, lorsque ce pourcen-

tage atteint 12% le tassement en crête atteint 31cm. On voit donc que la rupture des blocs peut générer des tassements significatifs [9].

3.1.2. Déplacements UX

La figure 7 suivante illustre les déplacements UX calculés dans la digue. Le déplacement maximal est de 28.579cm et ceux du corps du barrage sont de l'ordre de 0.056cm.

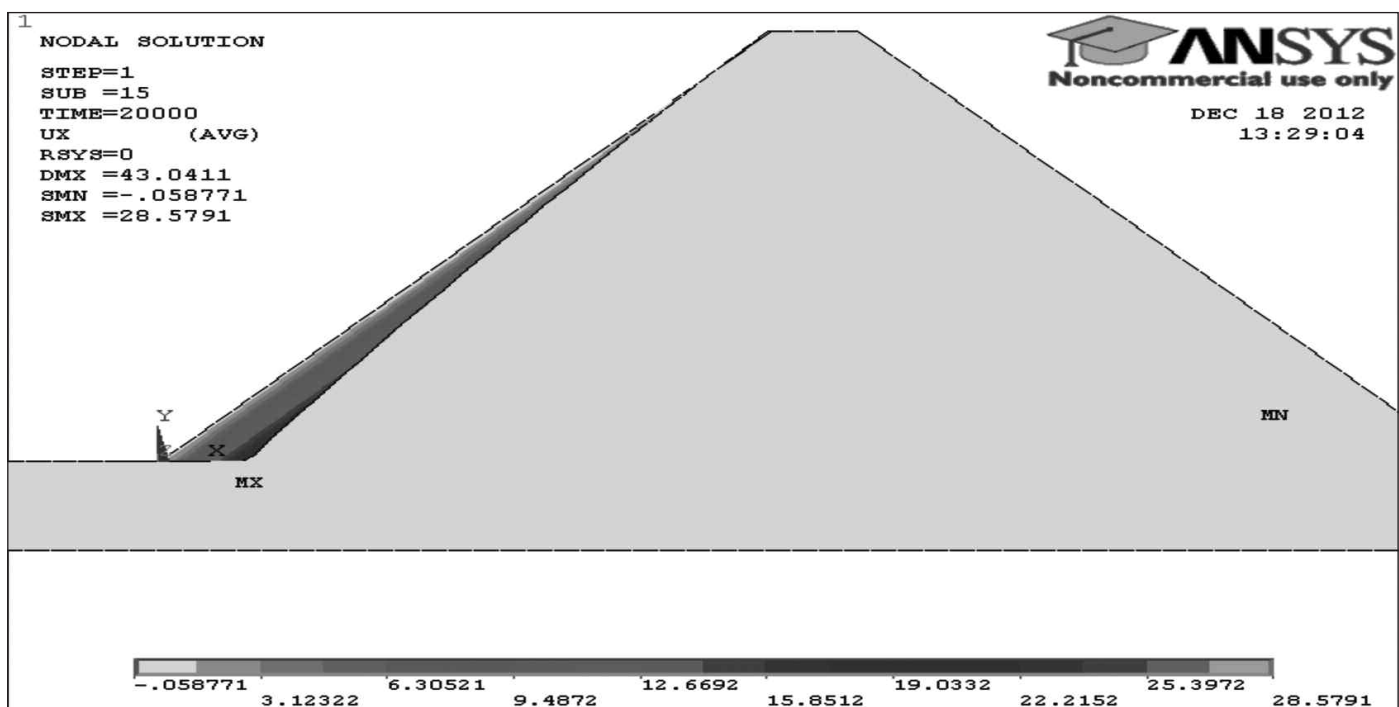


Figure 7 : Illustration des déplacements UX du masque

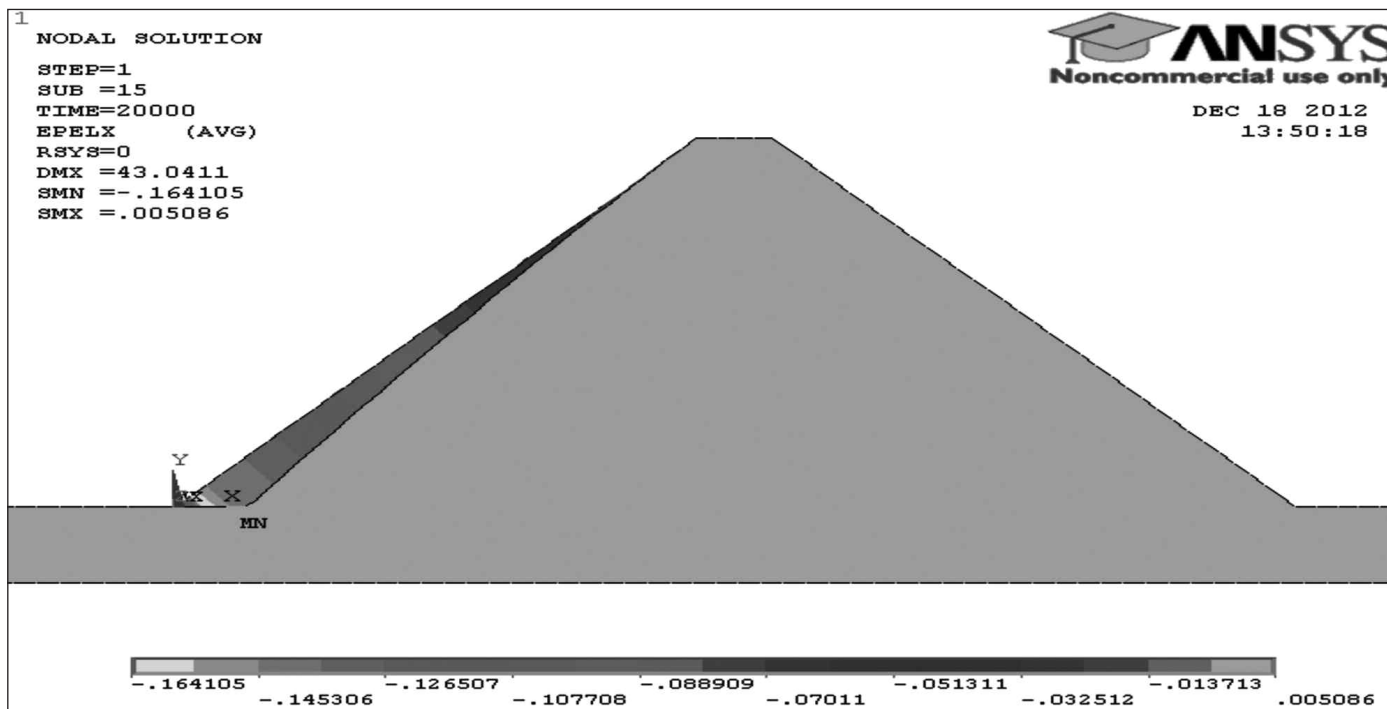


Figure 8 : Illustration des déformations élastiques dans le parement et le corps du barrage

3.1.3. Déformations élastiques et contraintes de cisaillement

Les figures 8, 9 et 10 illustrent, les déformations élastiques horizontales(X), les déformations élastiques dans le plan (XY), ainsi que les contraintes de cisaillement suivant le plan XY.

3.2. Évolution de la température sur le masque et en profondeur

Le changement de la température de l'air (Ta), affecte la viscosité de la surface de l'enrobé bitumineux. [10] ont étudié, l'évolution de la température surfacique (Tp) de l'enrobé bitumineux en fonction de la température ambiante de l'air et ils ont exposés l'équation empirique (2) suivante:

$$T_p = T_a \left(1 + \frac{76.2}{h_1 + 304.8} \right) - \frac{84.7}{h_1 + 304.8} + 3.3 \quad (2)$$

Avec :

1. Tp : température sur la surface de l'enrobé bitumineux
2. Ta : température de l'air
3. h₁ : Epaisseur de la couche bitumineuse en mm

La loi de Fourier ($d^2T/dx^2 = dT/a_1 dt$) évalue l'évolution de la température (Tp) en fonction de la profondeur du masque : Les valeurs sont affichées dans le tableau (3) suivant :

