

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Laboratoire Géo-matériaux Environnement

(L.G.E.A)

Mémoire de magister

Spécialité : Génie civil

Option : Géotechnique et environnement

Présenté par :

Melle IKENE NAIMA

THEME

MODELISATION DE L'EFFET THERMIQUE SUR UN PAREMENT AMONT

D'UN BARRAGE EN TERRE

Devant le jury composé de :

Mr DAHMANI Lahlou ;	Professeur ;	UMMTO ;	Président
Mr MEHADDENE Rachid ;	Professeur ;	UMMTO ;	Rapporteur
Mr KADRI Mohammed ;	Professeur ;	UMBB ;	Examineur
Mr HAMZA Ali ;	Maitre de conférence A ;	UMMTO ;	Examineur
Mr GHOUILEM Kamel ;	Maitre conférence B ;	UMMTO ;	Invité

Soutenu le : 01/12/2014

AVANT- PROPOS

Ce travail à eu lieu au niveau du laboratoire Géo-matériaux, Environnement et Aménagement (LGEA) de l'Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU.

Je tiens à exprimer ma gratitude, à Monsieur Rachid MEHADDENE professeur à l'Université de Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU d'avoir accepté d'être le rapporteur de ce modeste travail.

Je remercié également, Monsieur Kamel GHOUILLEM Maître de conférences B à l'université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU pour son aide et ses conseils et encouragements qui ont su renforcer ma détermination.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude et respect à Monsieur Lehlou DAHMANI professeur à l'Université de Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU d'avoir assumé la présidence du jury, et toute ma sincère reconnaissance pour son aide précieuse.

Je tiens également à remercier, Monsieur Ali HAMZA maître de conférences A à l'université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, Mohamed KADRI professeur à l'université M'hamed BOUGARA de BOUMERDES, d'avoir acceptés d'examiner ce travail et participer au jury.

Je remercie, Monsieur GABI SMAIL professeur à l'Université de Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU pour son aide, sur l'état des lieux des barrages en Algérie.

Enfin je tiens à remercier du plus profond de mon cœur les personnes qui mon donné tous les moyens pour arriver a ce niveau : mes très chère parents.

J'y associe également mes frères et sœurs, mes neveux et nièces.

RESUME

L'organe d'étanchéité d'un barrage assure la fonction première de l'ouvrage qui est de retenir l'eau, afin d'éviter toutes infiltrations à travers le corps de celui-ci. Dans le cas des barrages en enrochements le matériau utilisé pour assurer cette fonction est le béton bitumineux, ce matériau est connu pour sa susceptibilité vis-à-vis de la température.

Le but de ce projet est de faire, un développement d'une simulation numérique, à l'aide du logiciel commercial ANSYS, du comportement des éléments bitumineux sous l'action de charges thermiques en tenant compte des propriétés thermiques telle que la conductivité thermique, ainsi que l'évolution du phénomène « *contrainte – déformation* » sous des températures imposées à la surface du masque.

Afin de, valider le modèle de la simulation numérique élaborée, les résultats de simulation seront comparés aux résultats obtenus dans la littérature.

Mots Clefs : Barrages en terres, Béton bitumineux, Eléments finis, ANSYS, Température

ABSTARACT

Sealing member dam provides primary function of the structure, which is to hold water, in order avoid all infiltration, through the body of this one. In the case of rock fill dams, the materiel used to perform this function is the asphalt concrete, this material is known for its susceptibility overlooked temperature

The purpose of this project is to make a development of a numerical simulation using ANSYS commercial software, the behavior of bituminous elements under the action of thermal loads taking into account the thermal properties such as thermal conductivity, and the evolution of the phenomenon «constraints - deformations» in temperatures imposed on the mask surface .

In order to, validate the model numerical simulation developed, simulation results be compared with these obtained in the literature.

KEYS WORDS: Embankment dam, asphalt concrete, finite element, ANSYS, temperature

T : température ($^{\circ}\text{C}$).

T_{BA} : Température de ramollissement bille-anneau/ $^{\circ}\text{C}$)

η : Viscosité du bitume

K : module de richesse

T_f : Température de fusion

T_p : Température efficace de couche extérieur $^{\circ}\text{C}$)

T_a : Température moyenne de l'aire mesurée $^{\circ}\text{C}$)

$|E^*|$: Module de rigidité des mélanges bitumineux

E_{bit} : Module de rigidité des bitumes

ε_{cr} : Déformation de fluage

φ : Angle de phasage

ω : Fréquence d'essai en rd/S

G^* : Module de cisaillement du liant

ε^e : Déformation élastique

ε^{vp} : Déformation viscoplastique

σ_{eq} : Contrainte équivalente

σ^0 : Limite d'élasticité

ε_L : Déformation longitudinale

ε_Q : Déformation transversale

γ : Déformation de cisaillement

t_r : Temps de rupture

$\dot{\omega}$: vitesse d'endommagement

$J(t, t')$: Fonction de fluage

$R(t, t')$: Fonction de relaxation

σ_{eff} : Contrainte effective.

a_i : Diffusivité thermique

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$ Diffusivité thermique (m^2/S)

C_p : chaleur spécifique ($\text{j}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$)

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

Q : flux de chaleur

h : coefficient de convection

g : pesanteur

ΔL : Allongement

σ : constante de stephan Bltzman

T_{air} : Température de l'air ($^{\circ}/C$).

T_s : Température de la surface

ε_s : Emissivité de la surface du matériau

$\bar{\lambda}$: Tenseur de conductivité thermique du matériau

$d\Phi$: Flux thermique

$\vec{\varphi}$: Vecteur densité flux

φ : Densité du flux

$[C]$: Matrice de la capacité thermique (j/K)

$[K]$: Matrice de la conductivité thermique (j/K)

$\{F\}$: Vecteur des flux nodaux (w)

$\{T(t)\}$: Températures nodales

ρ : Poids volumique de l'eau (kg/m^3)

h: hauteur du barrage(m)

ν : Coefficient poisson

E : Module de Young (MPA)

$\bar{\varepsilon}$: Tenseur des déformations infinitésimales

σ_{xx} Contraintes suivant xx

σ_{yy} Contraintes suivant yy

σ_I : Contrainte principale suivant S1

σ_{II} : Contrainte principale suivant S2

σ_{III} : Contrainte principale suivant S3

U_{xx} : Déplacement suivant xx

U_{yy} : Déplacement suivant yy

t : Temps du chargement (time at end of sub-steps)

∂W : Variation de l'énergie de fluage

S : Tenseur des contraintes déviatorique

I : Tenseur unité

σ_{VM} : Contraintes de Von Mises

K : est la conductivité thermique du matériau (bitume) ;

T : la température du bitume ;

ρ : La densité volumique du bitume ;

\dot{Q} : La source de chaleur du bitume.

Figure 1.1 : Bitume provenant d'un gisement naturel	2
Figure 1.2 : Procédé industrielle de l'obtention du bitume par raffinage industrielle du pétrole2	
Figure 1.3 : Coupe et aspect de surface d'un enrobé de type béton bitumineux semi-grenu 0/14	3
Figure 1.4 : Macrostructure des asphaltènes, schématisation de la structure colloïdale du bitume, Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux	5
Figure 1.5 : Séparation du bitume : en asphaltènes et maltènes et résines et huiles	5
Figure 1.6 : Schématisation des sollicitations induite par la température	8
Figure 1.7 : Essai TSRST -Evolution de la contrainte en fonction de la température de 0°C à -20°C, avec une vitesse de -10°C/h	12
Figure 1.8 : Appareil développé par Monismith et al. (1965) pour l'essai du retrait thermique empêché.....	13
Figure 1.9 : Exemple d'essai :a) essai de traction –compression (homogène), b) essai de flexion de poutres (non homogène)	15
Figure 1.10 : Classes de comportement des bitumes en fonction de(ϵ) et T, les paramètres (Les paramètres K_C , E, G, E^* , G^* et η sont introduit par la suite	16
Figure 1.11 : Essai de pénétrabilité pour bitume	16
Figure 1.12 : Essai RTFOT	18
Figure 1.13 : Essai de PAV	18
Figure 1.14 : Expérience d'effacement (à gauche) et réponse du matériau en contrainte (à droite)	19
Figure 1.15 : Essai de fluage –comportment à contrainte constante	20
Figure 1.16 : Sollicitation à contrainte variable dans le temps.....	20
Figure 1.17 : Essai de relaxation –comportement à déformation constant.....	21
Figure 1.18 : Résultat classique pour l'essai de traction sur enrobés21	
Figure 1.19 : Eléments de Maxwell (liquide viscoélastique)	23
Figure 1.20 : Élément Kelvin-Voigt (solide viscoélastique).....	24
Figure 1.21 : Modèle de Maxwell généralisé	24
Figure 1.22 : Modèle de Kelvin-Voigt généralisé.....	23
Figure 1.23 : représentation du modèle de Huet	26
Figure 1.24 : Représentation du modèle de Huet-Sayegh(1965) h et k sont deux éléments à fluage parabolique	27

Figure 1.25 : a) modèle généralisé d'après Di Benedetto (1987),b) structure choisie comme modèle discret pour les enrobés bitumineux	28
Figure 1.26 : Critère de rupture de Di Benedetto pour les enrobés bitumineux. a) représentation dans les axes contraintes axiale (σ_1)- contrainte radiale ($2\sigma_2 = 2\sigma_3$) et dans le plan déviatorique ;b) représentation dans l'espace des contraintes principales($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).....	29
Figure 2.1 : Evolution du volume de remplissage des barrages	34
Figure 2.2 : Moyenne de la capacité estimée en 2001/2009	35
Figure 2.3 : graphe de l'ancienneté des barrages Algériens	40
Figure 2.4 : Barrage de Meurad (Tipaza)	41
Figure 2.5 : Localisation des barrages en exploitation (Rapport régional)	43
Figure 2.6 : Barrage de Beni Haroun.....	44
Figure 2.7 : Barrage de Tichihaf (Bejaia).....	44
Figure 2.8 : Barrage en poids	44
Figure 2.9 : Barrage Voute.....	45
Figure 2.10: Barrage a contrefort	45
Figure 2.11 : Coupe d'un barrage en enrochement.....	47
Figure 2.12 : Erosion hydrique sur le versant du barrage de Bouhamdane (Guelma)	48
Figure 2.13 : Envasement du barrage Ms Abed (Relizaine)	49
Figure 2.14 : Evolution de l'évaporation dans les barrages Algériens (39barrages) Légende A.E.P : Adduction en eau potable .Irr: irrigation, I : industrie	50
Figure 2.15 : Variation des débits de fuites dans les barrages Algériens	53
Figure 2.16 : Coupe d'un barrage à masque amont	58
Figure 3.1 : Bilan énergétique au sein d'un volume élémentaire.....	65
Figure 3.2 : Discrétisation d'un élément (exemple d'un barrage en terre a masque amont en béton bitumineux	69
Figure 3.3 : Méthode d'approximation.....	70
Figure 3.4 : Exemple d'un élément linéique formé par trois nœuds.....	76
Figure 4.1 : Coupe sur un barrage en enrochement.....	89
Figure 4.2 : Coupe du masque étanche.....	91
Figure 4.3 : Modèle du barrage utilisé	91
Figure 4.4 : type d'éléments utilisés.....	92
Figure 4.5 : représente l'élément discrétisée en sous domaines Ω_i , c'est l'étape du maillage dans ANSYS (méthode des éléments finis).....	95
Figure 4.6 : coupe sur l'élément discrétisé en sous domaine	95

Figure 4.7 : conditions aux limites thermiques.....	102
Figure 4.8 : conductivité thermique varie avec la température à 35°C	102
Figure 4.9 : Géométrie du gradient thermique	103
Figure 4.10 : Profilé des températures a t=3h a température de 35°C.....	103
Figure 4.11 : Profilé des températures à T= 6H à T=35°C.....	104
Figure 4.12 : Profilé des températures a T= 12h à T=35°C	104
Figure4.13 : évolution de la température dans deux nœuds en fonction du temps à 35°C....	105
Figure4.14 : Géométrie de la distribution de température à travers les différentes couches à 35°C .	105
Figure4.15 : Flux thermique	106
Figure 4.16 : Profilé des températures a T= 6h, 9h, 12h à T=45°	106
Figure 4. 17 : variation de température au long d'un pas à 35°C et 45°C	107
Figure 4.18 : Conditions aux limites structurales du Barrage	111
Figure 4.19 : Position de la déformé du barrage a t=35°C	111
Figure 4.20 : position de la déformé du barrage a 45°C.....	112
Figure 4.21 : Déplacements suivant xx à 35°C	112
Figure 4.22 : Déplacements suivant yy à 35°C	113
Figure 4.23 : Déplacements suivant xx à 45°C	113
Figure4.24 : Déplacements suivant Uyy a 45°C.....	114
Figure 4. 25 : Déplacements suivant xx a 55°C	114
Figure 4.26 : Déplacements suivant yy a 55°C	115
Figure 4.27 : Déplacement U xx à 35°C.....	115
Figure 4.28 : Déplacement Uyy à 35°C.....	116
Figure 4.29 : Déplacements U xx à 45°C	116
Figure 4.30 : Déplacement Uyy à 45°C.....	117
Figure 4. 31 : Déplacements suivant xx à 55°C	117
Figure 4.32 : Déplacement suivant yy à 55°C	118
Figure 4.33 : Contraintes suivant xx à 35°C	119
Figure 4.34 : Contraintes suivant Uyy a 35°C.....	119
Figure 4.35 : contour des contraintes suivant xx à 45°C	120
Figure 4.36 : Contour des contraintes Syy à 45°C	120
Figure 4.37 : Contour des contraintes suivant xx à 55°C	121
Figure4.38 : Contour des contraintes suivant yy a 55°C	121
Figure 4. 39 : Contour des contraintes principalesS1 a T=35°C	122
Figure 4.40 : Contour des contraintes principales S1 à 45°C.....	122

Figure 4.41 : Contour des contraintes principales S1 à 55°C	123
Figure 4.42 : contour des contraintes principales S2 à T= 35°C	123
Figure 4.43 : Contour des contraintes principales S2 à T=45°C	124
Figure 4.44 : Contraintes principale S2 à T=55°C	124
Figure 4.45 : Le contour des contraintes principales S3, à T= 35°C	125
Figure 4.46 : Contour des contraintes principale S3 a T=45°C	125
Figure 4.47 : contour des contraintes principale S3 à T=55°C	126
Figure 4.48 : Variation es contraintes suivant xx à 35°C	126
Figure 4.49 : variation des contraintes suivant xx à 45°C	127
Figure 4.50 : variations des contraintes suivant xx à 55°C	127
Figure 4.51 : Variation des contraintes suivant yy à 35°C	128
Figure 4.52 : Variation des contraintes suivant yy à 45°C	128
Figure 4.53 : variation des contraintes suivant yy à 55°C	129
Figure 4.54 : Variation des contraintes principales S1 à 35°C	129
Figure 4.55 : variation des contraintes principales S1 à 45°C	130
Figure 4.56 : variations des contraintes principales S1 à 55°C	130
Figure 4.57 : Variation des contraintes principale S2 a 35°C	131
Figure 4.58 : Variation des contraintes principale S2 a 45°C	131
Figure 4.59 : Variation des contraintes principales S2 à 55°C	132
Figure 4.60 : variations des contraintes principales S3 à 35°C	132
Figure 4.61 : Variations des contraintes principales S3 à 45°C	133
Figure 4.62 : Variation des contraintes principales S3 à 55°C	133
Figure 4.63 : courbe de variations des contraintes principales dans le barrage à 35°C	134
Figure 4.64 : variations des contraintes principales S1, S2, S3 à 45°C	134
Figure 4.65 : Variation de contraintes principales S1, S2, S3, à 55°C	135
Figure 4.66 : Variation des contraintes de Von Mises SEQV à 35°C	135
Figure 4.67 : Variations des contraintes de Von Mises SEQV à 45°C	136
Figure 4.68 : Variation des Contrainte de Von Mises SEQV à 55°C	136
Figure 4.69 : Essai de traction à 300µm/m /h, TSRST (-10°C/h)	138
Figure 5. 1 : Comportement des enrobés en fonction de la déformation	143
Figure 5.2 : essai TSRST. Evolution de la contrainte en fonction de la température, θ 0°C et -20°C avec une vitesse de -10°C/h)	147
Figure 5.3 : courbes de variation de température, la déformation et la contrainte thermique (élasticité brusque (θ(t)) du TRST	149

Figure 5.4 : Evolution de la température, la déformation et la contrainte thermique (Elasticité $\theta(t)$ linéaire)	151
Figure 5.5 : Modèle analogique de Burger	152
Figure 5.6 : évolution de la température, déformation, contrainte, en onction du temps	155
Figure 5.7 : exemple, évolution de la contrainte thermique en fonction de la température .	157

Tableau 2.1 : Moyenne annuelle de la capacité initial des barrages Algérien (2001-2009)	35
Tableau 2.2 : Moyenne annuelle de la capacité estimée des barrages Algérien (2001.2009) en %	35
Tableau 2.3 : Barrages algériens de première génération	36
Tableau 2.4 : Barrages algérien seconde génération	37
Tableau 2.5 : Evolution et répartitions des barrages par période de réalisation et par région	38
Tableau 2.6 : Dates des mises en eau et âges des barrages en exploitation	41
Tableau 2.7 : Evolution de l'envasement de certain barrage	49
Tableau 2.8 : Répartition mensuelle du niveau d'évaporation de certain barrage en hm3	51
Tableau 2.9 : Barrages affectés par la pollution	52
Tableau 2.10 : Statistique de dommages sur les larges barrages construits en (1986 et avant) ..	54
Tableau 2.11 : Étapes de la phase préliminaire et informations recherchées	55
Tableau 3.1 : Exemple de coefficient de convection	63
Tableau 3.2 : Listes de quelques champs et de leurs potentiels associés	68
Tableau 3.3 : Dimension des polynômes en fonction du degré d'interpolation et de l'espace physique	74
Tableau 4.1 : Type d'éléments utilisés	92
Tableau 4.2 : caractéristiques physiques des matériaux utilisés	92
Tableau 4.3 : les types d'éléments utilisés dans ANSYS	101
Tableau 4.4 : les types d'éléments utilisés dans ANSYS	109

AVANT PROPOS

LES NOTATIONS

TABLES DE MATIERE

LISTE DE FIGURES

LISTE DE TABLEAU

RESUME

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

1.1. Introduction	1
1.2. Généralités sur les matériaux bitumineux	1
1.2.1. Origine du bitume	1
1.3.1.1. Origine et application des bitumes	3
1.2.2. Fabrication du bitume	3
1.2.2.1 Définition.....	3
1.3 Propriétés générales des liants hydrocarbonés	3
1.4 Composition et structure des bitumes.....	4
1.4.1. Caractéristiques chimiques du bitume	4
1.5. Généralités sur les enrobées	6
1.5.1. Teneur en liant	6
1.5.2. Effet de la température.....	7
1.5.2.1. Sollicitation thermique.....	8
1.5.2.2. Evolution du coefficients de dilatation /contraction thermique.....	10
1.5.2.3. Essai de retrait thermique empêché (AASHTO TP10)	11
1.6. Méthode de détermination des propriétés mécanique des matériaux bitumineux.....	13
1.6.1. Classification selon le type d'interprétation considéré	13
1.6.2. Classification selon l'état de contrainte et de déformation	14
1.7. Propriétés rhéologique des liants bitumineux	15
1.7.1. Classes de comportement des bitumes purs en fonction de $ \varepsilon $ et T	15
1.8. Les caractéristiques classiques	16
1.8.1. Pénétrabilité (NF T66-004)	16
1.8.2. Point de ramollissement Bille Anneau (NF T 66-008)	17
1.8.3. Température de fragilité FRAASS (NF T 66-006)	17
1.8.4. Essai RTFOT « Rolling Thin Film Over Test » (NF T 66-032)	16
1.8.5. Essai PAV « pressure Aging Vessel » (AASHTO)	17

1.8.6	Caractérisation des propriétés rhéologiques du liant dans le domaine linéaire (VEL) .	19
1.8.6.1	Définition d'un corps viscoélastique	19
1.8.6.2	Définition d'un corps viscoélastique linéaire	19
1.8.6.3.	Fonction de retard (ou de fluage) et fonction de relaxation.....	19
1.8.6.4.	Module complexe E^* (mode fréquentiel)	21
1.8.6.5.	Essai de traction directe	22
1.9	Modèles de comportement	22
1.9.1	Modélisation du comportement linéaire (VEL).....	23
1.9.1.1.	Assemblage discret de ressorts et d'amortisseurs - spectre discret	23
1.9.1.2	Modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt généralisés	24
1.9.2	Modeles analogiques avancées	24
1.	Elément parabolique.....	25
2.	Modèle de Huet.....	25
3.	Modèle de Huet-Sayegh.....	26
1.10	Critères de contraintes maximales.....	28
1.11.	Conclusion.....	29
 Chapitre 2 : Etat des lieux des barrages en Algérie et classifications des moyens de lutte contre les infiltrations		
2.1.	Introduction	31
2.2.	Bref historique sur l'état de l'eau en Algérie	31
2.3.	Le bilan hydraulique des barrages.....	32
2.4.	L'état des barrages en Algérie.....	32
2.4.1.	Situation générale.....	33
2.5.	Historique des barrages en Algérie	36
2.5.1.	La période coloniale.....	36
2.5.2.	La période Entre 1962-1980	37
2.5.3.	La période entre 1980-1999	37
2.5.4.	La décennie 1990-2000.....	38
2.5.5.	A partir de 2000	38
2.6.	Chronologie des barrages mis en eau de l'Algérie indépendante	39
2.7.	Classifications des barrages suivant leurs ages	40
2.8.	Les types de barrages adoptée en Algérie	43
2.8.1.	Barrages rigide	43

2.8.2. Barrages poids	44
2.8.3. Barrages voûtes	45
2.8.4. Barrages à contreforts	45
2.8.5. Les barrages souples (en remblai).....	45
2.8.6. Barrage en terre	46
2.8.7. Barrage en enrochement.....	46
2.9. Les principaux problèmes des barrages en Algérie.....	47
2.9.1. L'érosion des barrages.....	47
2.9.2. Envasement des barrages en Algérie	48
2.9.3. Evaporations des lacs des barrages	50
2.9.4. Eutrophisation des retenues de barrages	51
2.10. Réalisation de nouveaux barrages en Algérie	52
2.11. Fuites dans les barrages.....	53
2.11.1. Introduction.....	53
2.11.2. Pertes d'eau dans les barrages	54
2.11.3. Recherche des indicateurs de fuite d'eau.....	55
2.11.3.1. Etude préliminaire	55
2.11.3.2. Inspection visuelle	55
2.11.3.3. Autres Méthodes.....	55
2.12. Dispositifs de protection et d'étanchéisation des barrages en terres.....	57
2.12.1. Choix du système d'étanchéité	57
2.12.2. Différents types d'organes d'étanchéité.....	57
2.12.3. Noyau argileux compacté.....	57
2.12.4. Noyau bitumineux.....	58
2.12.5. Masque amont.....	58
2.12.5.1. Masque en béton de ciment	59
2.12.5.2. Masque en acier	59
2.12.5.3. Masque en terre	59
2.12.5.4. Masque en béton bitumineux.....	59
2.13. Conclusion.....	59
Chapitre 3 : Discrétisation par élément finis	
3.1. Introduction	61
3.2. Les lois fondamentales du transfert de chaleur	61
3.2.1. Transfert de chaleur par conduction	61