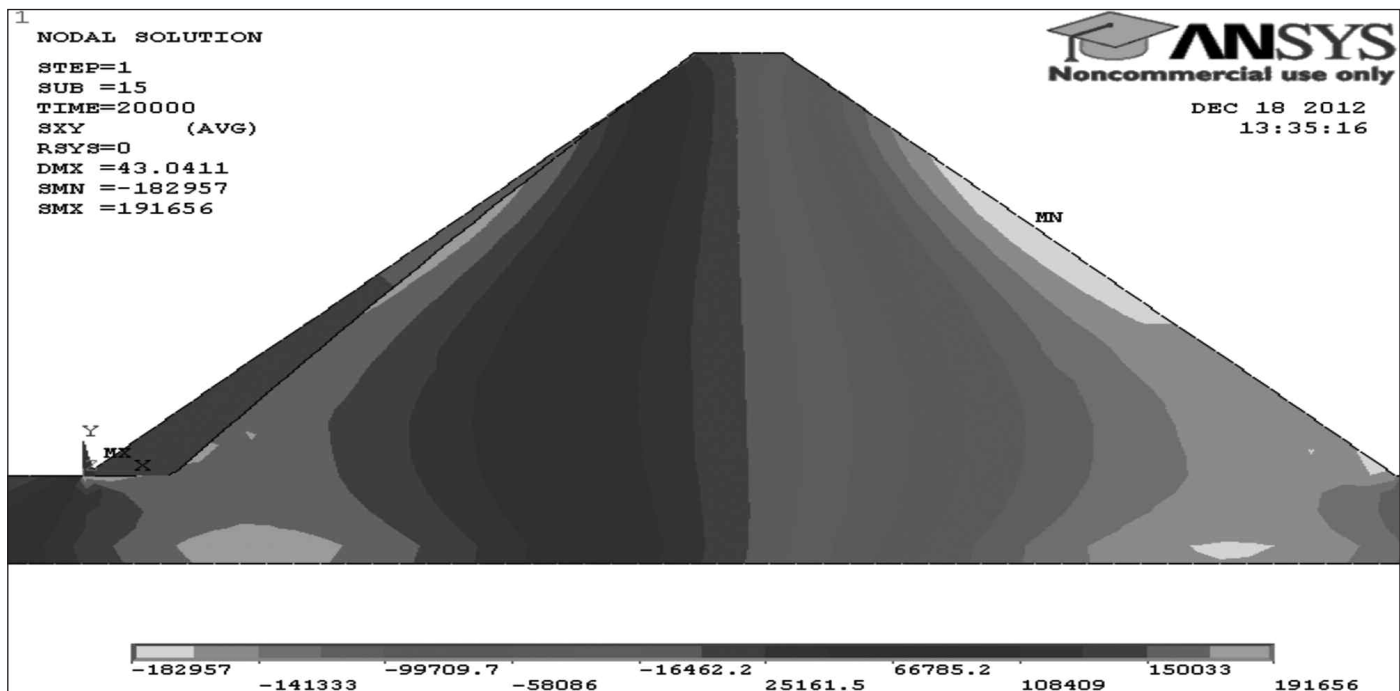
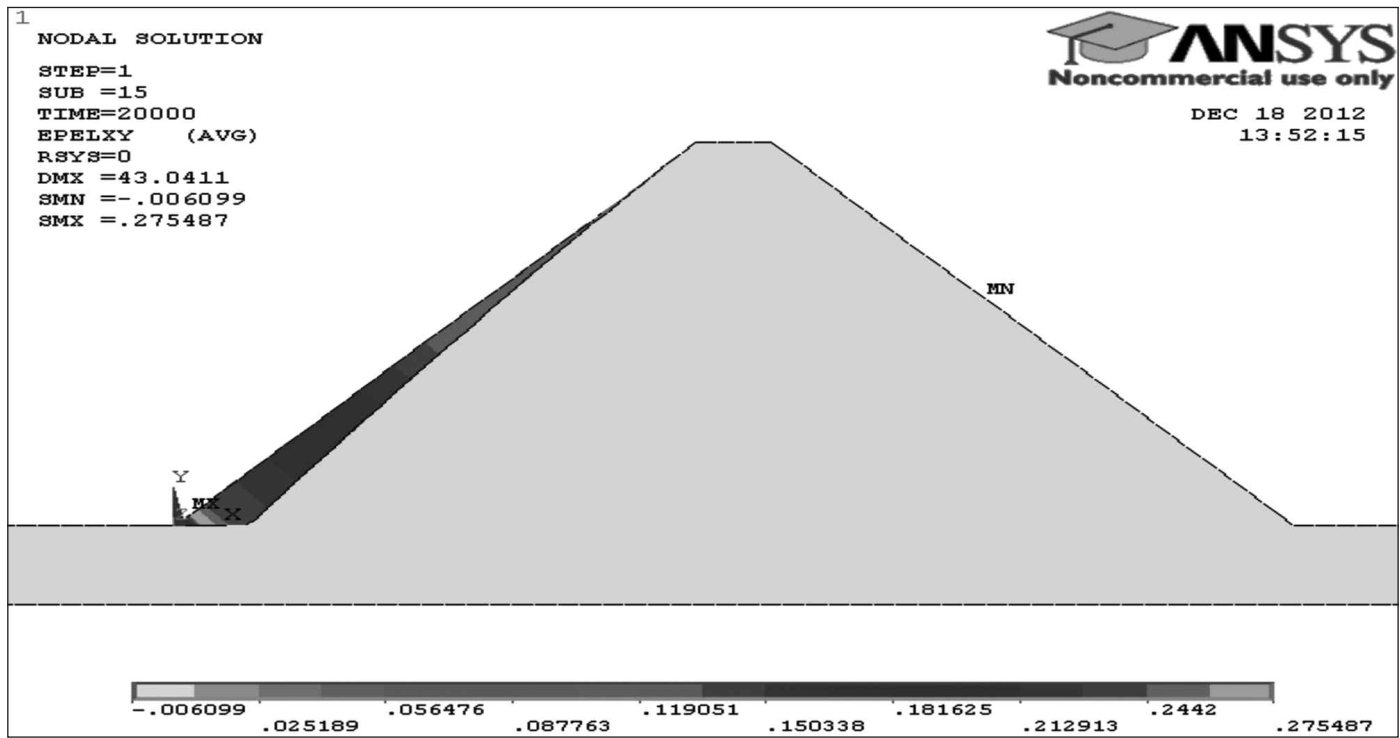
A titre illustratif, on montre à travers la figure 11 et 12 suivantes, l'évolution de la température 45°C en fonction du temps et de la profondeur du masque. On constate, qu'elle atteint 69°C en 2h30 sur la surface du masque (figure 11) ensuite elle diminue jusqu'à ce qu'elle atteinte 50°C à une profondeur de 0.3m (figure 12).