Table des matières

3.2.1.1. Cas de gaz parfait	61
3.2.1.2. Cas des liquides	62
3.2.1.3. Cas des solides.....	62
3.2.1.4. Loi de Fourier.....	62
3.2.2. Transfert de chaleur par convection.....	62
3.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement	63
3.2.3.1. Le corps noir.....	64
3.2.3.2 les cas réels	64
3.3. Equation de diffusion de la chaleur.....	65
3.4. Analyse thermiques	67
3.4.1.1. Champ potentiels	67
3.4.1.2. Grande lignes de la méthode des éléments finis	68
3.5. Méthodes des éléments finis	70
3.5.1 Introduction.....	70
3.5.2. Les formulation variationelle.....	70
3.5.3. Résultat d'analyse fonctionnelle.....	71
3.5.4. Formes variationnelles	71
3.5.5. Application à l'équation de la chaleur.....	72
3.6. Maillage et interpolation	73
3.6.1. Maillage	73
3.6.2. L'interpolation.....	73
3.6.2.1. Exemple d'interpolation.....	75
3.6.3. Discrétisation	77
3.6.3.1. La méthode de Galerkin.....	77
3.6.4. Exemple de calcul élémentaire (rectangle à quatre nœuds problème plan)	80
3.7. Description d'ANSYS	86
3.7.1. Interface utilisateur	86
3.7.2. Préprocesseur	86
3.7.3. Solveur	87
3.7.3.1. Les méthodes de résolution directes.....	87
3.7.3.2 Les méthodes itératives	87
3.7.4 Post processeur.....	88
3.8. Conclusion.....	88

Chapitre 4 : Modélisation de l'effet thermique et du transfert de chaleur et

Analyse des résultats

4.1 Introduction	89
4.1.2 Le barrage de Ghrib.....	89
4.1.2.1 structures du masque étanche	90
4.2.1 Discrétisations du modèle physique	90
4.3 Analyse du champ couplé	92
4.3.1 Analyse directe	92
4.3.2 Analyse directe (séquentielles).....	92
4.4 Analyse thermique.....	92
4.4.1 Analyse thermique stationnaire	93
4.4.2 Analyse thermique transitoire (utilisé dans notre travail)	93
4.4.3 Les éléments thermiques bidimensionnels utilisés dans ANSYS.....	95
4.4.3.1 Eléments solides à deux dimensions.....	95
4.4.3.2 Eléments solides à trois dimensions	97
4.4.4 Méthode de résolution	98
4.4.4.1 Spécification de l'option pour l'incrémentation des charges dans ANSYS	98
4.4.4.1.1 Option générale.....	98
4.4.4.1.2 Options non-linéaires.....	98
a) Nombre d'itérations d'équilibre	98
b) Incrément automatique du pas de temps	99
c) Critère de convergence	99
4.4.5 Conditions aux limites thermiques.....	100
4.4.5.1 conductivités thermiques.....	101
4.4.5.2 profilées des Températures.....	102
4.4.6 Variation de la température à travers le masque du barrage	106
4.5 Analyse structurale.....	107
4.5.1 Types d'éléments structuraux utilisés dans ANSYS	108
4.5.2 Conditions aux limites structurales	109
4.5.3 Résultats et analyse structurale.....	110
4.5.3.1 Position déformé du barrage	110
4.5.3.2 Résultats des contraintes	118
4.6 Analyse des résultats.....	135

4.7 Conclusion 137

Chapitre 5 : Analyse et interprétations des résultats

5.1 Introduction 140

 5.1.1 Aperçu historique 140

 5.1.2 Les principaux domaines du comportement des enrobés bitumineux..... 142

 5.1.3 Les types d'essais utilisés 144

5.2 Comportement thermomécanique au cours d'un cycle thermique 144

 5.2-1. Modélisation numérique de l'évolution de la température au cours d'un cycle thermique
 144

5.3 Analyse thermomécanique au cours d'un cycle thermique 145

 5.3.1- Retrait thermique empêché 145

 5.3.3 Procédure du calcul de la contrainte thermique 146

 5.3.3.1 En élasticité 147

 5.3.3.2 En viscoélasticité linéaire 152

 5.3.4 Analyse de la déformation..... 156

 5.3.4.1. Evolution des déformations et des contraintes en fonction du temps 156

 5.3.4.2 Evolution des contraintes en fonction de la température 156

5.4 Estimation du risque de fissuration 157

5.5 Conclusion..... 158

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexes

Introduction générale

L'eau constitue à la fois un élément essentiel et un facteur stratégique de l'aménagement des territoires ; sa disponibilité conditionne de manière déterminante la répartition des populations, de l'urbanisation et des activités économiques, l'accroissement démographique des populations mondiales a fait en sorte que l'alimentation en eau potable soit considérée comme l'un des problèmes majeurs de toutes les populations.

Dans le domaine du génie civil, les barrages sont considérés comme étant des ouvrages d'arts hydrauliques occupant une place très particulière parmi les constructions. Le rôle de ces ouvrages dans la vie quotidienne d'un pays leur donne une importance primordiale sur tous les plans. Ils sont sensibles à l'opinion publique.

L'Algérie qui est un pays de fortes sismicité a opté pour la construction des barrages en terres dans la région de fortes précipitations, ces derniers résistent mieux aux efforts horizontaux et leurs coûts sont beaucoup moins chers que les autres barrages, néanmoins, ils possèdent des inconvénients majeurs, qui peuvent compromettre leur fiabilité économique, et peuvent mettre en cause le rôle pour lequel ils ont été conçus, il s'agit des pertes d'eau à travers le corps du barrage, afin d'éviter ce désagrément, les barrages sont dotés d'organes de lutte contre ces infiltrations, tels que (les noyaux d'argiles, les masques amonts en béton bitumineux). L'organe d'étanchéité d'un barrage assure la fonction première de l'ouvrage qui est de retenir l'eau et éviter les infiltrations à travers le corps de celui-ci.

Dans la pratique les ingénieurs routiers se sont confrontés à l'existence de fissures prématurées à la surface de la couche bitumineuse qui n'étaient pas dues seulement au trafic mais aussi à la participation d'autres facteurs extérieurs environnementaux tels que les variations de températures.

La température a deux effets mécaniques principaux sur le comportement des enrobés (DiBedetto 1998) :

- Le changement du module (matériau thermosensible)
- Création de contraintes de déformation au sein du matériau en raison de dilatation ou de contraction thermique lors de changements de températures.

Notre démarche consiste, à déterminer les déformations subies par le matériau lors d'un cycle d'échauffement et évaluer l'intensité des contraintes internes engendrées par le phénomène (dilatation/contrainte).

Introduction générale

La modélisation du phénomène de développement des déformations et contraintes en fonction de la température, consiste à mettre en point une simulation numérique à l'aide du logiciel commercial ANSYS, qui nous permettra de simuler les effets des sollicitations thermiques, afin de suivre l'évolution des déformations qui peuvent provoquer des fissures par les contraintes internes générées par le matériau.

Les résultats de cette étude, nous permettront de mieux comprendre le phénomène «*Déformation – contrainte – température* », pour cela ils seront comparés à ceux existant dans la littérature.

Ce mémoire est constitué de cinq (05) chapitres :

Le premier chapitre est entièrement consacré à une étude bibliographique sur les propriétés physiques, thermomécaniques, rhéologie et quelques modèles rhéologiques, évolution des bitumes issus de la littérature.

Le deuxième chapitre présente la répartition des barrages en Algérie, leurs historiques, les problèmes majeurs de ses barrages (envasement, érosion, pollution...), et les moyens de lutte contre les infiltrations et les moyens d'étanchéisation.

Le troisième chapitre expose la méthode des éléments finis ; à savoir l'historique de la méthode, ses champs d'application (application à l'équation de la chaleur), les logiciels utilisés ainsi que les différentes étapes de calcul du logiciel ANSYS.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation du barrage (le barrage étudié est celui de GHRIB). L'objectif principale de ce travail est de développer un modèle de calcul par éléments finis, en bidimensionnel par la simulation numérique, avec le logiciel commercial ANSYS, du comportement de l'enrobé sous l'action de charges thermiques en tenant compte des propriétés thermiques tel que la conductivité thermique, afin de déterminer les contraintes thermiques, et les déformations dans cette couche.

Le cinquième chapitre expose le comportement des enrobés bitumineux en prenant en considération l'évolution des propriétés viscoélastique du matériau en fonction des différentes variations de la température, ce qui nous renseigne sur le comportement de l'enrobé bitumineux, sous diverses sollicitation thermique.

Enfin une conclusion générale reprend les principaux résultats.

1.1. Introduction

Les propriétés du béton bitumineux sont en partie issues de celles du bitume qui le compose.

Le bitume présente des propriétés de grande complexité, à la fois sur le plan de sa composition chimique, et sa réponse aux sollicitations mécanique. Il possède un grand pouvoir adhésif. Les performances demandées aux bitumes sont généralement basées sur leurs propriétés rhéologiques, pour garantir sa durabilité, il est demandé par exemple au bitume d'avoir une viscoélasticité convenable, durant le temps d'exploitation et après sa mise en service, afin d'éviter toutes fissuration.

À haute température de service le bitume doit demeurer suffisamment rigide, pour maintenir le squelette granulaire et limiter le fluage des enrobés, permettant d'éviter ainsi le phénomène d'orniérage qui se manifeste typiquement autour de 60°C.

Le bitume doit être, suffisamment souple à basse température de service pour permettre aux contraintes de se relaxer et résister, à la fissuration due au retrait thermique.

Enfin, quelques modèles rhéologiques issus de littérature seront exposés, pour permettre la modélisation des matériaux bitumineux.

1.2. Généralités sur les matériaux bitumineux

1.2.1. Origine et application du bitume

Les bitumes sont composés essentiellement, de carbone et d'hydrogène d'où leurs nom d'hydrocarbures. Le bitume est utilisé dans l'industrie pour ses propriétés d'étanchéité et d'isolation (thermique et acoustique).

En outre, il convient de distinguer les termes de bitumes et de liant hydrocarboné trop souvent confondus. En effet, le liant hydrocarboné peut être bitumineux, goudronneux à base de bitume fluidifié.

Les bitumes de pétrole sont obtenus, par raffinage du pétrole brut où ils se trouvent en solution. Ils sont le résultat de l'élimination des huiles servant de solvant, par évaporation ou distillation du pétrole brut. Sachant que de tels processus pourraient se produire dans la nature, aux niveaux des couches souterraines, les bitumes proviennent en conséquence de deux sources naturelles et industrielles.

1. Origine naturelle :

La production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 000t



Figure 1.1 : un bitume provenant d'un gisement naturel (DI BENEDETTO et CORTE, 2005).

2. Origine industrielle

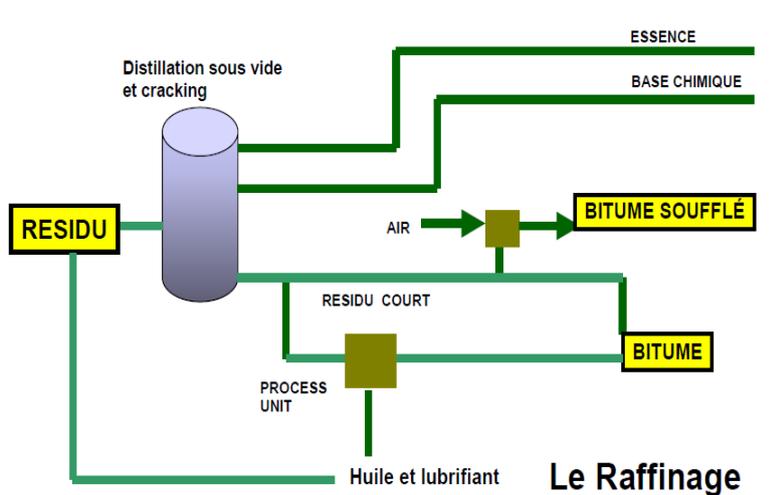
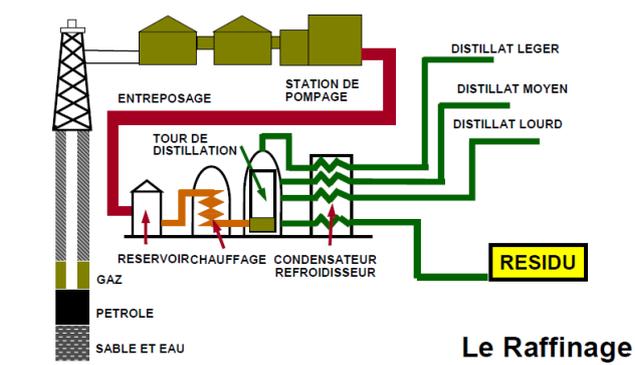


Figure 1.2 : procédé industrielle de l'obtention du bitume par raffinage industrielle du pétrole (DI BENEDETTO et CORTE, 2005).

1.2.2. Fabrication du bitume

Concernant les principaux modes de fabrication des bitumes, citons la distillation en raffinerie des pétroles bruts lourds contenant suffisamment de fractions lourdes, pour produire du bitume. La première étape de ce processus consiste, en une distillation atmosphérique qui permet de séparer les fractions légères du pétrole (essence kérosène, gaz) des fractions lourdes, ces dernières étant ensuite distillées sous vide pour produire fuels, huile et bitume.

Citons aussi le procédé de soufflage et de désasphaltage. Le premier consiste à oxyder les résidus sous vide par soufflage d'air chaud à 250°C. Le deuxième procédé est, quant à lui, utilisé pour des résidus sous vide ayant une teneur en ascendant de solvant : la différence de solubilité des fractions bitumineuses vis-à-vis du solvant employé permet alors d'obtenir le bitume souhaité.

1.2.2.1 Définition

On appelle enrobé hydrocarboné tout mélange de granulats et liant hydrocarboné, le terme est donc plus générale que celui des bétons bitumineux puisqu'il inclut les mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume.

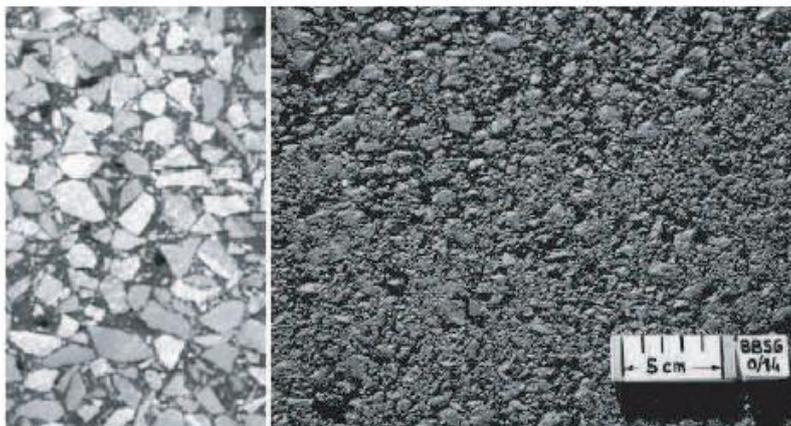


Figure 1.3 : Coupe et aspect de surface d'un enrobé de type béton bitumineux semi-grenu 0/14 (DI BENDETTO et CORTE2005).

1.3 Propriétés générales des liants hydrocarbonés

Ces produits sont en générale, trop visqueux dans leurs états naturels, leurs caractéristiques sont indiquées ci-dessus :

a/ Cohésivité : c'est la propriété de se déformer, sans arrachement ni fissuration interne, en donnant des films étanche et plastiques ;

b/adhésivité: elle est définie comme la résistance opposée au sein d'une masse liquide à une déformation telle que la vitesse de déplacement de différents points soit variable:

soit :

$$\eta = \frac{R}{S} \times \frac{1}{\frac{\partial V}{\partial Z}} \quad (1.1)$$

η : Viscosité ;

R : Resistance totale ;

S : Section de cisaillement ;

$\frac{\partial V}{\partial Z}$: Gradient de vitesse ;

La viscosité diminue considérablement avec la température ;

d/Suceptibilité: la suceptibilité est définit ,en particulier ,comme la variation de la viscosité

avec la température: $S = \frac{d\eta}{dt}$ (1.2)

e/Vieillessement: c'est pour le liant,la perte de certaines qualités dans le temps et notamment la pérte de cohésivité;

D'une manière générale, le liant laisse échapper très lentement des huiles et devient de plus en plus dur.L'allongement plastique qui précède la rupture diminue progressivement;

f/Ductilité: c'est la caracterstique du liant qui lui permet de s'allonger en un fil très mince,mais sans se rompre.Cette qualité est évidemment une conséquence de la cohésivité.

De ces caracterstiques dépend l'emploi du liant ainsi la méthodologie pour sa mise en oeuvre.

1.4 Composition et Structures des Bitumes

1.4.1 Caractéristiques chimiques du bitume

La chimie du bitume est née avec les premiers travaux de Boussingault, qui a séparé une fraction distillable qu'il a nommé « pétrolènes», maintenant appelé plutôt « maltènes » et une fraction non-distillable, les « asphaltènes », plus récemment le développement des techniques de chimie analytique ont permis de mieux définir et caractériser ses fractions, mais la séparation des bitumes en maltènes et asphaltènes est encore très largement accepté avec des méthodes d'obtention différentes.

L'analyse élémentaire d'un bitume, révèle la domination des atomes de carbone, (typiquement 80 à 87% massique) et d'hydrogène (8-12%). En outre, des hétéroatomes tels que le soufre (1-9%), l'azote(0-1.5%) et l'oxygène (0.5-1.5%) et des traces de métaux tels que le vanadium ou le nickel sont présent, Une bonne partie de ces derniers est à l'état colloïdal ou sous forme de sels. Devant la complexité des mélanges bitumineux il est plus judicieux de vouloir déterminer leurs compositions plus précisément.

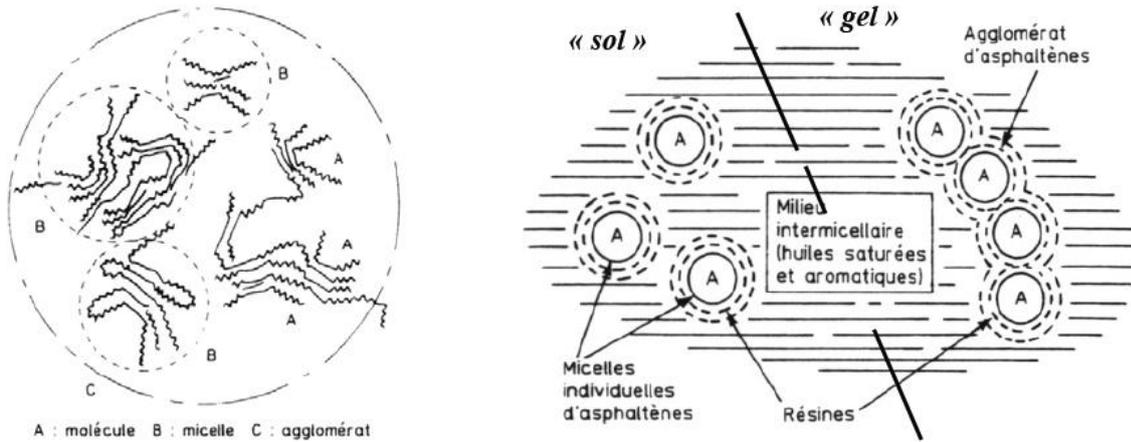


Figure 1.4 : a) Macrostructure des asphaltènes (PUCCI T, 2000), b) schématisation de la structure colloïdale du bitume (ADDAIA F. 1989)

a) Séparation par précipitation

La séparation par solvant, la plus utilisée est celle qui permet de séparer les bitumes en asphaltènes et maltènes : les asphaltènes constituent la partie insoluble des bitumes dans les solvants de types n-alcanes, les maltènes la partie soluble. Ces derniers sont séparés en résines, hydrocarbure aromatique et saturés (huile) par précipitation sélective ou par chromatographie d'adsorption (figure 1.5)

- Les huiles : cette fraction est généralement soluble dans tous les solvants organiques, elle représente 40% à 60% du bitume, sa masse moléculaire moyenne est généralement relativement faible et leur viscosité peu élevée.

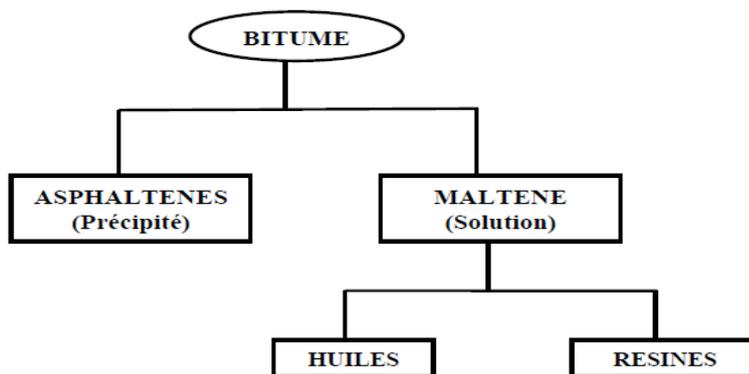


Figure 1.5 : Séparation du bitume : en asphaltènes et maltènes et résines et huiles (PUCCI 2000).

- Les résines : elles ont un caractère nettement plus aromatique, la structure des résines est beaucoup plus complexe, que celles des huiles et leur masse moléculaire moyenne est plus élevée. Les résines ont un rôle essentiel vis-à-vis la stabilité colloïdale du bitume. Elles ont un rôle tensioactif qui permet de stabiliser la dispersion d'asphaltenes dans la matrice maltène.

- Les constituants des asphaltènes :

Les asphaltènes représentent de 10 à 30% des bitumes et leurs masse moléculaire est assez variable suivant l'origine du bitume et selon qu'il a été soufflé ou non, il se présente sous la forme d'un solide dur friable, brun-noir qui contribue largement à la couleur noir du bitume.

Ce sont des composés très lourds à structures condensées, cylindrique et aromatique. Les asphaltènes sont considérés comme l'entité la plus responsable du comportement rhéologique des bitumes.

b. Séparation par chromatographie d'adsorption

Les techniques chromatographiques ont été les plus utilisées pour l'étude chimique des bitumes. Dans la plupart des méthodes, les asphaltènes sont préalablement séparés des maltènes par précipitation. La chromatographie est alors faite sur la fraction malténique, en solution dans les solvants de type n-alcane. C'est la méthode de fractionnement sur colonne d'alumine mise au point par Corbett, qui a servi de base à la séparation des bitumes en fonction de la polarité des composés, cette chromatographie sépare le bitume en quatre familles génériques :

- Saturé
- Aromatique
- Résine
- Asphaltène

1.5. Généralités sur les enrobés

1.5.1. Teneur en liant

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (5 à 7 % en masse), d'agrégats et de fines (passant à 80 µm), les fines étant également appelées "filler".

L'obtention des enrobés par mélange des granulats et du bitume fait appel à des propriétés bien spécifiques aux liants hydrocarbonés, en général et donc, au bitume en particulier :

- Un pouvoir d'adhésion aux granulats ;
- Une consistance variable avec la température.

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer, la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains, par un film mince de bitume, cette teneur en liant peut être définie à partir d'une étude en laboratoire.

1.5.2 Propriétés thermo-physique des bitumes

La densité : elle est utile dans les calculs des formulations, elle est mesurée à l'aide d'un pycnomètre entre 15°C et 25°C. Elle vaut généralement entre 1,0 et 1,10, elle décroît sensiblement quand la température augmente.

Les propriétés thermiques sont très importantes sur le plan du comportement et performance. Le bitume a une chaleur spécifique relativement faible, dans l'ordre de 2,0 kJ / kg °C à 25°C. La quantité nécessaire par °C décroît légèrement quand la température augmente de 0 à 70°C.

Le bitume a en revanche une faible conductibilité thermique (0,163W/m°C à 20°C), et de ce fait nécessite de grande surface de chauffe pour la manipulation et l'enrobage (on peut dire qu'il est relativement isolant). Enfin il possède un coefficient de dilatation volumique relativement faible, lors de l'enrobage et de la mise en œuvre à très hautes température, le bitume subit une légère perte de masse liée au départ d'éléments volatiles, ce qui explique en partie le vieillissement du bitume.

1.5.2. 1 Effet de la température

À basse température le bitume possède un comportement fragile, susceptible de se fissurer sous l'effet conjugué des conditions climatiques, cependant, la fissuration thermique peut être facilement évitée à basses température si l'on utilise un bitume de grade élevée. C'est-à-dire un bitume moins "dur" et donc moins "cassant" à basse température.

Pour résumer, d'après Di Benedetto (1997), outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux (Di Benedetto, Neifar 1997) : changement du module du matériau. Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus "mou". Plus généralement, ces matériaux sont dits "thermo-sensibles", c'est-à-dire que leur comportement viscoplastique change selon la température considérée, création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température (Figure 1-6).

Le premier effet est, en général, caractérisé par la dépendance du module de rigidité vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement.

Le deuxième effet est particulièrement néfaste : lors d'un refroidissement, par exemple, le bitume a tendance à se contracter. Or, les mouvements de contraction sont empêchés dans le sens longitudinal. Cela revient donc à exercer une traction sur ce dernier dans le sens longitudinal, d'où l'amorçage éventuel de fissures transversales. Ces fissures sont ensuite susceptibles de se propager à travers la structure lors de cycles thermiques (journaliers ou autres).

Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

On doit exiger des enrobés deux qualités principale en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- La stabilité, il existe la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température
- la flexibilité, soit l'aptitude à supporter sans fissures thermique les basses températures.

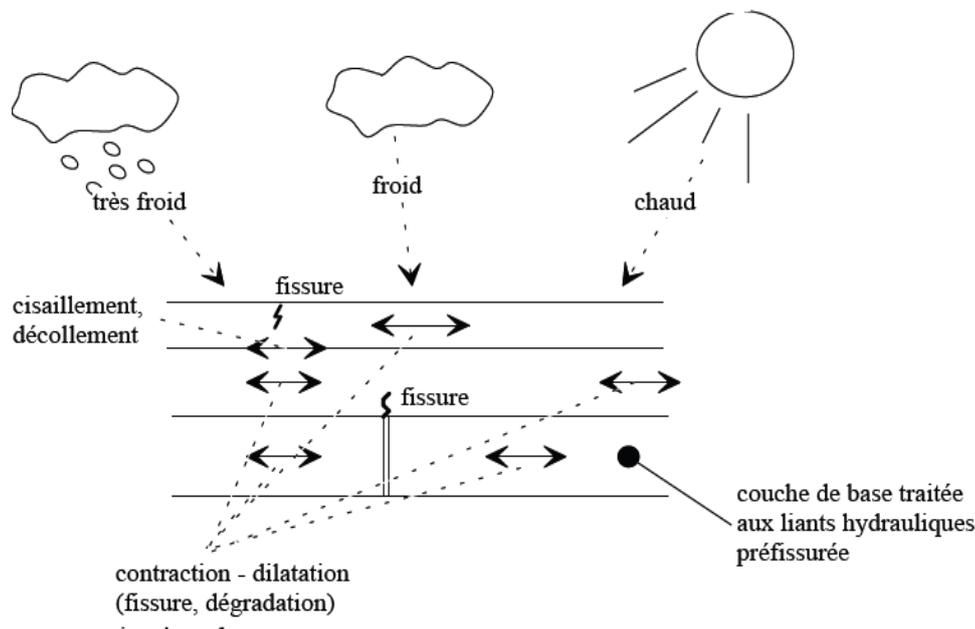


Figure 1.6 : Schématisation des sollicitations induite par la température (DIBENDETTO, H, NEIFAR, M 1997).

1.5.2.2 Sollicitation thermique

Généralement, les conditions thermiques affectent d'avantage la structure constituant la couche bitumineuse, Néanmoins, des contraintes thermiques élevées peuvent aussi se développer, spécialement dans les régions froides (dans ce cas, les températures sont si basses

que le béton bitumineux devient fragile et la rupture peut se produire) ou à fortes amplitudes thermiques, (créant des contraintes de tractions supérieures à la résistance du béton bitumineux).

Mais malgré tous les problèmes dus à la variation des températures qui interviennent dans des climats dit modéré (exp: fissuration thermique), en dépit des propriétés de relaxation rapide du matériau .Guerritsen (Gerristen, 87), a montré que le phénomène de durcissement du bitume réduit les capacités de relaxation du béton bitumineux, ainsi que les contraintes thermiques développé ,même dans les climats modéré, sont élevées, l'apparition de fissures en surface du masque en béton bitumineux d'un barrage à masque est due à la perte d'étanchéité (hiver aggravées par le gel et l'eau, l'été par le chaud ..).

Pour mieux maîtriser les contraintes thermiques, afin d'éviter le développement des fissures dans les différentes couches. Le processus qui initie les sollicitations est reconnu ; il s'agit des variations thermiques (Monismith 1965), (Vinson1997).

Les origines des contraintes thermiques qui se traduisent, par l'existence des fissures transversales en surface, peuvent être classées en deux groupes (Shahine 1987), (Vinson92).

- ✚ Les contraintes de traction dans le matériau à très basses températures
- ✚ Les contraintes causées par les variations de températures journalières (phénomènes de fatigue thermique).

Les mesures des propriétés rhéologique de l'enrobé sont difficiles à interpréter car plusieurs paramètres interviennent. En effet, par temps froids, le bitume a une moindre capacité à reprendre les efforts de traction .De même, le paramètre temps rend le matériau plus rigide et donc l'affaiblit dans sa capacité de résistance à la rupture. De plus, une exposition régulières à basse temperature l'endommage et l'affaiblit progressivement .

La difficulté de prédiction des sollicitations thermiques provient du fait du nombre de paramètres en jeu : la nature du matériau (le coefficient de dilation thermique), la formulation (la rigidité et la granulométrie du mélange, qui peut jouer sur la qualité d'engrènement), l'épaisseur des couches, (le dimensionnement), l'histoire thermique et mécanique du matériau (fatigue...).

La maîtrise du comportement thermique et la connaissance du processus de dégradation de l'enrobé de surface est nécessaire afin de, pouvoir proposer des solutions qui vont prolonger sa durabilité et retarder l'apparition des défauts.

1.5.2.3. Evolution du coefficients de dilatation /contraction thermique

Ce coefficient est appelée α est de la forme de : $\alpha(t) = \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ [$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$]

Hook et Goetz (1964) ont aussi fait des mesures de coefficient de dilation linéique sur des bétons bitumineux ,dans une gamme de temperatures comprise entre [-30°C et +30°C] ,sur des éprouvettes parallélépipédiques de (30,48 X6,35X5,08 cm³. Les valeurs obtenues sont comprise entre [13 - 26 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$]. .La encore, le coefficient de dilation thermique semble augmenter avec la teneur du lait .

Stofel et Kwada (1996) ont étudié la contraction thermique du béton bitumineux avec des jauges de déformation à résistance électrique pour des températures allant de [0°-25°]C sur des éprouvettes cylindrique de [15-24 cm] de diamètre et de [5-10 cm] de hauteur provenant de carottage des chaussées existantes.Les contractions sont mesurées après chaque incrément de (5°C) (STO96):

La contraction thermique de l'enrobé varie linéairement avec la temperature dans l'intervalle de [0 - 25°C] .

Les coefficients de contraction thermiques des differents échantillon sont compris entre [13,3.10⁻⁶ et 29,7.10⁻⁶ $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$].

Des variations de températures comprises entre [0 à 30°]C, avec des vitesses différentes donnent les expressions suivante:

- pour une vitesse de -1°C/h : $\alpha = 34,2$ à $17,2$ [$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$]

- pour une vitesse de -1°C/h : $\alpha = 25,7$ à $17,5$ [$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$]

Il est à noter α est plus stable quand la vitesse de refroidissement est grande.

D'après Neifar et al (Neifar,Al 2001), la déformation thermique peut avoir la forme :

$$\varepsilon(t) = \alpha \cdot \Delta t \quad (1.3)$$

Où Δt est la variation de température et α le coefficient de dilation /contraction thermique .Il est supposé approximativement constant $\alpha = 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, non affecté par la température et le chargement mécanique. Le problème est anisotrope, une différence notable a été retrouvée entre les coefficients de contraction thermique radiale et axiale (DI Bendetto 1997).

F.Olards (OLard2003), a constaté que le coefficient de contraction thermique des enrobés apparait approximativement constant pour des températures dépassant +5°C, le fluage excessif rend les mesures imprécises. Pour des températures allant de +5°C à -27°C il varie d'une façon linéaire avec la température de [30 - 15 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$] environ.

Ainsi on constate qu'il n'existe pas de différence notable entre le coefficient de contraction et le coefficient de dilatation thermique pour des températures positive, quand les températures sont négatives, le coefficient de contraction est légèrement supérieur, il est de l'ordre [1 - 4 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$].

La déduction d'une formule unique selon laquelle, évoluent les coefficients de contraction et de dilatation thermique, dans de larges gammes de températures est difficile à réaliser. Le choix approximatif d'un coefficient de contraction/dilatation, adopté se base sur compromis des résultats expérimentaux obtenues pour des températures supérieures à (5°C), la valeur moyenne ($\alpha = 25 \cdot 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$).

1.5.3 Essai de retrait thermique empêché (AASHTO)

- **Principe de l'essai**

Lorsqu'un matériau est soumis à une variation de température, il subit des déformations, Si celle-ci sont empêchées. Ses variations engendrent des contraintes appelées contraintes thermiques.

Ce type de couplage thermomécanique est à l'origine des problèmes de fissurations observés à basse température (exemple des chaussées).

Les chaussées sont un exemple où les déformations sont restreintes. En moyennes températures.

Lorsque la température augmente, les contraintes thermiques créées appelées contraintes de compression, se dissipent par le phénomène de relaxation.

À basse température, l'enrobé se comporte comme corps élastique très rigide.

Lorsque la température baisse, des contraintes de tension se créent sans pouvoir se dissiper ; lorsque ces contraintes atteignent la limite de résistance du matériau, des fissures apparaissent, ce phénomène est illustré dans la figure (1.7). La température à laquelle apparaît la fissure est appelée température de fissuration thermique.

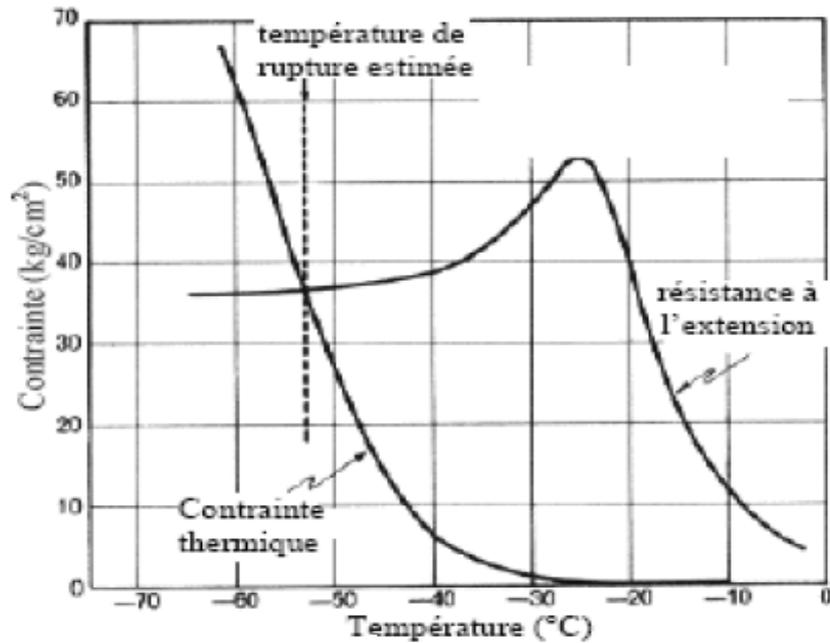


Figure 1.7 : Méthode d'estimation de la contrainte de rupture (Olards, 2003)

Ainsi, la résistance des enrobés semble être fonction de la température (Arand1990), et de la vitesse de déformation uniquement, et ne dépend pas du chemin de sollicitation thermomécanique suivi. Dans la mesure où la résistance en traction des enrobés dépend faiblement de la vitesse de déformation dans le domaine fragile.

La déformation totale, noté ϵ^{total} , peut se décomposer en la somme d'une déformation mécanique et une déformation d'origine thermique, respectivement notées

$\epsilon^{mécanique}$ et $\epsilon^{thermique}$ Il vient :

$$\text{Equation:} \quad \epsilon^{total} = \epsilon^{mécanique} + \epsilon^{thermique} \quad (1.4)$$

Etant donné que le retrait est empêché

$$\epsilon^{total} = 0$$

$$\epsilon^{mécanique} = -\epsilon^{thermique} = -\alpha\Delta T \quad (1.5)$$

Avec α le coefficient de dilatation thermique moyen de l'enrobé ($\alpha \approx 30\mu/m/^\circ C$)

Cet essai introduit un couplage thermomécanique puisque ; A partir d'une sollicitation thermique ($\epsilon^{thermique} = \alpha\Delta T$), on obtient une sollicitation mécanique induite, ($\epsilon^{mécanique} = -\alpha * \Delta T$). Au cours de l'essai, la contrainte de traction induite par la variation de température (contrainte thermique), se développe dans l'éprouvette d'enrobé, jusque la fracture de celle-ci.

L'essai de retrait thermique empêché utilisé permet donc de caractériser le comportement du matériau à basse température.

Les paramètres de l'essai les plus souvent considérés sont : la contrainte de rupture et la température de rupture.

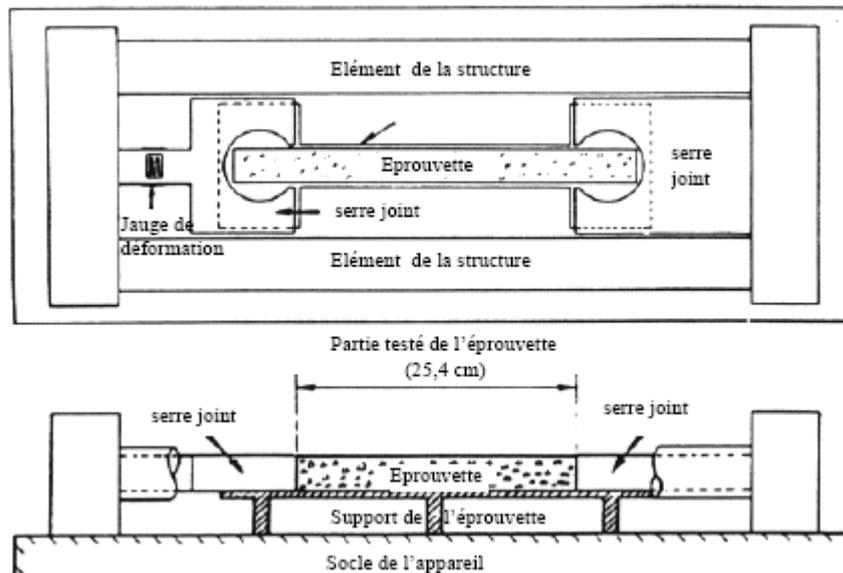


Figure 1.8 : Appareil développé par Monismith et al. (1965) pour l'essai du retrait thermique empêché.
(Monismith, Scor, 1965)

1.6. Méthode de détermination des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux

Les essais de caractérisation des propriétés mécaniques, des matériaux bitumineux sont nombreux et divers. Ils peuvent être déduits de l'analyse des résultats d'essais de laboratoire, il est néanmoins possible de les classer en différentes catégories.

Une première classification en trois catégories qui est plus liée à l'interprétation de l'essai qu'à sa nature est proposée par Bonnot, en (1973) et en (1984). Une seconde classification proposée par Di Benedetto (1990), introduit deux catégories d'essai : les essais homogènes et les essais non homogènes.

1.6.1. Classification selon le type d'interprétation considéré

La première catégorie est celle des « essais empiriques », ces essais ne permettent pas de déterminer les propriétés intrinsèques du matériau, la relation entre la propriété d'usage et le résultat de l'essai ne peut pas être déterminée par théorie, seule l'expérience du praticien et des comparaisons pour de nombreux cas permettant, de tirer des conclusions. La propriété d'usage est fonction de paramètres liés au matériau (sa composition), et de paramètres liés à l'usage (les charges, température...etc), pour les propriétés d'usage « résistance à l'orniérage », l'exemple type d'essai de cette catégorie est l'essai Marshall. Cependant ses

essais se sont révélés insuffisant pour traduire correctement la réalité des conditions de travail et prédire leurs comportements in-situ.

La deuxième catégorie correspond aux « essais de simulation ».

Le troisième est « essai de détermination », il nécessite une modélisation de la structure d'usage désiré et la connaissance, des lois de comportement de l'enrobé, ces essais utilisent des sollicitations simple parfaitement définies, et permettent de déterminer les propriétés intrinsèques des matériaux, c'est-à-dire indépendante des conditions d'essais, cette voie semble la plus prometteuse.

1.6.2. Classification selon l'état de contrainte et de déformation

Les différents essais existants sur les matériaux bitumineux, ou plus généralement sur les géomatériaux, peuvent être classées en deux grands catégories : « les essais homogène » et « les essais non homogène ».

Les essais homogènes permettent d'avoir accès directement aux contraintes et déformations, donc à la loi de comportement, pour les essais non homogène il faut postuler une loi de comportement, à priori (viscoélastique linéaire par exemple) et prendre en compte la structure de l'éprouvette (données géométrique), pour obtenir après des calculs souvent compliquées, les paramètres de la loi de comportement (le module complexe par exemple)la figure (a) 1.9) présente la figure d'un essai homogène .

Les essais non homogènes peuvent être utilisés dans le cas où le comportement du matériau est simple (élasticité linéaire isotrope ou viscoélastique linéaire isotrope). Quand on postule en avance le comportement du matériau, on peut avoir une grande erreur dans la loi de comportement obtenu la figure suivante (b) 1.9) présente un essai non homogène.

On peut conclure que les essais homogènes semblent plus pertinents pour décrire le comportement du matériau, en effet leurs analyses conduit plus facilement à définir les paramètres de comportement.

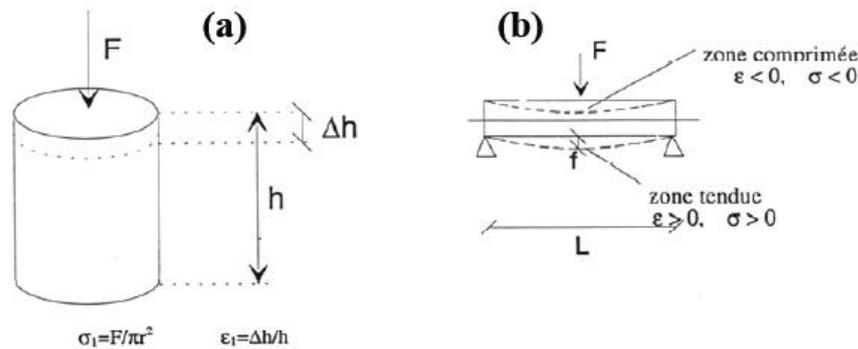


Figure 1.9 exemple d'essai :a) essai de traction –compression (homogène), b) essai de flexion de poutres (non homogène) (Olards, 2003).

1.7. Propriétés rhéologique des liants bitumineux

Si la rhéologie du liant ne constitue pas un but en soi, celle-ci peut toutefois se concevoir comme une approche nécessaire mais non suffisante des propriétés de l'enrobé. Il s'agit donc d'apprécier au mieux l'influence des propriétés du liant bitumineux sur celles de l'enrobé, sachant que tous les facteurs de formulation, le bitume est sans doute celui qui à l'influence la plus nette sur les propriétés rhéologique des enrobés.

1.7.1. Classes de comportement des bitumes purs en fonction de $|\varepsilon|$ et T

La figure (1.10), permet d'identifier simplement les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation ($|\varepsilon|$) et de la température T, pour une vitesse de déformation fixée.

On y distingue :

- ❖ Les domaines fragile et ductile, ou la résistance à la traction σ_p peut être mesurée.
- ❖ La rupture fragile, qui peut être caractérisé par la ténacité K_c ou l'énergie de rupture G_c (Mécanique linéaire de la rupture).
- ❖ Le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules E et G.
- ❖ Le domaine viscoélastique linéaire est caractérisé par des modules complexes E^* et G^* .
- ❖ Le comportement visqueux newtonien, caractérisé par la lettre η .
- ❖ pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement linéaire.

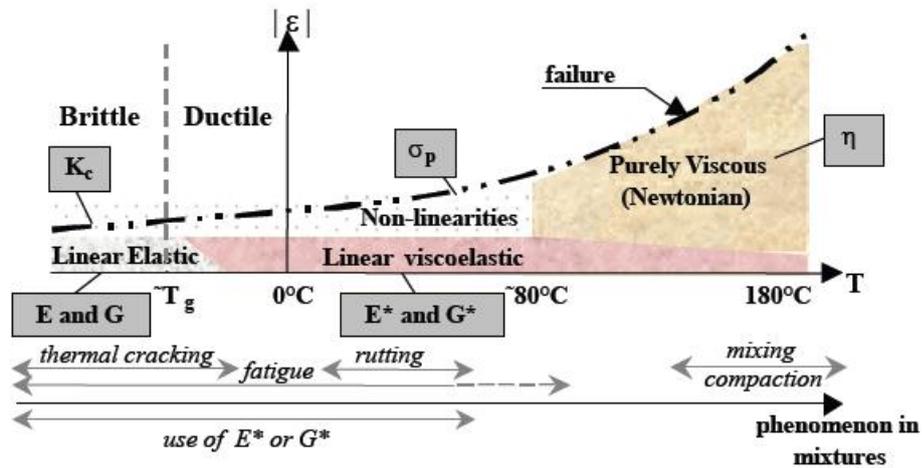


Figure 1.10 : Classes de comportement des bitumes en fonction de $(|\epsilon|)$ et T , les paramètres (Neifar Di bendetto, 2000). Et (Olards, 2003). Les paramètres K_c , E , G , E^* , G^* et η sont introduit par la suite

1.8. Les caractéristiques classiques

1.8.1. Pénétrabilité

La pénétrabilité du bitume représente la mesure de pénétration (exprimée en dixième de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g, c'est donc mesure de la consistance du bitume. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesuré à 25°C .

Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus sa valeur de pénétrabilité est faible.

A titre d'exemple, on distingue les classes :

10/20 et 35/50 → bitume durs

50/70 et 70/100 → bitume semi – durs

180/220 → bitume mous.

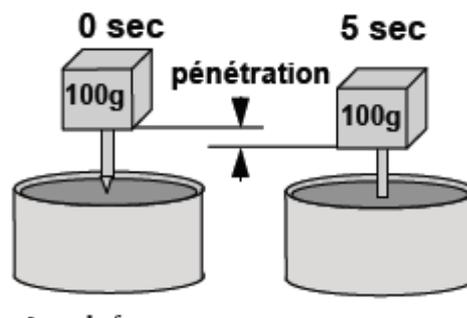


Figure 1.11 : Essai de pénétrabilité pour bitume.

1.8.2. Point de ramollissement Bille Anneau

C'est la température à laquelle s'enfonce une bille à travers un anneau de bitume dans des conditions définies de fabrication et d'essai. Par voie de conséquence, il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement.

Les résultats des deux essais empiriques précédents (pénétrabilité à 25°C et température Bille Anneau) permettent d'identifier le liant examiné et de le classer par rapport aux spécifications actuellement admises.