3.3. Effet de la température (T) sur la déformation de fluage (ε_{cr})

La connaissance des déformations de fluage en traction et en compression est très importante pour estimer les

Températures (Ta de l'air)	17°C		28°C		32°C		40°C		45°C	
	Eq 2	Ansys	Eq 2	Ansys	Eq2	Ansys	Eq 2	Ansys	Eq 2	Ansys
Tp de la Surface	24.7°	31°	35°	48°	39°	60°	48.4°	65°	54°	69°
T° à 10cm de profondeur		29.5°		40°		50°		55°		60°
T° à 20cm de profondeur		27.3°		35°		48°		50°		55°
T° à 30 cm de profondeur		14°		30°		45°		45°		50°

Tableau 3 : Valeurs des températures données par la relation empirique (2) et le code ANSYS



fissurations induites. Glanville et thomas (1939) [11], ont trouvé des déformations en fluage identiques en compression et en traction pour des charges égales (figure 13). Dans ce qui suit nous allons illustrer à travers les figures suivantes l'influence de la température sur les déformations de fluage. Au cours de cette analyse le paramètre $C4= Q/R$ qui représente le coefficient de l'énergie d'activation du matériau n'est pas nul. Cette

théorie considère que le fluage résulte d'un processus d'activation thermique au niveau moléculaire. Cette approche (théorie de la cinétique), analogue à celle qui est utilisée pour les métaux, elle consiste en la généralisation de la loi d'Arrhenius. L'énergie d'activation du fluage à l'état d'équilibre, est donnée selon l'équation (3) [12].

Avec :