1.8.3. Température de fragilité FRAASS

La température de fragilité Fraass, correspond à la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet d'une flexion, dans des conditions opératoires de fabrications et d'essais bien définies.

Cet essai empirique donne une indication sur les propriétés à froid d'un bitume. Ramond et Such (1990) précisent que, par expérience, on sait que la zone citrique où se présente ce phénomène de fissurations correspond à des liants bitumineux dont (Ramond et such 1990) :

- La pénétration est inférieure 201/10 mm ;
- La température de ramollissement est supérieure à 70°C ;
- La température de fragilité Fraass est supérieure à 0°C.

1.8.4. Essai RTFOT « Rolling Thin Film over Test »

À l'enrobage, les granulats chauffés aux environ 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud, qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense (température et oxygène de l'air). L'essai RTFOT est employé pour permettre de caractériser le type de vieillissement des bitumes car il le produit assez bien, l'oxydation et les pertes de matières volatiles, qui apparaissent dans la centrale d'enrobage et lors de la mise en œuvre.

Pour l'essai de RTFOT, dans des conditions d'essai précises, le bitume, placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelle sur le liant vieilli : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau, ces valeurs dites après RTFOT, sont comparées aux valeurs initiales, Elles sont plus proche de celles du liants extrait de l'enrobé, que celle obtenu sur le bitume d'origine, la figure (1.12) représente une schématisation de cet essai

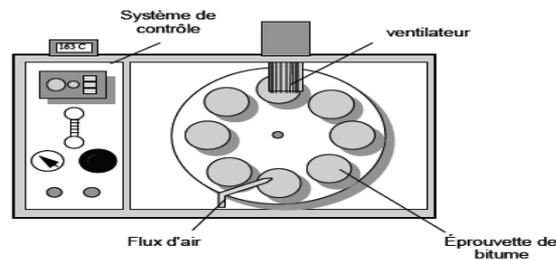


Figure 1.12 : Essai RTFOT.

1.8.5. Essai PAV « pressure Aging Vessel »

Cet essai est employé pour permettre de caractériser le vieillissement des bitumes in-Situ (après 3 à 5 années de service).

Les résidus de l'essai RTFOT, est chauffée versée dans des plateaux métalliques (coupelles contenant environ 50g de liant), qui constitue les éprouvettes de l'essai PAV. Ces plateaux sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans une enceinte thermique. À une température d'essai de (100°C), une pression d'air de (20bars = 2Mpa) est appliquées dans le récipient. Après une durée de vingt heure (qui constitue un avantage important de l'essai), la pression est diminuée lentement (8à10 minutes), les plateaux d'éprouvettes sont placées ensuite dans un four de 163°C pendant 30 minutes.

On mesure alors les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après PAV, sont alors comparées aux valeurs initiales et aux valeurs obtenues après RTFOT. Une schématisation de cet essai est représentée dans la figure (1.13).

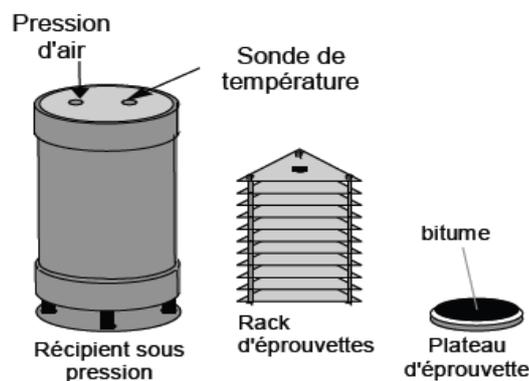


Figure 1.13 : Essai de PAV.

1.8.6 Caractérisation des propriétés rhéologiques du liant dans le domaine linéaire (VEL)

1.8.6.1. Définition d'un corps viscoélastique

Un corps monodimensionnel est dit viscoélastique (viscoplastique) si l'effacement est total lors d'une expérience d'effacement ($\sigma_\infty \rightarrow 0$). Cette expérience représentée dans la figure (1.14), qui consiste à appliquer un créneau de déformation au matériau.

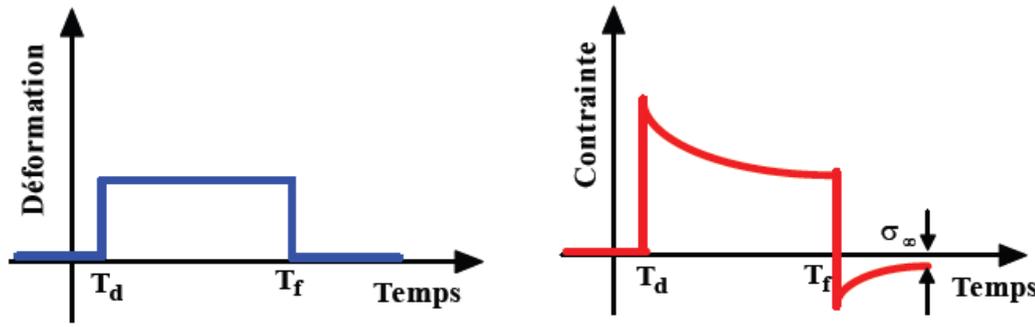


Figure 1.14 : Expérience d'effacement (à gauche) et réponse du matériau en contrainte (à droite)
(François, 2003).

1.8.6.2. Définition d'un corps viscoélastique linéaire

De plus, un matériau viscoélastique possède un comportement linéaire s'il suit le principe de superposition de Boltzmann, si sa réponse à une sollicitation composée d'un certain nombre de sollicitations est la somme des réponses à chacune de ses sollicitations (Salençon 1983).

$$\begin{aligned}
 \text{Sollicitation : Réponse} \quad \varepsilon_1(t) &\rightarrow \sigma_1(t) \\
 \varepsilon_2(t) &\rightarrow \sigma_2(t) \\
 \lambda\varepsilon_2(t) + \mu\varepsilon_2(t) &\rightarrow \lambda\sigma_2(t) + \mu\sigma_2(t) \quad \forall(\lambda, \mu) \in R^2
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

1.8.6.3. Fonction de retard (ou de fluage) et fonction de relaxation

- **Fonction de retard (ou de fluage)**

Le phénomène de fluage correspond à l'accroissement différé, dans le temps des déformations. On détermine la fonction de fluage, à partir d'un instant t_0 une contrainte σ_0 constante.

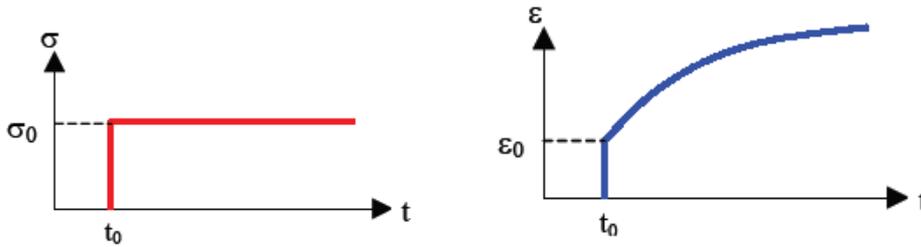


Figure 1.15 : Essai de fluage –comportement à contrainte constante (François Olards, 2003)

la contrainte échelon imposé est définie par :

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t - t_0) \tag{1.6}$$

Avec : $H(t-t_0) = 0$ Si $t-t_0 \leq 0$

$H(t-t_0) = 1$ Si $t-t_0 > 0$

La reponse en déformation est :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 j(t_0, t)$$

Avec $j(t_0, t)$ fonction de fluage ou de retard .

Pour une contrainte qui varie dans le temps ,à temperature constante ,de la forme suivante :

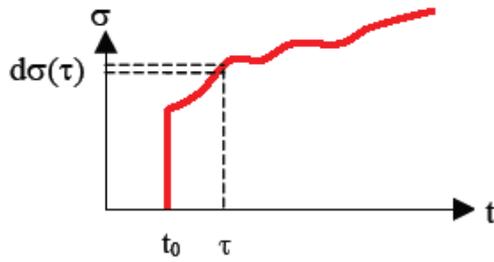


Figure 1.16 : Sollicitation à contrainte variable dans le temps (François Olards, 2003).

La réponse, à l’instant t, à l’incrément de contrainte $d\sigma(\tau)$ effectué à l’instant τ vaut :

$$d\varepsilon(t) = d\sigma(\tau) j(\tau, t). \tag{1.7}$$

Puis, pour le matériau viscoélastique considéré, comme le principe de superposition de Boltzmann s’applique, la déformation $\varepsilon(t)$ est la somme des réponses à chacune des sollicitations élémentaires, on peut donc écrire :

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t j(\tau, t) d\sigma(\tau) \text{ ou } \varepsilon(t) = \sigma(t_0) j(t_0, t) + \int_{t_0}^t j(\tau, t) \dot{\sigma}(\tau) d\tau . \tag{1.8}$$

Si σ dérivable pour $\tau > t_0$

Pour un matériau non vieillissant (dont les propriétés rhéologique n’évoluent pas en cours du temps), on a :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0) j(t_0, t) + \int_{t_0}^t j(\tau, t) \dot{\sigma}(\tau) d\tau \tag{1.9}$$

En intégrant par parties le second terme de l’expression ci-dessus, on trouve :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)j(0) + \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial j}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad (1.10)$$

Le premier terme représente la réponse instantanée, tandis que le deuxième terme représente la réponse différée.

- **Fonction de relaxation**

La relaxation est la diminution de contrainte en fonction du temps d'un matériau soumis à une déformation maintenue constante dans le temps.

A température fixe, à partir de l'instant t_0 , on impose une déformation échelon :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t - t_0) \quad (1.11)$$

Avec : $H(t - t_0) = 0$ si $t - t_0 \leq 0$ et $H(t - t_0) = 1$ si $t - t_0 \geq 0$

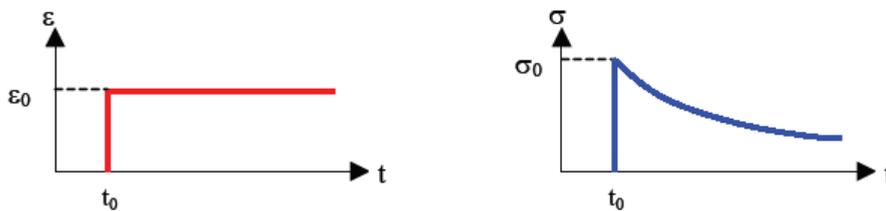


Figure 1.17 : Essai de relaxation – comportement à déformation constant (François Olards, 2003).

La réponse en contrainte est :

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 R(t_0, t) \quad (1.12)$$

Avec : $R(t_0, t)$ fonction de relaxation.

En faisant l'hypothèse de matériau non- vieillissant, pour une déformation qui varie dans le temps, à température constante, la contrainte peut s'écrire :

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)R(0) + \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial R}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad (1.13)$$

Le premier terme représente la réponse instantanée, tandis que le deuxième terme représente la réponse différée.

1.8.6.4. Module complexe E^* (mode fréquentiel)

Une des possibilités pour décrire, le comportement viscoélastique linéaire est de calculer expérimentalement et de tracer l'évolution du module complexe, pour se faire, on utilise un signal de chargement sinusoïdal de fréquence f et de pulsation $\omega = 2\pi f$.

Physiquement, le module complexe E^* représente en module ($|E^*|$) le rapport des amplitudes, de la contrainte sinusoïdale appliquée et de la déformation correspondante (ou réciproquement), et en argument (φ) le déphasage, qui existe entre la contrainte et la déformation, E^* n'est que autre que la fonction complexe de relaxation R^* prise au point $p = i\omega$.

1.8.6.5. Essai de traction directe

Il s'agit d'un essai de traction à température constante et à vitesse de déformation constante. Au cours de l'essai, les paramètres mesurés sont la contrainte, la déformation et la température à l'instant t . La contrainte maximale, encore appelée contrainte de rupture et la déformation correspondante, donnent directement accès à la résistance en traction du matériau testé, pour les conditions d'essais (température, vitesse) considérées.

On observe classiquement que plus la vitesse de déformation imposée est élevée, Plus l'enrobé a un comportement et l'allongement à la rupture est faible (1.18).

Il est à noter enfin que l'essai de compression diamétrale ("Essai de traction indirecte ") ou encore ("Essai brésilien") peut également être réalisé en laboratoire afin de, déterminer la résistance en traction d'un enrobée bitumineux ; Le principale avantage de ce dernier essai réside, dans le fait que les éprouvettes peuvent être directement prélevé in-situ, et qu'elles ne doivent pas être collées sur des casques en métal, son principale désavantage est qu'il s'agit d'un " essai non homogène".

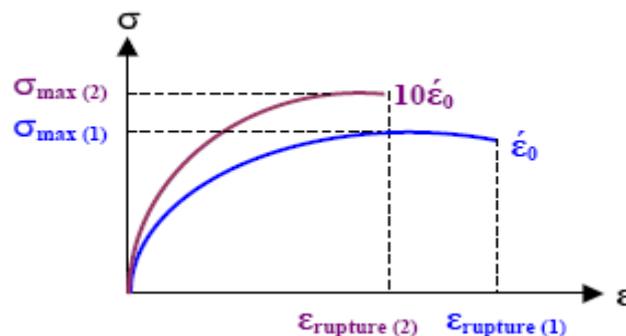


Figure 1.18 : Résultat classique pour l'essai de traction sur enrobés (François Olards, 2003)

(1) essai à vitesse de déformation $\dot{\epsilon}_0$

(2) essai à vitesse de déformation $10\dot{\epsilon}_0$.

1.9 Les modèles de comportement

Deux méthodes sont utilisés, afin d'exploité les données rhéologique collectées du bitume ;

- La première : est une méthode empirique qui choisit une formulation mathématique a priori, puis elle est adapté aux valeurs et paramètres identifié du modèle par des techniques convenable et statistique ;
- La deuxième : est une méthode mécanique, elle repose sur des modèles rhéologique, dans la mesure où une combinaison de composantes mécanique (à priori un ensemble de ressort et d'amortisseur) est employé dans le but de décrire les aspects élastique et

visqueux. Les modèles mécaniques ont des avantages considérables par rapport aux modèles empiriques :

- Ils peuvent être aisément mis en application dans des techniques d'analyse numérique ;
- Ils sont amendable aux solutions de forme analytique précise, puisque les équations sont aisément différenciées et intégrées ;
- Leurs constantes mécaniques (c.-à-d, des ressorts et des amortisseurs) reflètent les comportements qui peuvent être facilement visualisés en termes de technologie (élasticité linéaire, viscosité newtonienne, plasticité,...).

1.9.1 Modélisation du comportement linéaire (VEL)

Il ya différent modèle rhéologique trouvées dans la littérature pour la modélisation des matériaux bitumineux en petites déformations, *i.e.* dans le domaine viscoélastique linéaire (VEL).

1.9.1.1 Assemblage discret de ressorts et d'amortisseurs - spectre discret

Toute combinaison de ressorts (éléments élastiques) et d'amortisseurs linéaires (éléments visqueux Newtoniens) constitue un modèle viscoélastique linéaire analogique (Ferry, 1980). De nombreux modèles combinant ressorts et amortisseurs linéaires ont, par ailleurs, été employés et présentés dans la littérature de manière à décrire le comportement viscoélastique linéaire des liants et des mélanges bitumineux. Les combinaisons les plus simples sont les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt.

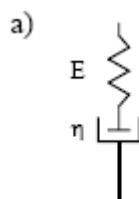


Figure 1.19 : Eléments de Maxwell (liquide viscoélastique).

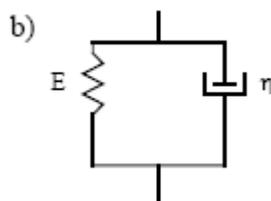


Figure 1.20 : Élément Kelvin-Voigt (solide viscoélastique) .

1.9.1.2 Modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt généralisés

Le modèle de Maxwell généralisé est constitué d'un groupe de n éléments de Maxwell montés en parallèle, avec éventuellement un ressort et un amortisseur linéaire en parallèle. Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé est constitué d'un groupe de n éléments de Kelvin-Voigt en série, avec éventuellement un ressort et un amortisseur linéaire en série.

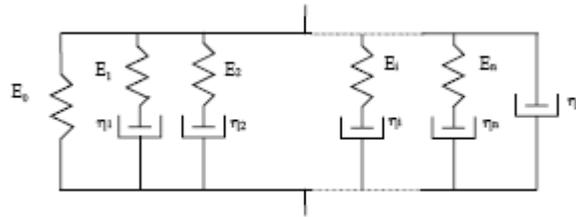


Figure 1.21 : Modèle de Maxwell généralisé.

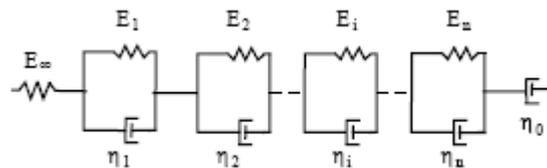


Figure 1.22 : Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

Les modèles généralisés de Maxwell et de Kelvin-Voigt (Figure 1.21, Figure 1.22) permettent une description tout à fait satisfaisante du comportement des liants et des enrobés bitumineux à condition qu'un nombre suffisant d'éléments (n) soit considéré ($n=8$ apparaît comme un minimum).

1.9.2 Modèles analogiques avancés

Les modèles analogiques "avancés" à spectre continu (i.e. Pouvant être représentés par une infinité d'éléments de Kelvin-Voigt en série ou d'éléments de Maxwell en parallèle) ont une signification et une représentation physique : ainsi ils sont utilisés pour des expressions analytiques empiriques suivantes :

1. Élément parabolique

Un élément parabolique est un modèle analogique possédant une fonction de fluage $J(t, t')$ de type parabolique et un module complexe $|E^*|$, s'écrivant sous les formes suivantes :

$$J(t, t') = a \left(\frac{t}{\tau} \right)^h \tag{1.15}$$

$$|E^*|(i\omega\tau) = \frac{(t\omega\tau)^h}{a\Gamma(h+1)} \quad (1.17)$$

Avec :

i : nombre complexe ($i^2=-1$)

ω : pulsation

h : exposant ($0 < h < 1$)

a : constante sans dimension

Γ : fonction gamma

τ : temps caractéristiques

τ est fonction de la température et tient compte du principe d'équivalence temps-température. Ce modèle analogique a un spectre continu puisque sa représentation par un modèle de Maxwell (ou Kelvin-Voigt) généralisé nécessite une infinité d'éléments .

2. Modèle de Huet

Le modèle de Huet (HuetC, 1963), fut initialement proposé pour modéliser le comportement des liants et des enrobés bitumineux. Il s'agit d'un modèle analogique constitué d'un assemblage d'un ressort de rigidité E_∞ (qui représente le module instantané) et de deux éléments à fluage parabolique ($J_1(t) = at^h$ et ($J_2(t) = bt^k$) monté en série (figure 1.23). Ce modèle a également un spectre continu, i.e. qu'il peut être représenté par une infinité d'éléments de Kelvin-Voigt en série ou d'élément de Maxwell en parallèle. L'expression du module complexe est la suivante:

$$|E^*|(\omega) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (1.18)$$

Avec :

i : nombre complexe ($i^2=-1$)

$\omega = 2\pi$ (pulsation)

E_∞ = limite du module complexe

h, k : exposant tels que ($0 < k < h < 1$)

δ : constante sans dimension

τ : temps caractéristique dont la valeur varie avec la température.

Aucune expression analytique de la fonction de relaxation $R(t, t')$ n'est disponible. La fonction de fluage est donnée par:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_\infty} \left(1 + \delta \frac{(t/t')^k}{\Gamma(k+1)} + \delta \frac{(t/t')^h}{\Gamma(h+1)} \right) \quad (1.19)$$

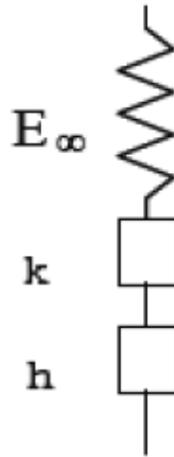


Figure 1.23 : représentation du modèle de Huet (Huet C, 1963)

3. Modèle de Huet-Sayegh

Ce modèle diffère de celui de Huet pour le domaine des basses fréquences et des hautes températures. Le modèle de Huet donne, en effet, un comportement fluide aux enrobés dans le domaine de basses fréquences et des hautes températures. En particulier, la norme du module complexe tend vers zéro à haute température et basses fréquences (équation (1.20)).

$$|E^*|(i\omega\tau) = E_0 + \left(\frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} - (i\omega\tau)^{-h}} \right) \quad (1.20)$$

E_0 le module statique quand $\omega t \rightarrow 0$

Le modèle d'Huet-Sayegh, (Sayegh 1965) traduit correctement le comportement des enrobés bitumineux dans le domaine des petites déformations quelles soient la fréquence et les températures considérées

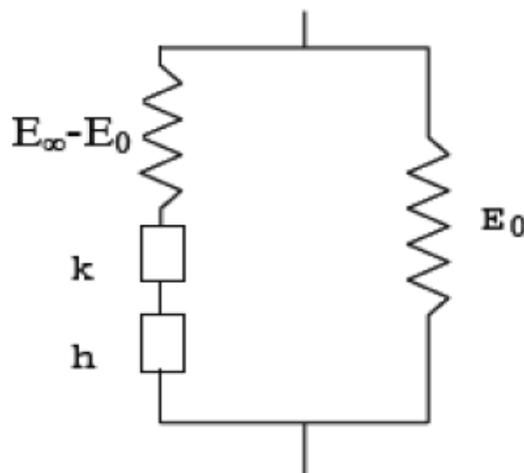


Figure 1.24 : Représentation du modèle de Huet-Sayegh(1965) h et k sont deux éléments à fluage parabolique, (Sayegh G, 1965).

Généralement, la modélisation du comportement non-linéaire des enrobés bitumineux consiste à considérer la décomposition suivante de la déformation :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp} \quad (1.21)$$

ε^e : Déformation élastique ;

ε^{vp} : Déformation plastique.

Le modèle pour les enrobés bitumineux proposée par Bonnier (1993),(Bonnier, 1993).Il simule correctement des essais de fluage menés en laboratoire,où plusieurs incréments de contraintes sont appliqués.Plus récemment,Airy et al.(2003) ont également proposé un modèle prenant en compte le comportement non-linéaire des enrobés bitumineux .L'efficacité du modèle à jusqu'à présent été vérifié pour la simulation d'essais de compression (Airy2003).

Un modèle rhéologique unidimensionnel spécifiquement a été développé pour les enrobés bitumineux (L.G.M de L'ENTPE, Département Génie civil et bâtiment), ce modèle, appelé modèle« *DBN* », (Di Benedetto-Neifar) introduit un comportement viscoélastique linéaire générale en petites déformation, et prend en compte les non-linéarités et l'écoulement viscoplastique, ces deux comportement sont reliés par une relation hyperbolique, dans un premier temps, afin de, simplifier la formulation.

L'effet de la température est décrit aussi bien en petites déformation, ou le principe d'Equivalence temps-températures s'applique, qu'en grandes déformations. Ces travaux concernent aussi bien le comportement des mélanges bitumineux en petites déformations, que leur comportement à l'écoulement ou à la rupture (Di Bendetto, H.1987), (Olards,F. 2003). La description du comportement du béton bitumineux, à l'aide du modèle généralisé de Di Bendetto (1987) (figure1.26).

S'effectue en qualifiant et en identifiant les corps non-visqueux EP_j (élasto -plasticité) et visqueux V_j .