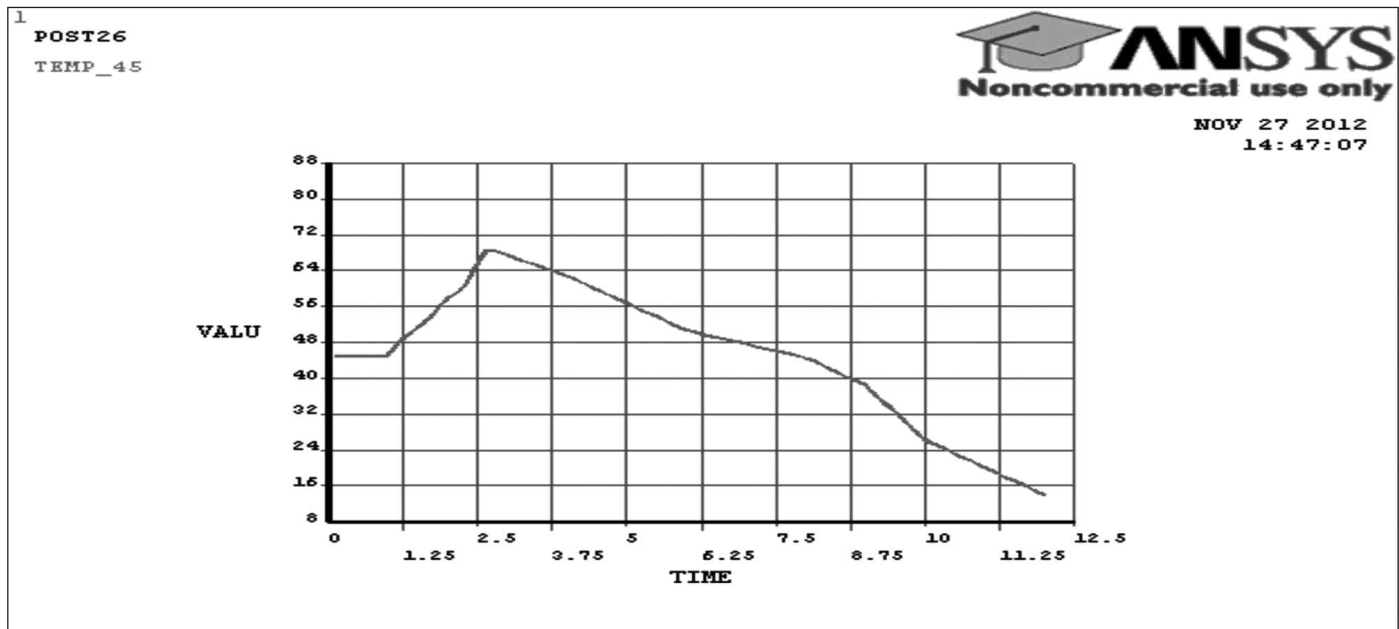


Figure 11 : Evolution de la température 45°C en fonction du temps

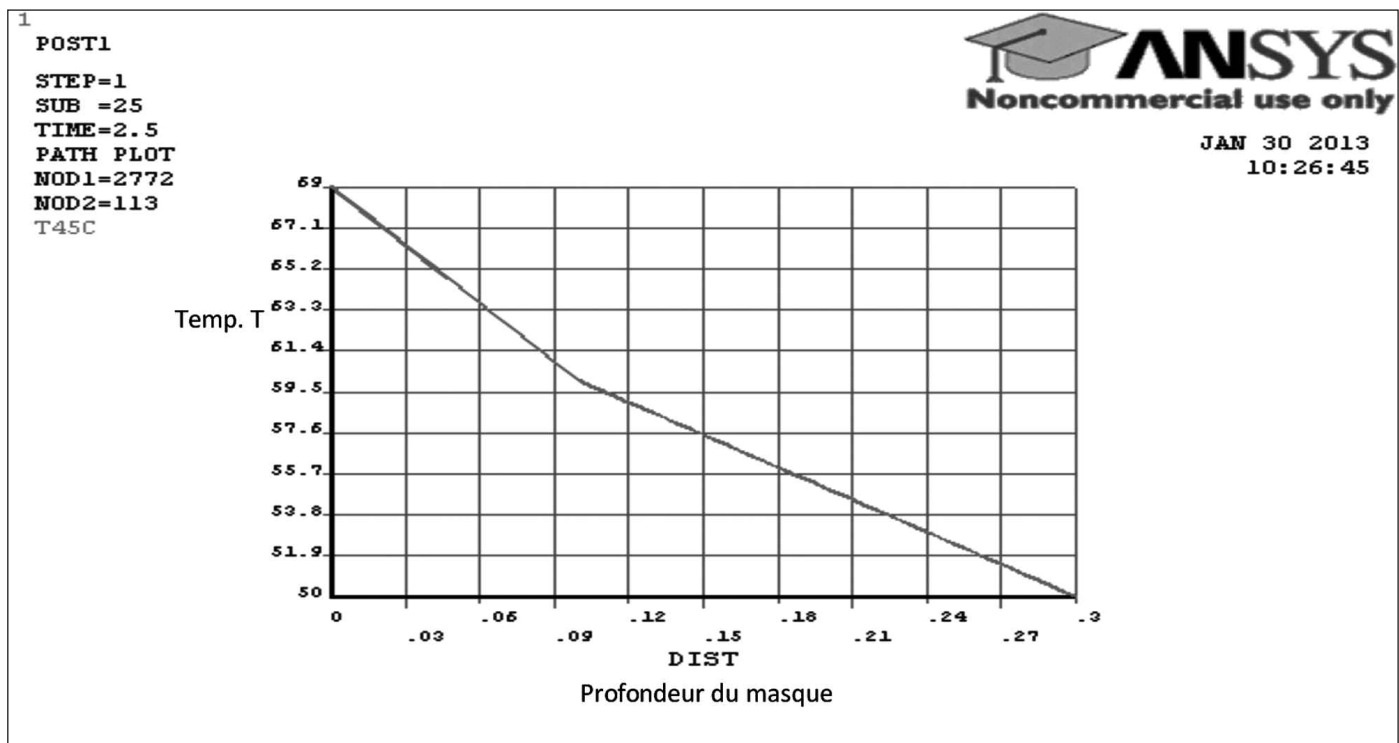


Figure 12 : Evolution de la température 45°C à travers la profondeur du masque

Q : énergie d'activation du matériau, R : Constante des gaz parfait ($8,314 \text{ J.mol}^{-1}\text{.K}^{-1}$), T : température absolue.

On constate à travers la courbe de la figure 14 suivante, que les courbes de déformations de fluage (ϵ_{cr}) sous les différentes températures de (25°C , 35°C , 45°C , 55°C et 65°C) ont un écart de déformations constant de 2 [m/m] . La déformation de fluage à 65°C est de 1.6 fois la déformation de fluage à 25°C .

Sous une contrainte hydrostatique de 3.6MPa , la figure 15 montre les déformations (ϵ_{cr}) de fluage sous des températures de (25°C , 35°C , 45°C , 55°C et 65°C). On constate

à travers cette figure, que les courbes de déformations de fluage (ϵ_{cr}) sous les différentes températures de (25°C , 35°C , 45°C , 55°C et 65°C) ont un écart de déformations constant de 2.5 [m/m] en moyen. La déformation de fluage à 65°C dépasse de 66.66% la déformation de fluage à 25°C .