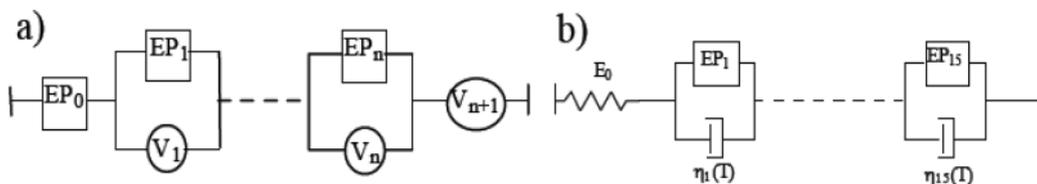


Figure 1.25 : a) modèle généralisé d'après Di Bendetto (1987),b) structure choisie comme modèle discret pour les enrobés bitumineux.

Le nombre de corps considérés doit se situer dans une fourchette « *raisonnable* » afin de trouver un compromis entre la complexité des développements et une description «

fine » du comportement du matériau. Des modèles constitués de 10 à 20 éléments permettent une description assez fine du comportement des enrobés .en outre, l'aspect « *discret* » de la modélisation présentée ne doit donc pas être considéré comme restriction du modèle puisqu'il est possible d'étendre le modèle en considérant une infinité de corps (Olars, F.2003).

1.10 Critères de contraintes maximales

Un critère de rupture pour les enrobés bitumineux à été proposé à partir des résultats d'essais triaxiaux réalisés par Di Benedetto et Yan (1994) (Yan.X, 1992). Dans l'espace des contraintes principales($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), ce critère est constitué de deux parties coniques coupant les trois plans de coordonnées selon une courbe unique : l'une lorsque les contraintes principales sont positives et l'autre quand au moins une des contraintes principales est négative. Les axes des deux cônes se superposent avec la trisectrice (écrouissage isotrope).L'intersection de ce critère avec un plan dévia torique (perpendiculaire à la trisectrice) donne un triangle équilatéral. Ce critère est donné en figure (1.26)

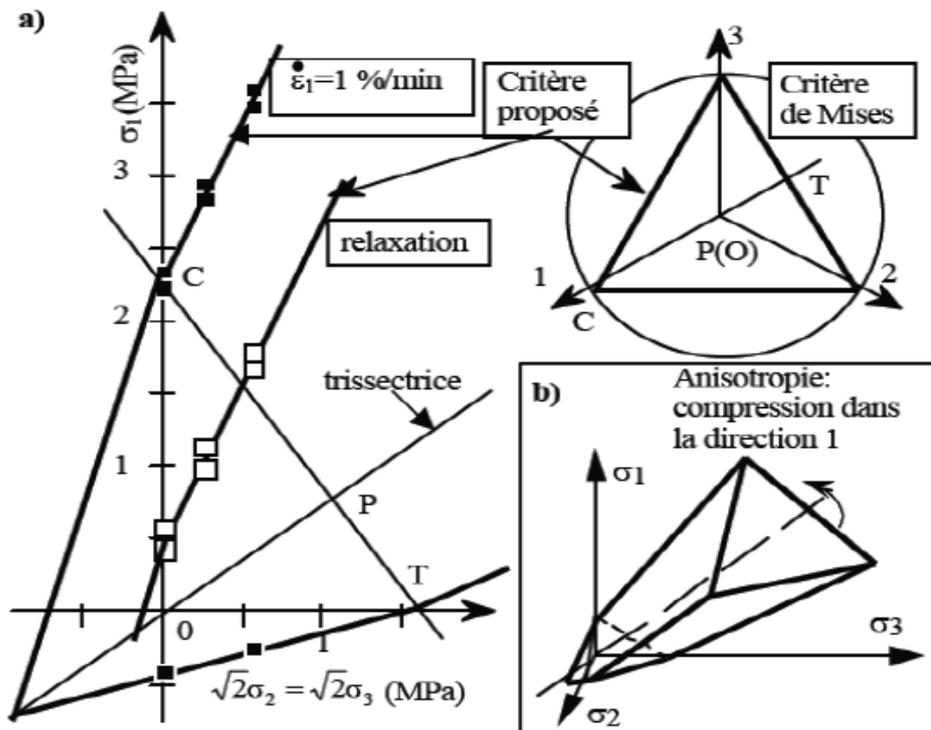


Figure 1.26 : Critère de rupture de Di Benedetto pour les enrobés bitumineux. a) représentation dans les axes contraintes axiale (σ_1)- contrainte radiale ($2\sigma_2 = 2\sigma_3$) et dans le plan dévia torique ;b) représentation dans l'espace des contraintes principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)(Yan, X, 1992)

1.11 Conclusion

Les recherches illustrées lors de cette étude bibliographique, sur le plan expérimentale ont mis en évidence la complexité du comportement des enrobés bitumineux sous l'effet de sollicitations extrêmes, quelles soient d'origine thermique ou mécanique, ils jouent un rôle important dans le mécanisme de l'endommagement du matériau.

L'analyse de la littérature a souvent porté sur les performances de ces matériaux bitumineux, sans tenir compte de leurs l'histoire thermique. Des études ont été réalisées pour évaluer l'effet des hautes températures (oxydation, vieillissement, durcissement, orniéage et déformation permanente) et le rôle des basses températures (gel, fragilité, fissuration thermique...).

Les essais de points de ramollissement, pénétrabilité, Fraas et de viscosité donnent des indications satisfaisantes sur la susceptibilité et la fragilité du bitume, mais non suffisante pour identifier son comportement viscoélastique. Les propriétés des bitumes déterminent principalement les variations de la rigidité de l'enrobé.

Certaines études ont prêté plus d'attention au comportement en fatigue sous des contraintes mécaniques simulant des contraintes thermiques, (Anderson, D.A christensen, 1994). D'autre ont étudié l'évolution physico-chimique des bitumes sous haute températures .

Les fissures observées dans les enrobés bitumineux, quelles soient engendrées par des contraintes thermiques ou liés à des mécanismes de fatigue, sont en grande partie localisées au sein même du film du liant. Ce sont directement les propriétés mécaniques du bitume qui influent sur l'apparition et la propagation de ce type de dégradation.

Il est donc utile d'approfondir les recherches sur l'évolution du matériau en condition thermiques, le choix convenable pour une méthode rationnelle pour évaluer l'effet de la température, pour cela nous allons conduire :

Une modélisation de l'effet thermique et son impacte sur le comportement des bétons bitumineux, ainsi que son influence sur les contraintes et déformations engendrées.

L'étude du transfert thermique en fonction de la profondeur du masque constituant le masque d'étanchéité amont dans les barrages dans un climat semi-aride.

2.1. Introduction

Pour mieux sécuriser le pays en matière d'approvisionnement en eau potable et irrigation, ces quatorze dernières années, l'Algérie a consenti de gros investissements dans la construction des barrages, quatorze infrastructures ont été réalisées, ramenant ainsi à 68 le patrimoine géré par l'ANBT. Actuellement, 68 barrages sont en exploitation à l'échelle nationale d'une capacité de 7,1milliards de m³ce qui représente un taux de remplissage de (78%).

Il est admis, aujourd'hui, que le niveau de consommation d'eau douce d'un pays exprime un critère de son niveau de développement économique. D'ailleurs, l'une des conclusions de la conférence de la Haye sur l'eau (1994) abordait dans le même sens pour souligner que « l'eau est un bien économique, sa pénurie se présente comme un facteur réducteur du niveau de vie et aussi une source de conflits ».

Ce chapitre comportera en premier lieu sur : l'état des lieux des barrages en Algérie et le développement de leurs problèmes et en second lieu, sur les infiltrations dans les barrages et les moyens de luttés contre ces derniers.

2.2. Bref historique sur l'état de l'eau en Algérie

Dans la littérature relative à l'eau, l'Algérie se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques. C'est-à-dire, en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an.

Ainsi, on parle de pénurie lorsque les ressources en eau d'un pays ou d'une région sont inférieures à 1.000 m³ par an et par habitant. Ce seuil est basé sur l'ensemble des besoins en eau pour l'agriculture, les villes et l'industrie ainsi que pour le maintien des écosystèmes d'eau douce (SCHIFFLER, 2002).

L'Etat algérien devait, donc impérativement axer ses efforts sur :

- L'accès à l'eau, un droit qui doit être exprimé sans ambiguïté car c'est un élément de dignité humaine ; comme le droit à la santé, à l'éducation, au logement. Son éloignement ou son absence empêche le développement économique.

Si en 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m³, ce qui plaçait le pays dans une situation confortable, elle n'était plus que de 720 m³ en 1990, 680 m³ en 1995, 630 m³ en 1998. Elle est estimée à environ 500 m³ en 1999 (CNES 2000) à comparer avec les 3.600 m³ du Français (TRUCHOT, 2006).

Ainsi, le citoyen algérien est donc, très loin de disposer de la quantité nécessaire à ses besoins. En effet, seulement 150 litres (55 m³/an) lui sont théoriquement distribués par jour (alors que la dotation journalière était de 187 litres en 1966 selon Mutin).

En 1980, une étude de l'O.M.S, estimait le taux de satisfaction des besoins à 50 %. Cette étude a révélé que le volume moyen consommé réellement par habitant était de 48 litres/habitant/jour alors que la dotation livrée en réseau était de 96 litres/jour. On mesure bien à la fois la faiblesse de la consommation et l'ampleur des pertes en réseau (50%).

Il serait efficace de limiter les pertes ou le gaspillage et d'économiser l'eau que d'améliorer la ressource disponible. Il s'agit notamment des problèmes posés par les pertes dans la distribution aussi bien pour les réseaux publics dont le vieillissement implique une politique de gestion qui reste à élaborer, que pour les réseaux intérieurs des immeubles et les appareils d'utilisation.

2.3. Le bilan hydraulique des barrages

La carte de répartition des barrages montre qu'ils se concentrent presque exclusivement dans la partie tellienne du pays où les conditions naturelles (ressources en eau et sites favorables) sont optimales.

Mais l'indigence des écoulements peut expliquer en partie la faiblesse du taux de remplissage des barrages notamment dans la région ouest du pays et sur les hauts plateaux où règne un climat semi-aride. Cette indigence ne semble pas avoir été suffisamment et sérieusement pris en compte dans l'étude d'avant-projet des barrages.

De plus, les cours d'eau algériens, de taille relativement modeste, ne semblent pas pouvoir alimenter suffisamment les retenues car si les ressources en eau de surface sont estimées à 12,3 milliards de m³, le volume mobilisable (ou régularisable) ne représente que la moitié 52%.

2.4. L'état des barrages en Algérie

Pour atténuer ce déséquilibre, une meilleure gestion de la ressource en eau est impératif ; il s'agit de mettre en place des mesures simples qui permettent de dégager des réserves importantes du côté de l'offre (épuration, entretien des barrages, réduction des pertes des réseaux, dessalement) et de la demande (tarification, contrôle du détournement des eaux).

En valeur relative, seuls 1,7 milliards de m³ (13,82 %) étaient régularisées dans les années 1980, pour passer à 6,44 milliards de m³ en 2009 (52,35 %).

Certes, un effort important a été entrepris par les pouvoirs publics, mais beaucoup reste à faire car ces chiffres sont en fait la Capacité théorique des barrages qui sont soumis à des réductions importantes en raison de l'envasement, des fuites et de la forte évaporation, notamment en cas de sécheresse prolongée.

2.4.1. Situation générale des barrages en Algérie

Le taux de remplissage de 100 % est trompeur, quand il s'agit des petits barrages comme Meurad (0,25 hm³), Foum El Gueiss (1,3 hm³), Fergoug (4,2 hm³). C'est pourquoi il est préférable d'utiliser des volumes, autant que possible, plutôt que les pourcentages.

La capacité estimée n'est pas actualisée, donc c'est la capacité initiale moins l'envasement, cela veut dire que certains barrages sont dans une situation critique ; Foum El Gherza serait envasé à près de 59 % (27,6 hm³), le Ghrib et le K'sob à plus de 48 % (respectivement 134,8 hm³ et 13,9 hm³), l'Oued Fodda à 45 % (102,4 hm³), le Boughzoul à 35 % (19,4 hm³).

Pour le reste des barrages, le taux d'envasement oscille entre 0,4 % (1,1 hm³) pour le Sidi Yacoub à 33 % (24,6 hm³), pour le Bouhanifia. Selon les statistiques officielles, fournies par l'ANBT mais non actualisées, les barrages ont déjà perdu 510 hm³ (passant de 6447 hm³ de capacité initiale à 5938 hm³ de capacité estimée), à partir de là et en se basant sur les chiffres officiels de l'envasement qui est estimé à 2 ou 3 % par an, le volume emmagasiné en 2009 doit être amputé de 120 hm³ annuellement durant les 9 années, ce qui donne un envasement effrayant de plus d'un milliard de m³ (dans l'hypothèse de 2 %/an) pour les 57 barrages.

On peut ainsi dire, sans exagération, que si rien n'est envisagé pour limiter ce phénomène, à l'avenir (dans le moyen et long terme), l'hydraulique de l'Algérie sera fortement compromise, d'autant plus que les sites susceptibles d'accueillir les barrages se font de plus en plus rares.

Etant intimement lié à la pluviométrie, le remplissage des barrages est généralement moyen à médiocre. La figure (2.1) montre que le volume des barrages n'a pas dépassé les 3 milliards de m³ (50 % de la capacité estimée) que durant la dernière année (2009).

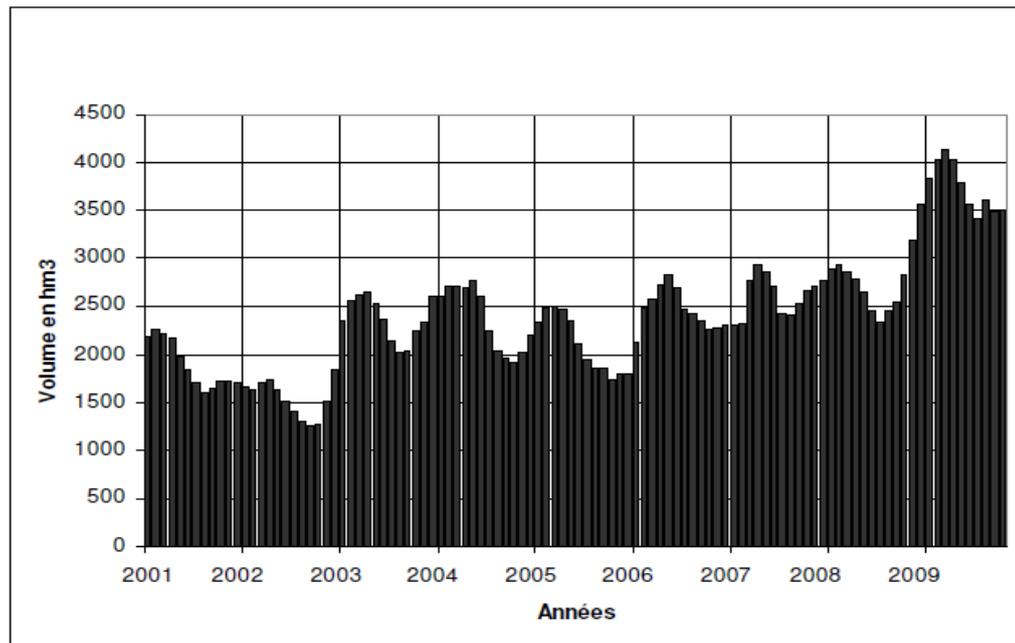


Figure 2.1 : Evolution du volume de remplissage des barrages (Touati Bouzid .2010).

Les 48 barrages que comptait le pays en 2001, ont enregistré une chute importante, passant de 49,9 % à 37,5 %. Si, les barrages de l'Est et du Centre se remplissaient considérablement entre (2002 -2003), passant respectivement de 36 à 73 % et de 29 à 62 % (plus que du simple au double) et ceux du Cheliff passaient modestement de 35 à 39 %, les barrages de l'Ouest, eux chutaient de 33 à 28 % (tab 2.1).

Le remplissage a été médiocre durant l'année 2002 avec seulement 33,74 % de capacité estimée ; heureusement pour le pays, qui comptait déjà sur une réserve, plutôt, confortable en 2001 avec 42 %, sinon le recours à l'importation de l'eau aurait été inévitable. En revanche, l'année 2003 a été celle de la reconstitution des réserves puisqu'un bond important a été enregistré (53,73 %). Il fallait attendre 2009 pour voir le volume atteindre le record de la période étudiée (2001-2009) avec 60,20%.

2003 a été particulièrement bénéfique pour les barrages algériens, puisqu'ils avaient dépassé le seuil symbolique des 50% du taux de remplissage .On a enregistré entre le 14 et le 18 Janvier un apport de 174,5 millions de m³ au niveau des retenues du pays, le barrage d'El Agrem a évacué le surplus, suite à quelques mois pluvieux (1100 mm en 4mois à Jijel).

C'est au centre que les apports ont été les plus remarquable, Keddara, Ladrat ont fait le plein entre Avril et juin 2003(100%). A la fin de janvier 2003, les barrages de l'est ont connu un remplissage maximum pour certains, quant aux autres ont dépassé les 90%.

Le meilleur remplissage a été enregistré en 2009 pour l'ensemble des régions, des différences sont à souligner, en 2009 pour l'ouest avec près de 56%, le Cheliff pour près de 52%, 2003 pour l'est avec 73%, 2004 pour le centre avec 68%. La décroissance est-ouest est donc confirmée puisque on retrouve par ordre : L'est, le centre et loin derrière l'ouest et le Cheliff avec des taux qui se rapprochent.

Tableau 2.1 : Moyenne annuelle de la capacité initial des barrages Algérien (2001-2009).

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	moyenne
Ouest	30,50	27,03	24,53	21,39	13,48	17,82	18,82	22,91	52,11	25,40
Est	37,13	31,91	68,04	64,12	65,67	63,40	60,80	56,19	65,79	57,01
Cheliff	39,32	28,59	31,87	29,23	16,96	20,93	20,67	21,67	43,94	28,13
Centre	32,09	24,78	55,72	58,25	55,42	51,87	54,53	54,04	57,02	49,30
moyenne	34,76	28,08	45,04	43,25	37,88	38,50	38,71	38,70	54,72	39,96

Source : ABHCSM

Tableau 2.2 : Moyenne annuelle de la capacité estimée des barrages Algérien (2001-2009) en %

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	moy
Ouest	36,93	33,45	28,66	27,31	18,29	21,79	20,82	25,76	55,94	29,88
Est	44,02	36,08	73,06	69,92	70,13	68,69	65,52	60,26	71,66	62,15
Cheliff	49,85	35,63	38,89	37,76	20,71	23,46	23,06	24,65	51,67	33,96
Centre	37,61	29,78	62,30	68,07	60,58	55,92	58,62	57,98	61,52	54,71
moyenne	42,10	33,74	50,73	50,76	42,43	42,46	42,00	42,16	60,20	45,18

Source : ABHCSM

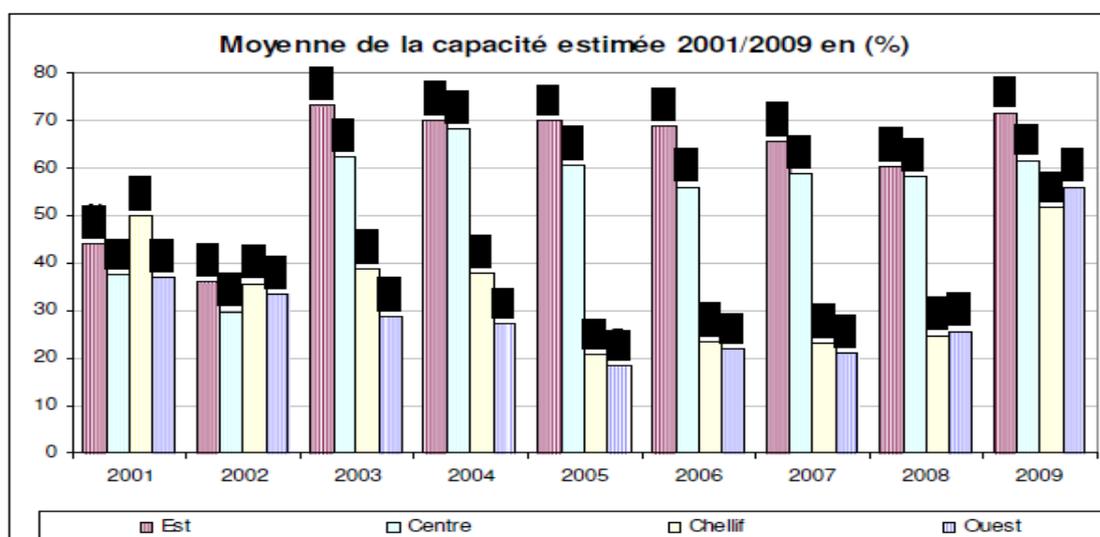


Figure 2.2 : Moyenne de la capacité estimée en 2001/2009.

2.5. Historique des barrages en Algérie

2.5.1. La période coloniale

Les premiers ouvrages remontent au 19^{ème} siècle, où quelques petits barrages ont été réalisés dans la partie occidentale du pays. Ces réalisations n'ont pas concerné l'est Algérien. Les premiers barrages construits dans cette région furent au milieu du 20^{ème} siècle Foum el guess (Khenchela) en 1939, suivie de K'sob (Msila) en 1940 et du Zerdezas (Skikda) en 1945, mais la méthode de construction n'étant pas au point, certains d'entre eux ont été vite emportés par les oueds et d'autres ont été reconstruit plusieurs fois, et cela en raison :

- La technologie des barrages qui n'était pas encore connue ;
- Les régimes des cours d'eau étaient mal connus ;
- Les moyens techniques mis en œuvres pour la construction de ces barrages étaient insuffisants, ce qui faisait trainer les chantiers : la construction du barrage de Djidiouia (0.7 hm³) s'est étalée sur vingt ans (1847-1877), celui du hamiz (14hm³) sur 25ans.

Tableau 2.3 : les barrages algériens de premières génération (sources : Flamant in Perennes)

Nom	Oued	Année de construction	Volume initial (hm ³)
Meurad	Djabroun	1852-59	0,8
Telat	Telat	1860	-
Telat	Telat	1869-70	0,7
Fergoug	Habra	1865-71 puis 1882	30
Cheurfas	Sig	1880-82	3
Cheurfas	Sig	1886-92	18
Djidiouia	Djidiouia	1857-77	0,7
Hamiz	Hamiz	1869-94	14

Cas du premier barrage construit à Meurad en 1859 (Tipaza), de très faible capacité (0.98hm³), il sert uniquement à L'AEP.

Le deuxième barrage (1860) réalisé en terre à tlelat possède une capacité de 0.7hm³, et une hauteur de 27m, il s'est rompu 1862 après sa mise en exploitation pour des raisons d'étanchéité.

La réalisation du barrage de hamiz fut une œuvre qui demanda 40 ans, il fut conçu en 1854. D'autres barrages ont été construits vers la fin du siècle (Cheurfa, Fergoug).

Tableau 2.4 : les barrages algérien seconde génération (source JJ Perenne corrigé)

Nom	Oued	Année de mise en service	Volume initial (hm ³)
O. Fodda	Fodda	1932	228
Boughzoul	Chelif	1934	55
Bakhadda	Mina	1936	56
Ghrib	Chelif	1939	280
Foum El Gueiss	Gueiss	1939	3,4
K'sob	K'sob	1940	12,4
Zardezas	Saf-Saf	1946	14,9
Beni Bahbel	Tafna	1946	63
Bouhanifia	Hammam	1948	73

À la fin de la période coloniale la réalisation restait à 15 ouvrages, environ la moitié de ces barrages étaient envasés, pour la plupart ils sont inutilisables (K'Sob, Zardezas, Hamiz, Foum El Gueiss).

2.5.2. La période Entre 1962-1980

Une période dirigiste, marquée par l'absence de politique hydraulique. Seulement trois barrages ont été construit (le Cheffia en 1965, Djorf torba en 1969, sidi Mohamed Ben Aouada en 1970), qui portés la capacité de stockage de 910 à 1660 hm³, or que pendant cette période, les barrages hérités par l'ère coloniale se sont dégradés sous l'effet de l'envasement, faisant perdre annuellement de 2 à 3% de leur capacité utile.

Pas moins de 19 barrages furent mis en eau entre 1961 et 1980, dont 6 pour la seule année de 1978.

Ce retard dramatique accumulé par l'Algérie, en matière d'hydraulique entre 1962 et 1980 eu pour conséquence une régression des superficies irriguées, donc une baisse de la production agricole et une forte dégradation de la satisfaction de la demande urbaine en eau potable 1980.

2.5.3. La période entre 1980-1990 (le réveil hydraulique)

Suite à une longue période de sécheresse, le pays a opté pour une politique qui a dynamisé le secteur hydraulique pour tenter de rattraper le retard, ce qui a conduit à une relance dans la construction des barrages ; 19 barrages en moins de 10 ans (1980-1999), la période prolifique s'est située entre (1985-1989), où pas moins de 15 barrages sont entrés en service, soit 3 barrages par an, portant le total 37 ouvrages et un volume de stockage 3.9 milliards de m³ ; 11 se situaient à l'ouest , 9 dans le Cheliff, 7 au centre et 10 à l'est .

2.5.4. La décennie 1990-2000

La décennie a connu un fléchissement important dû à deux raisons essentiellement, l'une sécuritaire rendant les travaux trop risqués pour les ouvriers, aussi bien pour les étrangers que pour les nationaux ; l'autre financière, quand le pays connaissait d'énormes difficultés d'apport de capitaux, le résultat est que seul 7 barrages furent mis en service.

2.5.5. A partir de 2000

L'augmentation de la cadence des réalisations et le recours aux nouvelles technologies : grâce à l'embellie financière découlant de l'importance des flambées des prix du pétrole, entre (2000-2006), 13 barrages furent mis en eau, ce qui fait 1 ou 2 barrages sont mis en service, donnant en (2009), 60 barrages en exploitation dont 58 avec une capacité supérieure à 10 millions de m³, et un volume régularisé global de plus de 7 milliards de m³ ; ce sont des ouvrages qui atteignent rarement les 300m³.

Les barrages Algériens sont dotés de moyenne capacité, les plus grands d'entre eux ont une capacité de 450hm³, pour le barrage de Gargar à Relizaine, 640hm³ pour Koudiat acedrone Bouira, à 795 hm³ pour le barrage de Beni Haroun (Mila), les experts soulignent que les conditions naturelles en Algérie ne permettent pas, d'avoir des barrages de plus grandes capacités.

Comme c'est le cas par exemple du Maroc (avec 5 barrages dépassant le milliard de m³chacun).

Tableau 2.5 : évolution et répartitions des barrages par période de réalisation et par région

Jusqu'en 1962	5	4	2	4	15
1962-1980	7	4	2	5	18
1980-1990	11	9	7	10	37
1990-2000	13	9	8	14	44
2000-2009	16	12	12	20	60

Cette répartition fait ressortir que l'évolution du nombre de barrages, est beaucoup plus en faveur de la région Est qui a connu pas moins de 10 réalisations depuis (1980) suivi par celles de l'Ouest et du centre avec 5 ouvrages, enfin, la région du Cheliff avec 3 réalisations seulement.

Ce basculement de situation, qui était plutôt favorable à l'Ouest, est également perceptible à travers la capacité des barrages. Si au lendemain de l'indépendance, la capacité théorique était

beaucoup plus importante à l'Ouest, elle est désormais du domaine de la région Est qui est de l'ordre de 36% de capacité estimée.

Cet avantage est également lisible à travers le taux de remplissage qui est pour la moyenne des 9 années ; de plus de 62 % pour la région Est et de seulement 29% pour la région Ouest.

2.6. Chronologie des barrages mis en eau de l'Algérie indépendante

Chronologiquement, après le réveil hydraulique, on note la mise en eau de pas moins de 4 barrages en 1984 : Deurdeur, Harraza(Ain Defla), Guenitra(Skikda) et Merdja sidi Abed (Relizaine). L'année suivante, 4 autres sont venus renforcer le parc barrage avec Bouroumi (Blida), Lekehal (Bouira), Keddara (Boumerdes) et Sidi Yacoub (Chlef).

En 1986 : le barrage de Ain Zada est entré en service .Destiné initialement à l'irrigation ,il fut ensuite détourné pour l'alimentation des deux grandes agglomérations de la région (Setif et Bordj Bou Arréridj), l'Oest du pays s'est vu doter d'un nouveau barrage le Ouizert(Mascara).

En 1987 : c'est au tour du barrage de Hammam Grouz qui est venu étancher la soif de Constantine, de Ain Dalia pour approvisionner en eau la ville de Souk Ahras, de Hammam Debagh, pour irriguer le périmètre de Guelma-Bouchgouf d'une superficie de 13 000 ha.

La région Ouest et la région centre bénéficieront, entre (1988-1992 de pas moins de 6 barrages (Sidi Abdelli, Gargar, Ladrat, Boukerdoune, Cheurfas2, Beni Amrane). Quant à la région de Cheliff n'en bénéficiera que d'un seul, le Bougara.

C'est en 1993 : que Collo, pour son périmètre de 1200 ha et sa population, bénéficie de son barrage, le Beni Zid, En 1995, ce sont les barrages Foum El Khangua et de Babar qui seront chargés de l'irrigation des périmètres de Souk Ahras et de Khenchela.

En 1999 : la mise en service du barrage de Mexa sert à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable.

En 2000 : c'est le barrage de la Fontaine des gazelles qui a été mise en exploitation pour irriguer la plaine d'Eloutya (Biskra).

En 2001 : le barrage de Zit Emba pour l'irrigation, et vient ensuite avec trois années de retard le barrage de Taksbt Tizi ouzou .

En 2002 : la mise en service du barrage de Agrem, pour répondre au besoin de l'alimentation en eau potable de Jijel.

En 2003 : c'est le barrage de Koudiat Medouar, pour l'AEP et l'irrigation, le plus grand barrage en Algérie a vu le jour à Béni Haroun. Le barrage de Tilesdit (Bouira est venu soulager la région du centre, ceux de Sekkak et Kramis).

Enfin, la région de Chellif s'est dotée de son 12 eme barrage (Sidi BouTaiba) au début de 2006.

Aujourd'hui : le nombre et la capacité initiale des barrages mis en service ont sensiblement augmenté puisque les 57 barrages mis en eau emmagasinent près de 6,5milliards de m³.

2.7. Classification des barrages suivant leur age :

Le parc Algérien des grands barrages exploités par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) est constitué de 64 ouvrages dont l'age varie de 01 à 140 ans ,se présentant comme suit:

- 13 barrages dont l'age est superieur à 50 ans
- 05 barrages dont l'age dépasse les 30 ans
- 23 barrages dont l'age dépasse les 15 ans
- 23 barrages récemment receptionnés

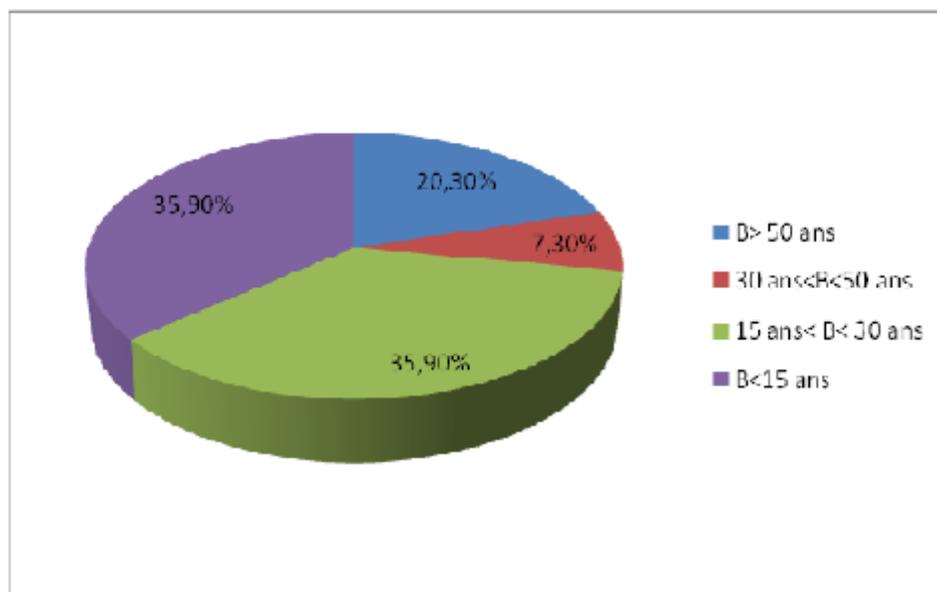


Figure 2.3 : graphe de l'ancienneté des barrages Algériens.

- A > 50ans
- 15ans < A < 3
- A < 15ans

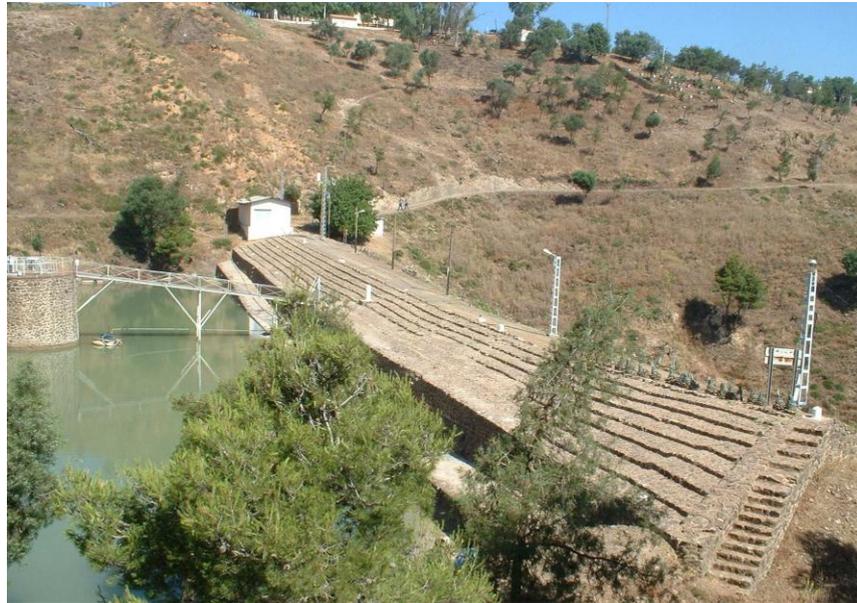


Figure 2.4 : Barrage de Meurad (Tipaza).

Le barrage de Meurad qui est le plus ancien des barages Algerien (1852).

Tableau 2.6 : Dates des mises en eau et âges des barrages en exploitation.

REGION	N°	BARRAGES	WILAYA	Date de mise en eau	Age du barrage	+50 ans	30-50 ans	15-30 ans	- 15 ans
OUEST	1	Beni-Bahdel	Tlemcen	1946	64				
	2	Meffrouch	Tlemcen	1963	47				
	3	H-Boughrara	Tlemcen	1999	11				
	4	Sikkak	Tlemcen	2004	6				
	5	Sidi-Abdelli	Tlemcen	1988	22				
	6	Sarno	Sidi Bel Abbas	1954	56				
	7	Cheurfas II	Mascara	1992	18				
	8	Ouzert	Mascara	1986	24				
	9	Bou-Hanifia	Mascara	1940	70				
	10	Fergoug	Mascara	1970	40				
	11	Kramis	Mostaganem	2005	5				
	12	Djorf-Torba	Béchar	1969	41				
	13	Brezina	El Bayad	2000	10				
CHELIF	14	S.M.B.A	Relizane	1977	33				
	15	Bakhadda	Tiaret	1936	74				
	16	Dahmouni	Tiaret	1987	23				

Chapitre 2 : Etat des lieux des barrages en Algérie et classification des moyens de lutte contre les infiltrations

REGION	N°	BARRAGES	WILAYA	Date de mise en eau	Age du barrage	+50 ans	30-50 ans	15-30 ans	- 15 ans
	17	Gargar	Relizane	1988	22				
	18	Merdja-S-Abed	Relizane	1984	26				
	19	Sidi - Yacoub	Chlef	1985	25				
	20	Koudiat Rosfa	Tissemsilt	2004	6				
	21	Oued-Fodda	Chlef	1932	78				
	22	Oueld Mellouk	Ain-Defla	2004	6				
	23	Harreza	Ain-Defla	1984	26				
	24	S M Bentaiba	Ain-Defla	2005	5				
	25	Ghrib	Ain-Defla	1939	71				
	26	Boughzoul	Médeâ	1934	76				
	27	Deurdeur	Tissemsilt	1984	26				
	28	Col Bougara	Tissemsilt	1989	21				
	29	Prise chéloff (MAO)	Chleff	2009	1				
CENTRE	30	Bourouni	Ain - Defla	1985	25				
	31	Meurad	Tipaza	1861	149				
	32	Ladrat	Médeâ	1990	20				
	33	Boukourdane	Tipaza	1992	18				
	34	Keddara	Boumerdes	1986	24				
	35	Beni-Anwane	Boumerdes	1988	22				
	36	Haniz	Boumerdes	1935	75				
	37	Lekhal	Bouira	1985	25				
	38	Tilesdit	Bouira	2004	6				
	39	Taksebt	Tizi-Ouzou	2001	9				
	40	Tichy-Haf	Bejaia	2007	3				
	41	K-accerdoune	Bouira	2008	2				
EST	42	K'Sob	M'sila	1940	70				
	43	Ain Zada	Bourj-BouArreridj	1985	25				
	44	El Agrem	Ijel	2002	8				
	45	Kissir	Ijel	2009	1				
	46	Boussiaba	Ijel	2009	1				
	47	Beni Haroun	Mila	2003	7				
	48	Oued Athmaria	Mila	2007	3				
	49	H Grouz	Mila	1987	23				
	50	Beni-Zid	Skikda	2000	10				
	51	Guenitra	Skikda	1984	26				
	52	Zardezas	Skikda	1945	65				
	53	Zit El Emba	Skikda	2002	8				
	54	H Debagh	Guelma	1987	23				
	55	Oued Cherf	Souk-Ahras	1995	15				
	56	Ain Dalia	Souk-Ahras	1988	22				
	57	F D Gazelles	Biskra	2000	10				
	58	F E Gherza	Biskra	1950	60				
	59	Koudiat Medouar	Batna	2001	9				
	60	F E Gueiss	Khenchla	1938	72				
	61	Babar	Khenchla	1995	15				
	62	Cheffia	El Tarf	1965	45				
	63	Mexa	El Tarf	1998	12				
	64	Bougous	El Tarf	2008	1				

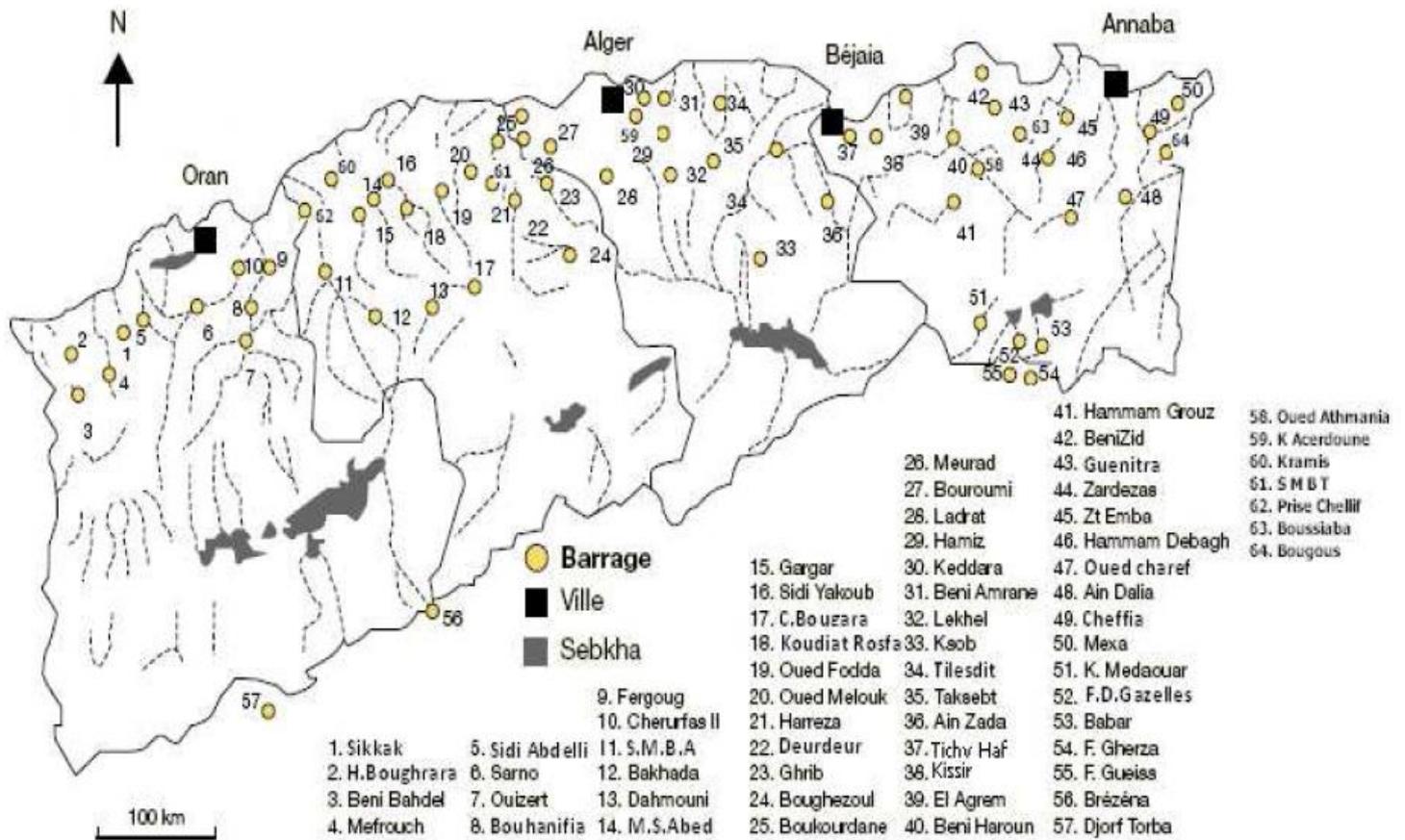


Figure 2.5 : Localisation des barrages en exploitation (Rapport régional sur la gestion des sédiments, 2010-Marseille (France)).

2.8. Les types de barrages adoptés en Algérie

Si chaque barrage est un cas particulier par bien des aspects, et notamment par la morphologie et la nature du terrain sur lequel il s'appuie, il peut néanmoins être classé dans les types ci-dessous en fonction des matériaux qui le constitue, de sa forme et de sa conception. Son site doit répondre à des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques précises. Tous les types de barrages existent en Algérie ; on peut les classer en deux groupes

- Barrage rigide (Béton, Maçonnerie) ;
- Barrage souple (Remblai en terre ou en enrochement).

2.8.1 Les barrages Rigides

- Les barrages en maçonnerie sont des matériaux moins utilisés actuellement mais composant un grand nombre de barrages existant
- Les barrages en béton comportent :
 - Les barrages poids ;
 - Les barrages voûtes ;
 - Les barrages à contreforts.

- Les barrages mixtes (poids-voûtes)



Figure 2.6 : Barrage de Beni Haroun (these touati bouzid).

Figure 2.7 : Barrage de Tichiaft (Bejaia).

2.8.2. Barrages poids

La stabilité des barrages poids sous l'effet de la poussée de l'eau est assurée par le poids des matériaux.

Ces ouvrages peuvent être en maçonnerie ou en béton, en maçonnerie ; ce type de barrage convient bien pour les vallées larges ayant une fondation rocheuses, la stabilité de ses barrages poids repose essentiellement sur leur fruit et, si nécessaire sur l'efficacité du drainage qui met le massif poids à l'abri des sous-pressions.

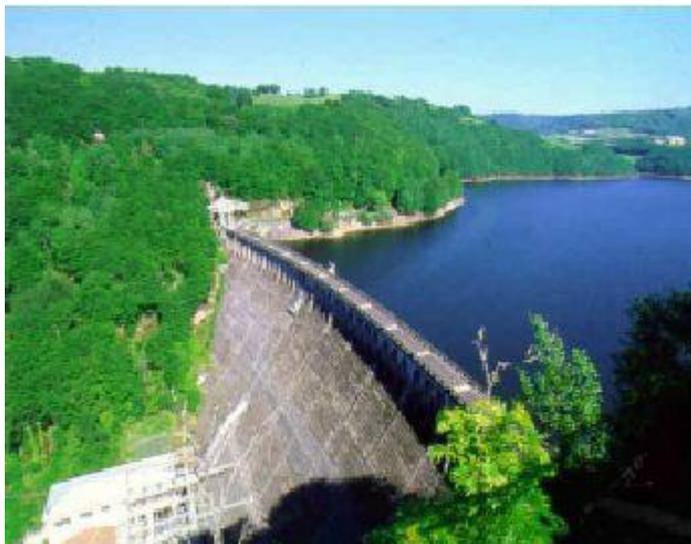


Figure 2.8 : Barrage en poids.

2.8.3. Barrages voûtes

Les barrages voûtes sont des barrages en béton dont la forme courbe permet un report des efforts de poussée de l'eau sur les rives rocheuses de la vallée



Figure 2.9 : Barrage Voûte.

2.8.4. Barrages à contreforts

Un barrage à contrefort comprend une série de murs parallèles, généralement de forme triangulaire, plus au moins épais et espacé (les contreforts).



Figure 2.10 : barrage à contrefort.

2.8.5. Les barrages souples (en remblai)

On appelle barrages en remblai tous les barrages constitués d'un matériau meuble, qu'il soit très fin (argile) ou très grossier (enrochement).

Cette famille regroupe plusieurs catégories, très différentes. Les différences proviennent des types des matériaux utilisés, et la méthode employée pour assurer l'étanchéité :

- Les barrages en terre (homogène, à noyau central, à masque amont);
- Les barrages en enrochement.

2.8.6. Barrage en terre

Ils ont l'avantage de reposer sur des fondations de médiocres qualités

Tous les barrages en terres peuvent être considérés comme des barrages poids car ils résistent à la pression de l'eau par leur poids propre, on trouve trois types :

- Homogène ;
- Noyau ;
- A masque.

1. Un barrage en terre homogène est constitué d'un même matériau à dominance argileuse, relativement imperméable pour assurer l'étanchéité et la résistance.

La structure des barrages est souvent complétée par un dispositif de drainage tel qu'une butée aval drainante ; un tapis drainant sous le tiers ou la moitié avale ; une cheminée drainante communiquant avec l'aval par un tapis ou des bretelles (exemples : barrage de Cheffia, Guenitra, Beni Zid, Mexa....)

2. Dans un barrage à noyau, les fonctions de résistance et d'étanchéité sont en quelques sortes séparées, la résistance est assurée par les recharges placées sur les flancs de l'ouvrage, et l'imperméabilité par le noyau centrale, le noyau doit être constitué de la terre la plus imperméable.

3. Il peut aussi exister des sites où aucune terre n'est disponible, mais seulement des enrochements, ceux-ci sont employés pour réaliser le corps du barrage, tandis que l'étanchéité est assurée par un masque de béton, ciment ou béton bitumineux posé sur l'ouvrage lui même.