Pour une contrainte hydrostatique de 5.29MPa , la figure 16 montre les déformations (ϵ_{cr}) de fluage sous des températures de (25°C , 35°C , 45°C , 55°C et 65°C). On constate cette figure, que les courbes de déformations de fluage (ϵ_{cr}) sous les différentes températures de (25°C , 35°C , 45°C , 55°C et 65°C) ont un écart de déformations constant de 4.75

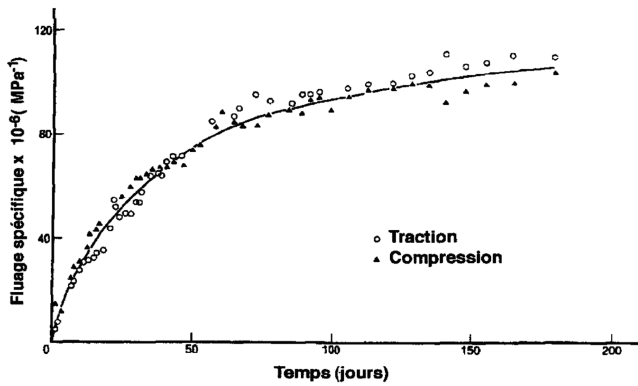


Figure 13 : Fluage spécifique en traction et en compression, d'après Glanville et thomas, (1939)

[$\mu\text{m}/\text{m}$] en moyen. La déformation de fluage à 65°C dépasse de 65.38% la déformation de fluage à 25°C .

4. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer la stabilité des masques en béton bitumineux des barrages en enrochement et de déterminer s'il est possible de continuer à construire ce type de barrages avec masque amont en béton de bitumineux sur des dépôts d'alluvions granulaires de compacité moyenne dans des zones aride et semi aride ou la température de l'ait peut atteindre les 60°C .

Nous avons illustrés à travers les figures précédentes que les déplacements verticaux UY du masque amont et de la digue en enrochement sont insignifiants par rapport à la hauteur du barrage (72m), ils sont de l'ordre de 32.183cm pour le masque et de 0.7cm pour la digue. Les déplacements horizontaux UX représentent 28.579cm et celles du corps du barrage sont de l'ordre de 0.056cm ce qui donne une sécurité de son exploitation.

Pour l'étude au fluage, on a constaté que l'amplitude du fluage est plus importante pour des températures plus élevées, les déformations de fluage mesurées à 65°C , sont plus beaucoup plus élevées que celles mesurées à 25°C . Le taux d'écoulement visqueux augmente avec l'augmentation de la viscosité η et par conséquent la déformabilité du liant augmente. A des hautes températures de service, des changements importants dans la structure interne du béton bitumineux sont enregistrées avec l'accroissement des paramètres intrinsèque tels que la viscosité η et le module de rigidité E. Par conséquent, les déformations enregistrées sont relativement faibles, ce qui constitue un paramètre de sécurité dans l'emploi de ce type de masques comme parement amont dans l'étanchéité des barrages.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. Masad., L. Ashman, D. Little, H. Zbib, Viscoplastic modeling of asphalt mixes with the effects of anisotropy, damage and aggregate characteristics », *Mechanics of Materials*, vol. 37, 2005, p. 1242–1256
- [2] B. Huang, L. -N. Mohammad, G. W. Wathugala, Application of a Temperature Dependent Viscoplastic Hierarchical Single Surface Model for Asphalt Mixtures », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, n° 2, 2004, pp. 147-154.
- [3] ANSYS. ANSYS User's Manual Revision 10. 1st Edn., ANSYS, Inc., USA, 2004
- [4] L. Uzarowski. The development of asphalt mix creep parameters and finite element modelling of asphalt rutting. Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Canada, 2007
- [5] E.L. Wilson, M. Khalvati, Finite elements for the dynamic analysis of fluid–solid systems, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 19 (11) (1983) 1657–1668
- [6] M. Kreitmann, «Variation journalière de la température dans le masque en béton bitumineux», Rapport n° III du

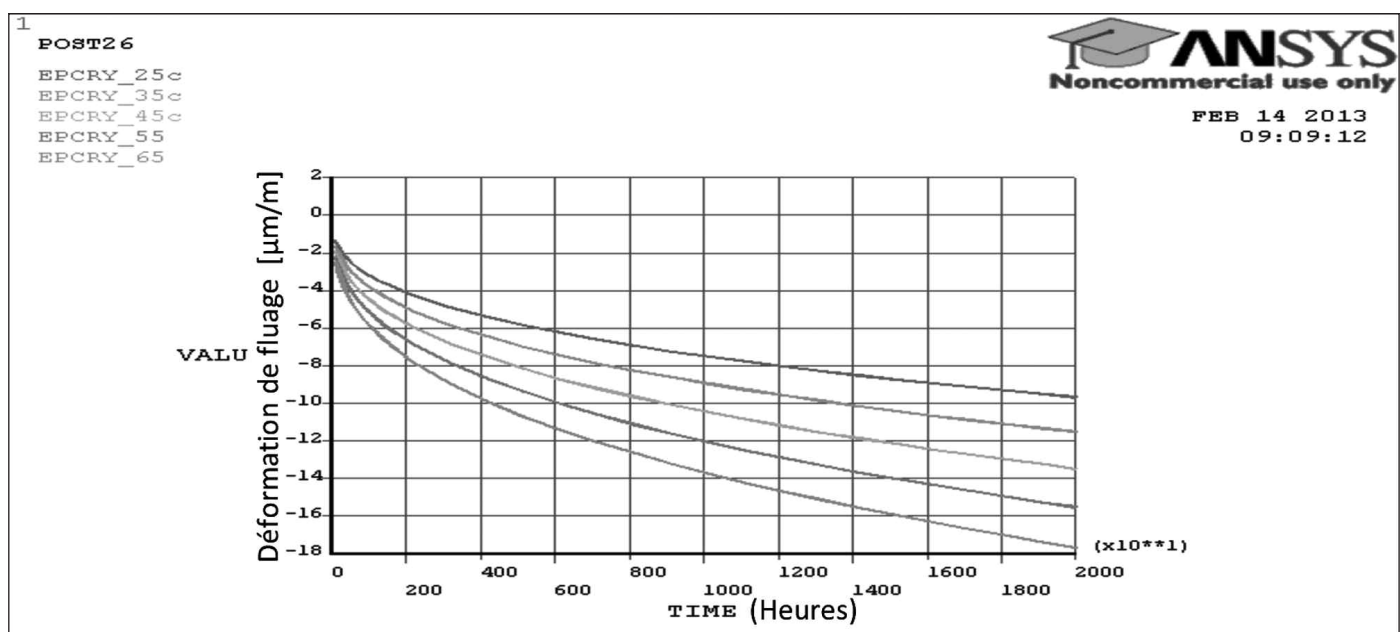


Figure 14 : Influence de la température sur les déformations de fluage sous une contrainte de 1.69 MPa

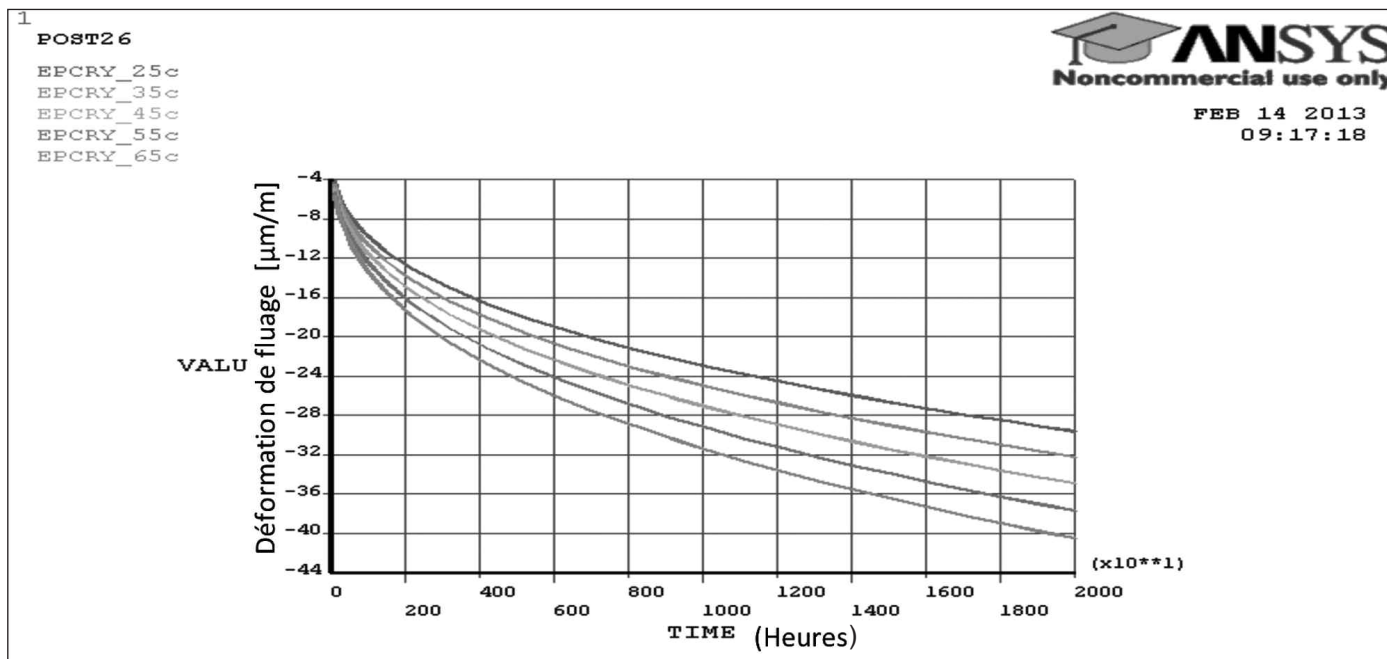


Figure 15 : Illustration de l'influence de la température sur les déformations de fluage sous une contrainte de 3.6 MPa