2.8.7. Barrage en enrochement

Un barrage en enrochement n'est pas autre chose qu'un tas de cailloux à grande échelle qui résiste par sa masse aux efforts auxquels il est soumis. Il ya trois types de barrages en enrochement :

- Le type d'enrochement rangés ou arrimés, ils tiennent avec des talus plus raides et permettent de réduire les volumes à mettre en place, ils se tassent d'autant moins que l'enrochement sont mieux rangés ;

- Le type d'enrochement déversé (cas de barrages construits dans la première moitié du 20 eme siècle ;

- Le type en enrochement compactés (qui s'est généralisé après les années 60).

Actuellement la tendance générale est de construire les barrages en enrochements compactés. Grace au compactage, les tassements des enrochements de bonne qualité peuvent être réduits.

(Exemple d'un barrage en enrochement à masque en béton bitumineux : Ghrib, Bouhanifia, Ighil Emeda).

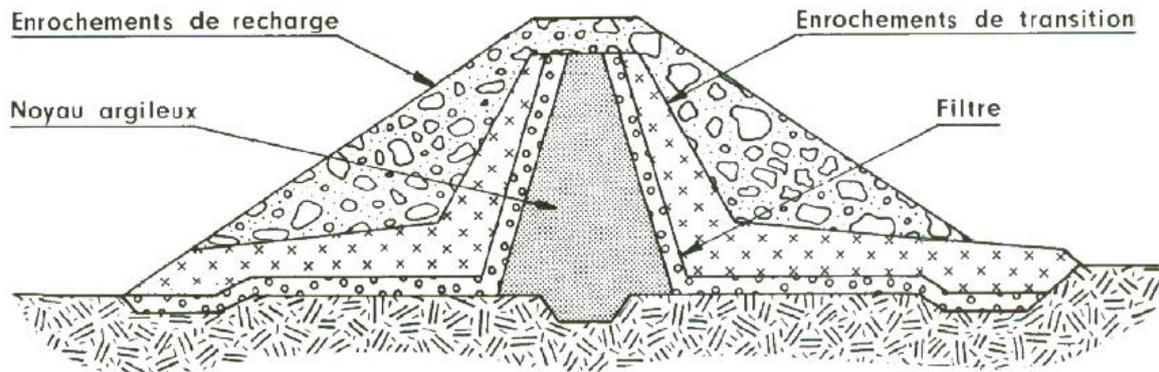


Figure 2.11 : Coupe d'un barrage en enrochement.

2.9. Les principaux problèmes des barrages en Algérie

La rareté grandissante des ressources en eau qui résulte de la diminution des quantités disponibles par habitant. La dégradation de la quantité et les objectifs de développement économique et sociale imposent donc l'élaboration et la définition d'une stratégie de gestion de l'eau à moyen et long terme.

Le problème de l'eau s'est aggravé ses dernières années de sécheresses qui ont touché l'ensemble du pays. Malgré la construction de nouveaux barrages et le recours au dessalement, l'Algérie enregistra un déficit en eau de 1milliards de m³ d'ici 2025, sans négliger le principal problème technique qui affecte la quantité et la qualité des ressources en eau.

2.9.1. L'érosion des barrages

L'érosion hydrique est un problème majeur en Algérie du nord. Le principal facteur de l'érosion est le ruissèlement dont la répartition spatiale est dépendante de celles des précipitations et des caractéristiques géologiques.

L'érosion qui se manifeste principalement sur les sols en pente constitue une des principales causes de dégradation des sols dans les massifs montagneux accélérés par le défrichement des forêts qui protégeaient les sols sensibles.

L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à une autre .La partie Ouest avec 47% de l'ensemble des terres est la partie la plus érodée du pays, suivie des régions Centre et Est avec respectivement 27% et 26%.

Cette situation est le résultat des contraintes physiques et hydro-climatiques :

- Un climat aride à semi-aride
- Des précipitations agressives et des régimes hydrauliques irréguliers
- Des bassins versants, constitués de formations géologiques à dominance marneuses caractérisées par des terrains imperméables, des reliefs accentués et l'absence de couvert végétal



Figure 2.12 : Erosion hydrique sur le versant du barrage de Bouhamdane (Guelma).

2.9.2. Envasement des barrages en Algérie

En Algérie, les 52 barrages reçoivent 32 millions de m³ de matériau solide annuellement. La répartition des barrages sur les cinq bassins hydrographiques indiquent clairement que les barrages de la région de Chélif- zahrez sont les barrages les plus menacés par l'envasement puisque le taux de sédimentation annuel est de 0,75% .ceci est dû à la forte.

L'Algérie est amputée annuellement d'une capacité de 20 10⁶m³.

L'Algérie dispose de plus de 107 barrages en exploitation totalisant une capacité de 4,6 milliards de mètres cubes et permettant de régulariser un volume annuel de 2milliards de mètres cubes utilisés pour l'adduction en eau potable, l'industrie et l'irrigation .Or du fait de l'érosion (pluie de courte durée, de forte intensité ,absence de couverture végétale), l'Algérie perd annuellement une capacité estimée à 20 millions de mètres cubes par le dépôt de sédiments dans les retenues (Remini B1997).



Figure 2.13 : Envasement du barrage Ms Abed (Relizaine).

Tableau 2.7 : évolution de l'envasement de certains barrages.

Barrage	Année de mise en eau	Capacité initiale	Capacité 1967 (en hm ³)	Capacité 1986 (en hm ³)	Capacité 1996 (en hm ³)	Taux d'envasement en %
Beni Bahbel	1946	63	54,8	56,5	55,1	12,5
Mefrouch	1963	15	14,9	14,6	14,4	4,0
Bouhanifia	1948	73	55,4	51,6	46,6	36,1
SMBA	1978	235		225,6	214	8,9
Oued Fodda	1932	228	134,9	132,7	115,2	49,4
Boughzoul	1934	55	34,6	20	11,8	78,5
Ghrib	1939	280	178	165,6	141,4	49,5
Hamiz	1935 (S)	21		16,4	15,5	26,2
Zardezas	1974 (S)	32		20,2	8,2	74,3
K'sob	1977 (S)	29,5	1,6	26,4	21,4	27,4
Foum el Gueiss	1969 (S)	3,4	0,54	1,6	1,3	61,7
Foum el Gherza	1950	47	34,2	26,5	21	55,3
Djorf Torba	1969	350		316,4	296,8	15,2

(S) : surélevé

Source : ARRUS, 1985 et NEMOUCHI, 1998 (corrigés)

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidanges de fond, cas du barrage de d'oued El Fodda, en effet la vanne de fond est bloquée depuis 1948 et elle se trouve maintenant sous plus de 40 mètres, ce qui rend toute opération de vidange impossible.

2.9. 3 Evaporations des lacs des barrages

Le réchauffement climatique, conjugué au climat semi-aride, occasionne une perte de ressources en eau mobilisées par les barrages, par évaporation, de l'ordre de 430 hm³/an représentant 55,5 % du volume total alloué à l'alimentation en eau potable de la population à partir des barrages en exploitation. Ces pertes importantes invitent les concernés à une sérieuse réflexion, quant aux mesures à prendre pour lutter contre ce phénomène de plus en plus croissant.

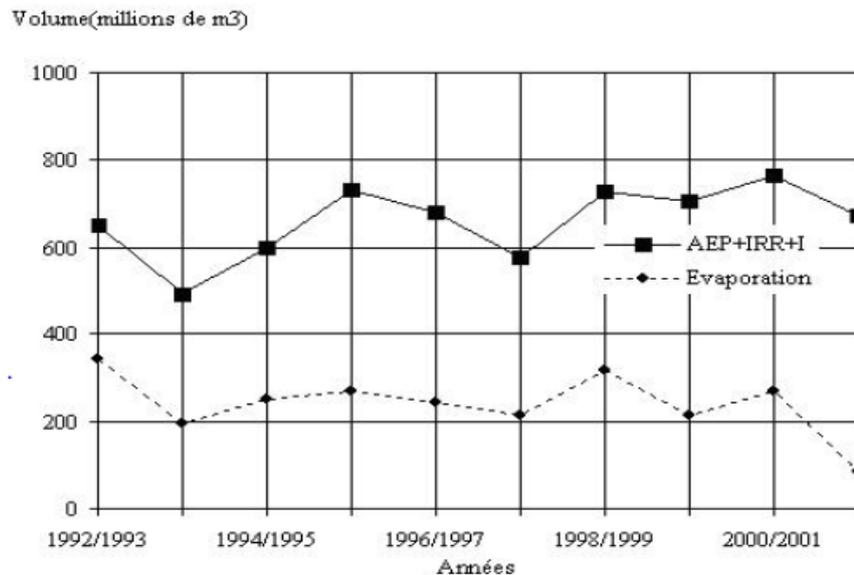


Figure 2.14 : Evolution de l'évaporation dans les barrages Algériens (39barrages) Légende
A.E.P : Adduction en eau potable .Irr: irrigation, I : industrie.

L'évolution du volume évaporé dans les retenues de 39 barrages, d'une capacité de 3,8milliards de m³ durant la période : (1962-2002), ainsi que la consommation en A.E.P, l'irrigation et l'industrie pour mieux montrer l'ampleur de l'évaporation.

On constate durant la période : 1992-2002, la quantité évaporée représente la moitié du volume consommé par l'irrigation.

L'alimentation en eau potable et l'industrie qui est considérable, la valeur maximale de l'évaporation enregistrée a été de 350 millions de m³ d'eau durant l'année 1992/1993.par contre la valeur minimale avoisine les 100 millions de m³.

En 2001-2002, la moyenne annuelle de l'évaporation est de 250 millions de m³ pour les 39 barrages, soit une perte moyenne annuelle de 6,5% de la capacité totale. Le volume d'eau total perdu durant dix années d'exploitation (1992-2002) avoisine la valeur de 2,5 milliards de m³.

Tableau 2.8 : Répartition mensuelle du niveau d'évaporation de certains barrages en hm³

Barrage		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	Total
Beni Bahbel	1	0,474	0,253	0,148	0,041	0,070	0,186	0,247	0,287	0,437	0,434	0,572	0,510	3,659
	2	0,327	0,211	0,115	0,030	0,090	0,154	0,210	0,274	0,325	0,506	0,556	0,535	3,333
Sarno	1	0,007	0,010	0,012	0,014	0,033	0,064	0,107	0,151	0,250	0,259	0,215	0,117	1,239
	2	0,007	0,010	0,014	0,022	0,051	0,108	0,109	0,135	0,227	0,261	0,240	0,110	1,294
Bou Hanifia	1	0,492	0,278	0,14	0,105	0,217	0,292	0,523	0,657	1,042	0,858	0,839	0,635	6,078
	2	0,317	0,214	0,252	0,175	0,207	0,233	0,364	0,547	0,789	0,961	1,193	0,790	6,042
Bakkhada	1	0,060	0,036	0,013	0,013	0,033	0,096	0,161	0,207	0,308	0,291	0,186	0,103	1,507
	2	0,078	0,045	0,039	0,053	0,060	0,121	0,165	0,184	0,258	0,191	0,203	0,149	1,546
Ghrib	1	1,045	0,755	0,376	0,294	0,239	0,484	0,754	0,930	1,217	1,050	1,251	1,011	9,406
	2	0,454	0,309	0,244	0,152	0,262	0,252	0,522	0,938	1,089	1,338	1,785	1,367	8,712
Hamiz	1	0,155	0,010	0,010	0,010	0,120	0,074	0,116	0,155	0,202	0,165	0,195	0,135	1,347
	2	0,278	0,120	0,067	0,013	0,020	0,085	0,104	0,101	0,152	0,221	0,242	0,220	1,623
F.E.Gherza	1	0,403	0,376	0,336	0,163	0,154	0,168	0,207	0,282	0,375	0,348	0,426	0,355	3,593
	2	0,571	0,266	0,254	0,201	0,171	0,267	0,426	0,382	0,568	0,885	1,007	0,918	5,916
Zardezas	1	0,114	0,08	0,046	0,026	0,018	0,046	0,070	0,081	0,103	0,107	0,104	0,096	0,891
	2	0,083	0,043	0,021	0,027	0,035	0,054	0,078	0,068	0,093	0,116	0,173	0,178	0,969

1: année 1959-1960

Source : DEMRH

2: année 1960-1961

2.9.4 Eutrophisation des retenues de barrages

Ces dernières années les rejets des eaux usées d'origine urbaine et industrielle ont augmenté dans les oueds. Ceci constitue une menace pour la qualité des ressources en eau dans les barrages. Plusieurs tronçons d'oueds sont déjà pollués (Tafna, Mekerra, Cellif, Sommam et Seybouse).

Si le phénomène persiste encore, des retenues de barrages comme Beni BAhdel, Bakhada, Ouizert, Bou hanifia, Fergoug, Oued Lekhel Hammam Grouz et Oued Harbil seront pollués.

En plus de ces rejets, le dépôt de sédiments dans les retenues de barrages génère l'eutrophisation des eaux de retenues. L'eutrophisation est l'enrichissement d'une eau en sels et minéraux (nitrate et phosphate) entraînant un déséquilibre écologique comme la profilation de la végétation aquatique et l'appauvrissement en oxygène dissous.

Le processus de vieillissement passera une retenue d'un état de faible niveau nutritif (eutrophique) ; le phosphore et l'azote sont des substances nutritives limitant le cycle de la croissance de la végétation dans la retenue ; les sédiments libèrent le phosphore et contribuent au processus d'eutrophisation (Bachman.1980 ; Schreiber1980 in stigter C.et Al 1989).Selon

Thornthonet al. (1980 in Stigter C. et al 1989), la turbidité et la formation d'algues sont inversement proportionnelles.

Tableau 2.9 : Barrages affectés par la pollution.

Barrage	Wilaya	Source de pollution
Lakehal	Bouira	ENAD Sour-El-Ghozlane
Béni Amrane	Boumerdes	ENAD Lakhdaria et hydrocarbures
Keddara	Boumerdes	Hydrocarbures
Hamiz	Alger	Hydrocarbures
Fergoug	Mascara	Rejets urbains et industriels
Béni Bahdel	Tlemcen	Rejets urbains et industriels
Sidi Abdelli	Tlemcen	Rejets industriels
Merdja Sidi Abed	Relizane	Rejets urbains et industriels
Hammam Boughrara	Tlemcen	Rejets industriels

Source : SNAT, 2004

2.10. Réalisation de nouveaux barrages en Algérie

Pour récupérer une partie des milliards de m³ d'eau qui se déversent dans la mer, la prospection des meilleurs sites de la réalisation de nouveaux barrages, en Algérie s'avère indispensable. Depuis une vingtaine d'années l'Algérie a entrepris de développer un programme ambitieux de construction de grands barrages. Durant les années quatre vingt dix neuf barrages d'une capacité totale de 2 milliards de m³ ont été mis en exploitation à raison de deux barrages en moyenne par année. Durant les années quatre vingt dix, sept barrages d'une capacité totale de 650 millions de m³ ont été réceptionnés.

A la fin du mois de décembre 2002, l'Algérie disposait de 52 grands barrages totalisant une capacité de 5.2 milliards de m³. Actuellement 29 barrages sont en construction, dont 17 ont une capacité supérieure à 10 millions de m³, et 12 ont une capacité inférieure à 10 millions de m³. La capacité totale de ces ouvrages est de 2.9 milliards de m³ permettant de régulariser un volume annuel de 1.3 milliards de m³. Avec ces barrages en construction, la capacité totale sera portée à 7.1 milliards de m³, et le volume est régularisé à 3.4 milliards de m³/an, soit plus de 57% du volume mobilisable estimé à 6 milliards de m³.

Selon l'Agence Nationale des barrages et transferts, 67 barrages sont en cours de lancement ou en étude. En 2005, le nombre de barrages achevés était de 66 avec une capacité de 7,65 milliards de m³. Cet ensemble d'ouvrages de mobilisation de plus de 100 grands barrages et de

transfert et d'adduction des eaux de surface sera achevé à l'horizon 2010, il mobilisera plus de 10 milliards de m³ (Kalli, 2002).

❖ Dans cette deuxième partie, on abordera les problèmes dus aux infiltrations des barrages et les moyens préconisés pour lutter contre ces infiltrations.

2.11. Fuites dans les barrages

2.11.1. Introduction

Les infiltrations qui se produisent à travers le corps du barrage et ses fondations, doivent être considérées sous deux aspects :

- le premier : est la perte d'eau qui réduit le volume emmagasiné,
- le deuxième : est que ces pertes d'eau peuvent compromettre la stabilité de l'ouvrage sous l'influence du phénomène de renard et des pressions de l'infiltration

Environ 22 barrages ont fait l'objet des mesures périodiques des fuites en Algérie durant les dix dernières années (1992-2002). Certains barrages enregistrent une perte annuelle par fuite avoisinant même la valeur de 10% de leur capacité comme ceux de Ouizert, Foum El Guess et Foum El Gherza. La figure suivante montre l'évolution du volume de fuites de 22 barrages durant la période : 1992-2002. On constate que le volume minimum perdu a été enregistré durant l'année 1994-1995, soit 20 millions de m³. Par contre, durant l'année 1998-1999, plus de 75 millions de m³ d'eau de perte par les fuites ont été enregistrés.

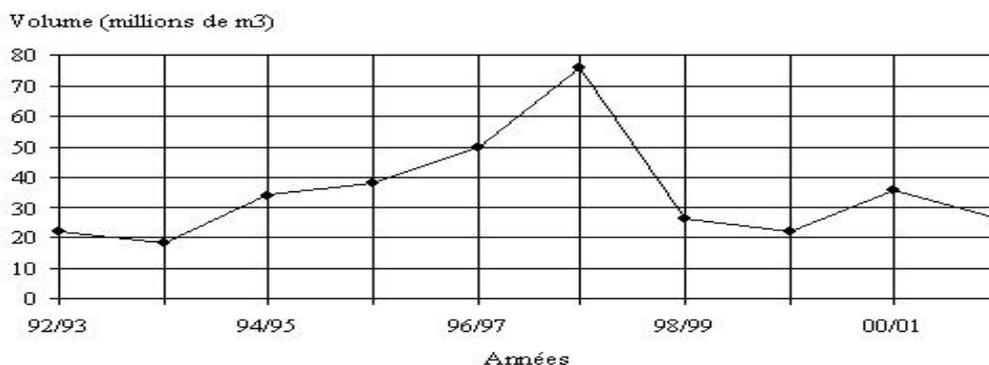


Figure 2.15 : Variation des débits de fuites dans les barrages Algériens.

Le volume total des fuites enregistré durant la période (1992-2002) avoisine le volume total des fuites enregistré durant la période (1992-2002) avoisine les 350 millions de m³, alors que le volume moyen perdu annuellement est de 40 millions de m³. Ces mesures de débits de fuites sont effectuées par la méthode volumétrique.

Les eaux perdues sont collectées à l'aide des réseaux de canaux depuis les résurgences et les sources de fuites jusqu'aux périmètres à irriguer.

2.11.2. Pertes d'eau dans les barrages

Le phénomène lié aux pertes d'eau dans un barrage est qualifié de non stable, non linéaire et non homogène ; l'érosion des sédiments et des aspects géotechniques (Singhet a al.1988) qui pourraient se produire au niveau du barrage. Dans la littérature, ces événements sont interprétés par rapport aux incidents découlant :

Des méthodes de construction et de l'état des remblais qui se définiraient par le type et la mise en place du matériau pendant et après la construction du barrage en remblai. Les déformations sont provoquées par la variation des contraintes entre les différentes zones du barrage, les effets du fluage et les déformations de la fondation .les poussées hydrostatiques d'eau du réservoir pendant le remplissage peuvent causer des déformations supplémentaires (Massiera et al 2008)

- Des problèmes de stabilité dans les barrages résultant découlement avec des gradients trop élevé ou critique .de trop fortes pressions interstitielles dans la structure.
- Des actions exceptionnelles telles que les débordements d'eau au-dessus de la crête du barrage ou de son évacuateur de crue, de la rupture sur le flanc amont du barrage, du retard dans la construction.

Les pertes d'eau résultent généralement de la combinaison de plusieurs de ces causes, cependant la plupart des dommages sont reliés au déversement et à la présence de Renards comme le présentant statique effectué par Foster et al (2000), présentés au tableau suivant. Ces statistiques ont été compilées à partir de 124 grands barrages construits depuis 1986 et dont le mode d'endommagement est bien connu.

Tableau 2.10 : Statistique de dommages sur les larges barrages construits en 1986 et avant ; tiré de (Foster et al. 2000).

Mode d'endommagement	% de pertes totales
Renard par remblais	31
Renard par fondation	15
Renard des remblais à la fondation	2
Instabilité des pentes	4
Déversements	46
Tremblements de terre	2

2.11.3. Recherche des indicateurs de fuite d'eau

2.11.3.1. Etude préliminaire

Elle consiste à réunir le maximum d'informations reliées à l'historique du barrage, ses caractéristiques topographiques, la connaissance de la géologie locale et l'hydrodynamique de la région. Ceci demanderait un compte-rendu des activités entreprises comme la description du site d'approvisionnement des matériaux de construction, la localisation de brèches antérieures s'il y a eu lieu, et les moyens mis en jeu pour y remédier. Le tableau 2.2 détaille les étapes que peut contenir cette phase et les informations qui en ressortent.

Tableau 2.11 : Étapes de la phase préliminaire et informations recherchées, (Faucharde et Mériaux, 2007).

Étapes proposées	Informations recherchées
Recherche historique	<ul style="list-style-type: none">• Se renseigner sur les données disponibles (chez les opérateurs du barrage, dans les publications nationales, les cartes, les dessins topographiques et les photos,...).• Tenir compte de la localisation d'éventuelles brèches ou fissurations importantes antérieures.• Se renseigner sur les sites d'approvisionnements des matériaux.
Étude géologique	<ul style="list-style-type: none">• Identifier les matériaux de construction.• Déterminer la nature de la fondation.• Décrire les arrangements et les caractéristiques des formations géologiques.
Analyse morphodynamique	<ul style="list-style-type: none">• Identifier et caractériser les changements passés du canal du cours d'eau ou du système «barrage- cours d'eau ».
Données topographiques	<ul style="list-style-type: none">• Consulter les sections transversales.• Consulter les cartes topographiques.

2.11.3.2. Inspection visuelle

Elle permet de vérifier et de compléter les informations recueillies durant le stade de recherche sur l'historique du barrage, elle permet aussi d'identifier et de relier les aspects morphologiques externe du barrage, en plus tout indice qui révèle ou laisse croire l'existence d'une fuite d'eau (comme présence de dégradation).

2.11.3.3. Autres Méthodes

D'autres méthodes supplémentaires sont couramment utilisées dans la mise au point du système de surveillance des barrages, il s'agit du dispositif d'auscultation basé sur (mesures piézométriques, installées aux niveaux des déversoirs de jaugeages, des essais géotechniques, des mesures réalisées en forages.

Ces méthodes permettent aussi de mesurer les mouvements externes aux sommets et sur les pentes en des points sur la surface du barrage ou dans des tubes avec des inclinomètres et extensomètre, on détecte :

- Le flux d'infiltration d'eau : cette mesure aide dans la connaissance de l'efficacité des éléments imperméables, en particuliers et lors des mesures on retrouve des débris.
- La pression interstitielle : la mesure de cette pression en un nombre de points fournit des informations sur la distribution des pressions dans le barrage, cette mesure pourrait indiquer un changement de pression dans le barrage.

Bien que complémentaires, ces mesures restent insuffisantes pour localiser le parcours des écoulements d'eau dans l'ouvrage ou dans la fondation.

Dans le domaine de la géophysique, les méthodes de thermométrie et électriques semblent répondre le mieux à l'évaluation de l'endommagement, particulièrement à sa localisation.