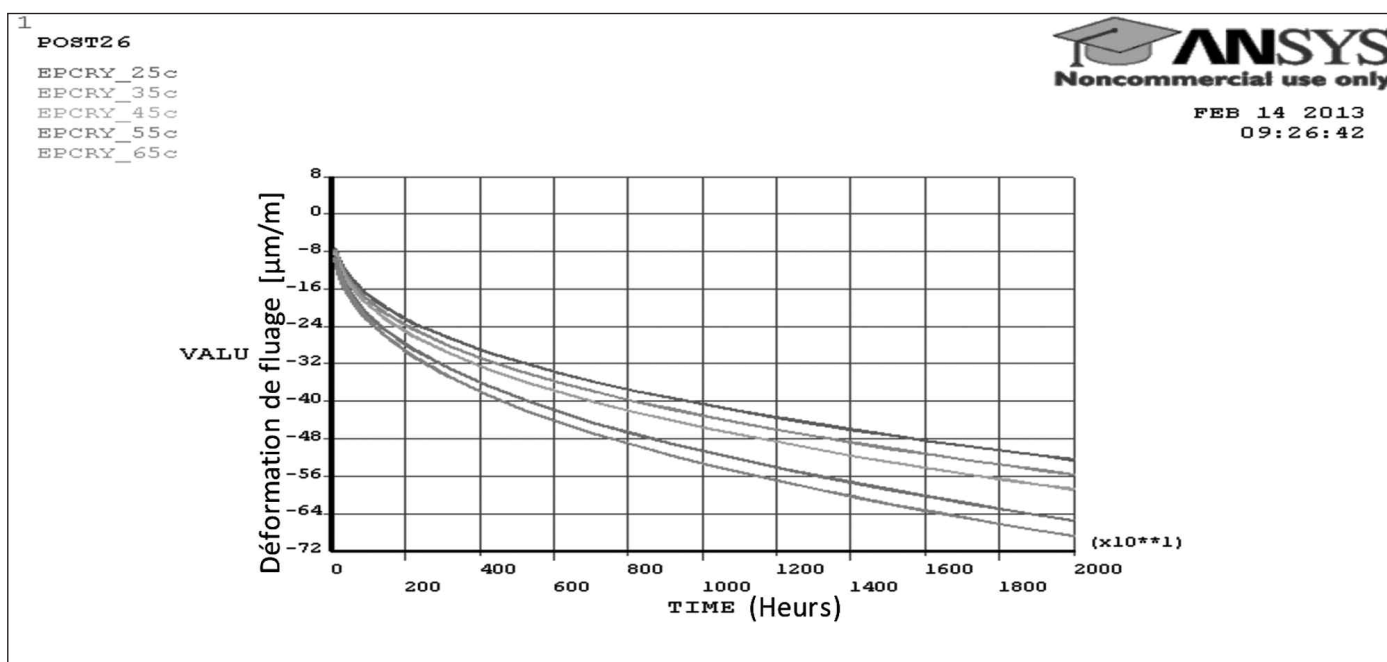


Figure 16 : Illustration de l'influence de la température sur les déformations de fluage sous une contrainte de 5.29 MPa

2/9/59, Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics d'Algérie, 1959, pp 2 - 8.

- [7] Belbachir K., Montel B., Chervier L., « Comportement des masques d'étanchéité en béton bitumineux des barrages du Secrétariat d'État à l'Hydraulique Algérien », XI^e ICOLD, Madrid, Q. 42, R. 51, 1973, pp 1053 -1073.
- [8] Ministère de L'Agriculture, « Technique des barrages en aménagement rural », Nouvelle édition, Paris, 1989.
- [9] CAMBOU B. « Utilisation de la Methode des éléments discrets pour le Dimensionnement en géotechnique », Ecole Centrale de Lyon1, Université de Lyon, 2^e Conférence

Internationale sur le Calcul Numérique en Géotechnique (NUCGE 2011) Alger les 20 et 21 novembre 2011.

- [10] George KP and Husain S, 'Thickness Design for Flexible Pavement: A Probabilistic Approach.' *Transportation Research Record*, 1095 pp 27-36, 1986.
- [11] Glanville W.H., THOMAS F.G., studies in reinforced concrete -IV. Further investigation s on creep or flow under load, *Building research technical*, Paper N° 21, London, 44PP, 1936
- [12] R.W.K.Honeycombe, «The Plastic Deformation of Metals», Edward Arnold, 369 (1984).