Ceci est dû à la sensibilité des méthodes aux changements physiques dans le sol résultant de la présence de l'endommagement. Les méthodes d'imagerie (radar, EM, RMT, résistivité électrique) fournissent des informations complémentaires tant pour des interprétations qualitatives que quantitatives, principalement sur l'hétérogénéité de la structure et sur la reconnaissance des zones de faiblesse et d'écoulement dans le barrage.

Néanmoins il ne faut pas omettre la partie calculée, car avant toutes constructions d'un barrage, on doit calculer les fuites et les estimées, et même si ces dernières sont faibles. Pour les déterminer il faut évaluer les éléments suivants :

- la ligne de saturation ou phréatique,
- le débit de fuite de l'eau par infiltration,
- l'épaisseur du drain.

Le débit de fuite, calculé pour la digue est faible mais pas négligeable, d'où la nécessité d'évacuer cette eau hors des fondations, car elle devient un danger pour la stabilité de l'ouvrage.

Ainsi, il est nécessaire d'envisager un dispositif de protection et d'étanchéisation pour lutter contre ces infiltrations.

2.12. Dispositifs de protection et d'étanchéisation des barrages en terres

2.12.1. Choix du système d'étanchéité

Avant de projeter un ouvrage sur un site donné de type de digue en remblai, il faut tout d'abord penser aux organes assurant l'étanchéité du massif, les moyens qu'offre la technique moderne pour se prémunir contre toutes infiltrations à travers le massif sont nombreux.

Il existe toujours une solution qui assure l'étanchéité du massif, ces organes d'étanchéités peuvent être classés selon :

- ✓ la position : amont ou centrale :
- ✓ la rigidité : souple ou semi-rigide

Le masque amont présente un avantage au point de vue constructif, c'est qu'il peut être réalisé indépendamment du massif .Ceci est important, car le massif doit être mis en place avec de gros moyens.

2.12.2 Différents types d'organes d'étanchéité

Les techniques les plus couramment mises en œuvre sont : les noyaux en matériaux argileux compactés, en béton bitumineux et les masques amont en béton de ciment ou bitumineux .Il existe néanmoins d'autres techniques telles que : paroi moulée, chappe et les membranes souples.

2.12.3. Noyau argileux compacté

Le noyau en matériau argileux compacté, disposé verticalement au centre du barrage ou en position inclinée à l'amont de celui-ci, son épaisseur est de l'ordre 1/6 de la hauteur de l'ouvrage.

Vers le sommet le noyau doit être monté au dessus des plus hautes eaux pratiquement compte tenu des remontées capillaires, jusqu'a la tête du barrage, il doit être protégé de" la dessiccation à sa partie supérieure pour éviter toutes fissure de retrait qui risquerait de se révéler catastrophique .Cette protection peut être assurée par une couche de sable de préférence, en traitant le sommet du barrage en chemin avec une chausse en enrobé bitumineux .

Latéralement, nous disposons de part et d'autre du noyau un drain filtre, vers l'aval pour recueillir les eaux de percolation, vers l'amont pour absorber les eaux de ressuyage après vidange

Vers le bas, il faut assurer la continuité de l'étanchéité en raccordant celle-ci à la fondation imperméable ou au dispositif d'étanchéité des fondations.

2.12.4. Noyau bitumineux

L'étanchement des barrages en remblai au moyen de noyau bitumineux a pris une très grande importance dans le monde entier et dans toutes les zones climatiques ; cet élément d'étanchéité (mieux que la plus part des autres) satisfait en effet, aux exigences de sécurité les plus strictes grâce à sa déformation, sa bonne résistance à l'érosion et au vieillissement, et surtout grâce au mode de construction sans joints.

2.12.5. Masque amont

Le masque qui constitue l'organe d'étanchéité amont est classiquement réalisé en béton de ciment, en acier, en terre ou en béton avec des produits bitumineux .La présence du masque en parement amont présente le double avantage de permettre des réparations en cas de dégradation du masque, mais aussi d'autoriser des vidanges de retenue très rapides.

De nombreux barrages à masque sont réalisés en enrochement, la qualité du compactage lors de la mise en œuvre du matériau à une grande influence sur les déformations et tassements ultérieurs.

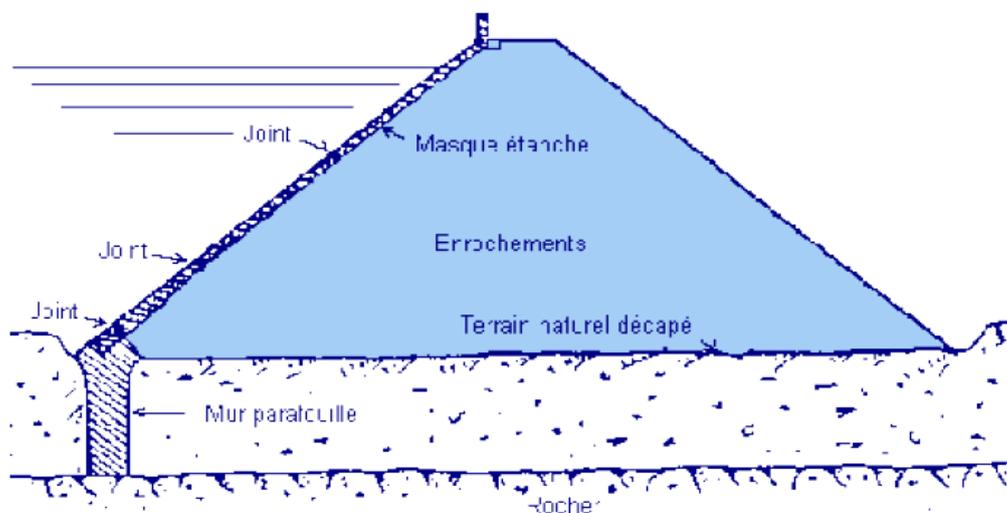


Figure 2.16 : coupe d'un barrage à masque amont.

Pour améliorer la sécurité du barrage, il n'est pas rare de trouver dans les barrages à masque d'autres matériaux fonctionnels :

- Un matériau de réglage ou de transition servant de support à l'étanchéité mince et la mettant à l'abri de tout poinçonnement par des éléments grossiers du massif support ;
- Une cheminée drainante, un tapis drainant ou les deux pour évacuer les infiltrations éventuelles à travers le masque :

- Des matériaux de protection soit du parement aval (terre végétale engazonnées, enrochement, maçonnerie de pierres sèches,...) soit du masque d'étanchéité comme des dalles de protections ou des pavés autobloquant mettant l'étanchéité mince à l'abri des agressions extérieures.

2.12.5.1. Masque en béton de ciment

La dalle doit posséder des joints de construction, du fait du retrait, que l'on munit de lames d'étanchéités. Ces joints sont respectivement parallèles et perpendiculaires aux lignes de plus grande pente du talus, ces derniers étant nécessaire pour diminuer l'importance des efforts de flexion.

2.12.5.2. Masque en acier

En raison de la grande déformabilité alliée à une résistance élevée et une étanchéité parfaite de l'acier, celui-ci constitue un matériau techniquement à peu près parfait pour un masque amont. L'inconvénient est une question de coût de revient.

2.12.5.3. Masque en terre

Au moyen de terre argileuse compactée, nous pouvons réaliser une étanchéité convenable, avec des épaisseurs qui sont des caractéristiques de perméabilité du matériau dont on dispose.

2.12.5.4. Masque en béton bitumineux

C'est a priori le produit idéal en raison de sa remarquable étanchéité et de sa résistance à la flexion. Si certaines fissures se produisent, elles se colmatent d'elles mêmes peu à peu sous l'effet de la pression de l'eau, par déformation plastique.

Un béton bitumineux réagit de façon plastique aux déformations lentes, de façon élastique aux déformations rapides, or le tassement s'effectue en générale de façon lente. Egalement il n'y a pas de problème de joints, les différentes couches de béton bitumineux se soudent littéralement à chaud.

2.13. Conclusion

En résumer ce chapitre s'est penché sur la problématique de l'eau en Algérie, et les moyens que l'état a mis en place afin de, rassasier la population en eau potable, en favorisant la construction de nouveaux barrages sur tout le territoire national.

On a abordé aussi les dangers qui menacent ses structures aux quotidiens tels que (la pollution, évaporation, envasement ...), sans oublié le problème majeure de tous les barrages qui est la perte des eaux au travers de son corps (les infiltrations).

Afin de, remédier aux problèmes des infiltrations des eaux dans les barrages, ces derniers sont dotés d'organes de lutte qui assurent la fonction première de l'ouvrage (retenir l'eau). Dans notre étude, on a pris pour exemple le masque (en béton bitumineux) d'un barrage en enrochement..

Pour s'assurer de la sécurité et de la stabilité de ces organes dans le temps sous l'influence des conditions climatique extrême (hautes températures) pour les zones arides ou semi arides, nous avons procédé à une simulation numérique, pour étudier le comportement de ce dernier sous des charges thermiques, les résultats obtenus seront exposés dans le quatrième chapitre.

3.1. Introduction

Pour étudier le comportement du matériau bitumineux, sous l'effet conjugué de la température, le programme ANSYS à été choisi pour développer un model par élément finis d'analyse sous l'action des températures élevées (pour les zones arides ou semi arides).

L'objectif principale de chapitre est de fournir un aperçu des concepts et notions propres aux traitements des problèmes thermiques utilisé par notre logiciel. En premier lieu l'origine des différents phénomènes de transfert de chaleur seront abordés ; notons que dans le cadre de nos travaux seuls les transferts thermiques par conduction et convection seront traités .En effets, c'est les principaux modes de transferts de chaleur qui existe entre les éléments bitumineux et le milieu environnant.

3.2. Les lois fondamentales du transfert de chaleur

Les échanges d'énergies thermiques, entre deux systèmes (où sous système), à deux températures différentes, s'effectuent suivant trois modes de transfert :

- ❖ La conduction
- ❖ La convection
- ❖ Le rayonnement

Dans le cas d'un élément en béton bitumineux, le transfert se fait par conduction à l'intérieur, convection et rayonnement sur les parties supérieurs (surface).

3.2.1. Transfert de chaleur par conduction

Le phénomène de conduction est lié à l'activité atomique ou moléculaire au sein d'un gaz, un liquide ou un solide. Le transfert d'énergie s'effectue des particules les plus énergétiques d'une substance aux particules les moins énergétiques. Par ailleurs, il est intéressant de noter que la conduction thermique n'existe pas dans le vide. En effet, celui-ci est considéré comme un isolant thermique.

3.2.1.1. Cas de gaz parfait

En un point $M(x,y,z)$ du volume d'un gaz ,la température $T(x,y,z)$ est associé à l'énergie des molécules du gaz se trouvant à proximité de ce point . Les molécules d'un gaz sont animées d'un mouvement de translation aléatoire ou brownienne, d'un mouvement de vibration et de rotation interne, l'ensemble de ses mouvements forme le phénomène d'agitation thermique auquel est associé une énergie proportionnelle à la température, lors des collisions, les molécules voisines

interagissent entre elles et s'échangent de l'énergie, des molécules les plus énergétiques vers les molécules les moins énergétiques, il s'effectue alors un transfert de chaleur, on parle de diffusion d'énergie.

3.2.1.2. Cas des liquides

L'origine du transfert de chaleur est identique à celui des gaz. Néanmoins, les molécules sont plus proches et donc, les interactions plus fortes et fréquentes.

3.2.1.3. Cas des solides

Dans ce cas, la conduction est attribuée à un transfert d'énergie sous la forme de vibration du réseau cristallin.

3.2.1.4. Loi de Fourier

Dans un milieu quelconque, l'existence d'un gradient de température génère un transfert de chaleur d'un point à un autre. Selon le premier principe de la thermodynamique ; le sens du flux de chaleur est dirigé de la température la plus élevée à la plus basse. Ce flux de chaleur q (mesuré en $W \cdot m^{-2}$), traversant perpendiculairement une surface unitaire, est proportionnel au gradient de température dans la direction normale de la surface S , et de signe opposée, selon la loi de Fourier :

$$q = -K \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (3.1)$$

Le terme $\frac{\partial T}{\partial n}$ représente le gradient de température dans la direction normale à la surface unitaire. Le terme K symbolise la conductivité thermique du matériau en ($W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$). Cette conductivité thermique peut dépendre de la température au point considéré.

3.2.2. Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection intervient à la limite de séparation de deux phases de nature différentes (air/liquide, air/solide, liquide /solide). La convection résulte de la combinaison du transfert de chaleur, par conduction (diffusion) et du transport d'énergie par l'écoulement des particules fluide (advection). Comme pour le mode de transfert par conduction la convection n'existe pas dans le vide. On distingue deux types de convection :

- Convection forcée : mise en mouvement d'un fluide par moyen mécanique ;
- Convection naturelles : mise en mouvement du fluide sous l'action de la gravité (poussée d'Archimède).

Le traitement numérique de ce phénomène est très complexe, car il nécessite le maillage du milieu fluide et la résolution des équations de Navier-Stokes, ou de Reynolds. Une autre approche, plus légère, consiste à représenter la convection par des conditions aux limites, à l'aide de coefficients d'échange h , dans le cas d'une interface solide/fluide, la quantité de chaleur reçue par le solide est proportionnelle à l'aire A de l'interface et à la différence de température, $\Delta T = T_f - T_s$, T_f et T_s représentent respectivement la température du solide et celle du fluide, ce transfert d'énergie obéit à la loi de Newton :

$$\frac{q}{a} = h \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

$\frac{q}{a}$ Représente la quantité de chaleur échangée par unité de temps et de surface en ($W \cdot m^{-2}$) et h représente le coefficient d'échange en ($W \cdot m^{-2} K^{-1}$), ce dernier est disponible sous forme tabulé, suivant les propriétés du fluide et les caractéristiques physiques du matériau, du type d'écoulement et de la géométrie du problème (voir tableau), En convection naturelle, la valeur du coefficient d'échange varie de 5 à 30 ($W \cdot m^{-2} K^{-1}$).

Tableau 3.1 : Exemple de coefficient de convection.

Type de convection	h en W.m-2 K-1
convection libre dans l'air	5-30
convection libre dans l'eau	500-1000
convection forcé dans l'air	100-500
convection forcé dans l'eau	100-15000

3.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement

D'un point de vue phénoménologique, le transfert par rayonnement se traduit par un échange de chaleur, entre deux corps séparés par un milieu n'autorisant aucun échange par conduction ou par convection (ex : le vide). Ce phénomène obéit à la théorie de la mécanique quantique, le transfert de chaleur présente la dualité onde-corpuscule. Ainsi, on peut considérer soit l'aspect corpusculaire du rayonnement, et donc supposer un déplacement d'un paquet de photons, soit son aspect ondulatoire sous la forme d'une onde électromagnétique.

3.2.3.1. Le corps noir

Lorsque l'on décrit les caractéristiques radiatives des corps réels, il est nécessaire d'introduire le concept du corps noir, celui-ci peut servir de références par rapport à d'autres surfaces réels, en effets, le corps noir est une surface idéale qui possède les propriétés suivantes :

- Il absorbe tout le rayonnement incident dans toutes les directions et toutes les longueurs d'ondes.
- Pour une température donnée et une longueur d'onde donnée, aucune surface ne peut émettre plus d'énergie que le corps noir
- le corps noir diffuse de l'énergie dans toutes les directions
- le flux de puissance f (W.m^{-2}), émis par un corps noir de surface A obéit à la loi de Stephan - Boltzmann (4) :

$$F = \sigma T^4 \quad (3.4)$$

Où $\sigma = 5,76.10^{-8}$ ($\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) est la constante de Stephan-Boltzmann (4) : et T la température absolue en Kelvin.

3.2.3.2 les cas réels

La plupart des solides ne se comportent pas comme des corps noirs, ils n'absorbent pas la totalité des émissions irradiantes. Ils réfléchissent une partie de cette émission en plus de leur propre radiation .On définit l'émissivité ε comme le rapport, à la même température T , entre le flux de puissance émis par un corps réel et le flux émis par ce corps, considéré cette fois comme un corps noir. Le flux de puissance pour un corps réel d'émissivité ε vaut :

$$F = \sigma \varepsilon T^4 \quad (3.5)$$

La quantité de chaleur (W. m^{-2}) reçue par un solide, à la température T et rayonnant vers l'extérieur considéré comme un corps noir à la température T_e , par unité de temps et de surface, est égale à :

$$\frac{q}{a} = \sigma \cdot \varepsilon (T_e^4 - T^4) \quad (3.6)$$

Ce type de transfert est un processus important dans les systèmes électroniques embarqués dans des engins spatiaux, puisqu'il est le seul mode de propagation de la chaleur dans le vide.

En effet, ce dernier n'autorise pas les modes de transfert thermique par conduction ou convection.

3.3. Equation de diffusion de la chaleur

Soit un volume infinitésimal de matière de côté dx , dy et dz , nous pouvons établir le bilan énergétique de la figure (3.1). Tout d'abord, considérons le flux de chaleur (en $W \cdot m^{-2}$), q_x , q_y et q_z qui entrent dans les flux de chaleur ; q_{x+dx} , q_{y+dy} et q_{z+dz} qui sortent par les faces du volume infinitésimale. On note E_g (Eq3.7) la génération d'énergie calorifique à l'intérieur du volume. Cette quantité est positive pour des réactions chimiques exothermiques ou par l'effet de joule, et négative pour des réactions chimique endothermique, le terme $g(x, y, z, t)$ s'exprime (en $W \cdot m^{-3}$) et représente la densité volumique de puissance générée par les sources placées à l'intérieur du volume.

$$E_g = g(x, y, z, t) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (3.7)$$

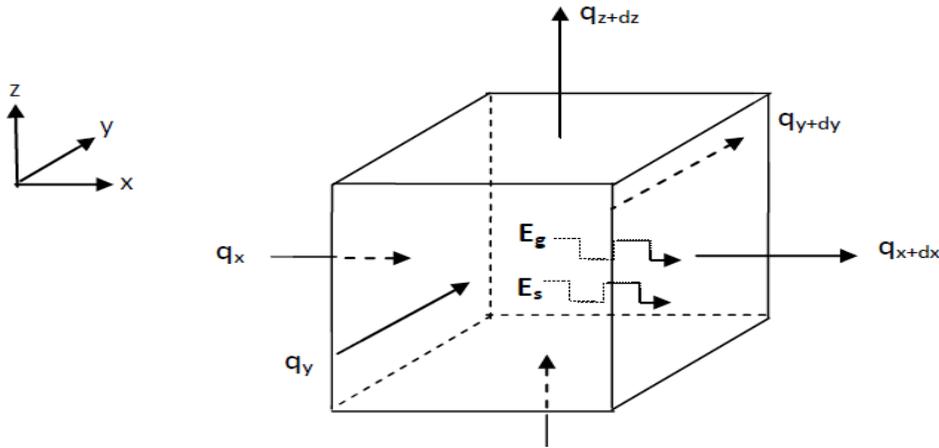


Figure 3.1 : Bilan énergétique au sein d'un volume élémentaire.

On note E_{st} la variation d'énergie interne dans le volume, elle s'exprime par la relation (3.8) dans laquelle C_p en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ représente la chaleur spécifique et ρ en $kg \cdot m^{-3}$ la masse volumique du matériau.

$$E_{st} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (3.8)$$

En appliquons le principe de conservation de l'énergie au volume infinitésimale, on obtient la relation suivante :

$$E_{st} = \sum \phi + E_g \quad (3.9)$$

Le terme $\sum \phi$ représente le bilan des flux d'énergie sur les faces du volume. Le flux de chaleur q et le flux d'énergie ϕ sont liés par la relation suivante

$$\phi = q \cdot S \quad (3.10)$$

S est la surface traversée par la densité de chaleur q . En appliquant un développement limité de Taylor en 1^{er} ordre, on obtient :

$$q_x + dx = q_x + \frac{\partial q}{\partial x} dx \quad (3.11)$$

$$q_y + dy = q_y + \frac{\partial q}{\partial y} dy \quad (3.12)$$

$$q_z + dz = q_z + \frac{\partial q}{\partial z} dz \quad (3.13)$$

Des relations (3.10) et (3.11, 3.12, 3.13), on exprime le bilan des flux :

$$\sum \phi = (q_x - q_{x+dx}) \cdot dy \cdot dz + (q_y - q_{y+dy}) \cdot dx \cdot dz + (q_z - q_{z+dz}) \cdot dx \cdot dy \quad (3.14)$$

$$\sum \phi = \left(\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} \right) dx \cdot dy \cdot dz \quad (3.15)$$

Des relations (3.8), (3.9) et (3.15), la loi de conservation de l'énergie donnée par la relation (3.9) devient :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} \right) + g(x, y, z, t) \quad (3.16)$$

En appliquant la relation de Fourier (3.1), on obtient l'équation de la chaleur :

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g(x, y, z, t) \quad (3.17)$$

Pour que le problème soit complètement posé, il faut ajouter à l'équation de chaleur des conditions initiales, les conditions aux limites, les conditions aux limites peuvent être de trois types :

- **Condition de Dirichlet** : on impose une température constante sur une surface (fond de puce pour les systèmes électronique par exemple)
- **Condition de Neumann** : on impose un flux de puissance sur une surface (condition dite hétérogène).
- **Condition de Cauchy** : Le flux s'exprime en fonction de la différence entre la température T de paroi et une température de référence T_a .

$$q = h(T - T_a) \quad (3.18)$$

Cette conditions peut exprimer soit un échange par convection où h est le coefficient de convection (T_a correspond à la température du fluide T_f en contact avec la paroi), soit un échange par rayonnement où h est proportionnel à : $(T+T_a) \cdot (T^2+T_a^2)$. Dans ce dernier cas, T_a équivaut à la température T_s de l'extérieur considéré comme un corps noir.

3.4. Analyse thermiques

La méthode adoptait pour se faire est la méthode des éléments finis

3.4.1.1. Champ potentiels :

L'étude de la plupart des problèmes de physique consiste à déterminer un champ (scalaire, vectoriel, ou tensoriel) u (M, t) qui satisfait à un ensemble d'équation et de conditions aux limites imposé sur un domaine Ω . Le tableau (3.2), regroupe quelques champs et leurs potentiels associés. Les premiers sont liés aux potentiels par la dérivée spatiale de ces derniers.

Tableau 3.2 : Listes de quelques champs et de leurs potentiels associés.

Champs	Potentiels
Densité de chaleur	Température
Contrainte mécaniques	Déplacement
Champs électrique	Tension
Champ magnétique	Vecteur potentiel

3.4.1.2. Grande lignes de la méthode des éléments finis

La modélisation d'un problème réel par un modèle physique nécessite la résolution des champs $U(M(x, y, z), t)$: une solution d'équation aux dérivées partielles ou non et de condition aux limites. Or, la résolution analytique de ce problème est souvent impossible à obtenir, à l'inverse des analyses numérique. Néanmoins, ses derniers sont plus "pauvres" que les solutions analytiques. En effet l'analyse numérique oblige à déterminer un certain nombre de paramètres (caractéristiques des matériaux, conditions aux limites, etc....) avant la résolution du problème, par conséquent, la solution numérique obtenu n'est valable que sous ses conditions prédéfinies ; alors qu'une solution analytique conserve l'ensemble de ses paramètres et permet d'étudier leurs influence sur la solution.

Ainsi, l'emploi de la méthode des éléments finis consiste à rechercher une solution approchée sous la forme d'un champ définis par morceaux sur un sous domaines Ω_i , ce dernier correspond à une partition du domaine Ω formé par un modèle réel.

Au sein de chaque sous-domaine Ω_i le champ dit locale est déterminé à partir des valeurs (de celui-ci ou de ces dérivées partielles) en certain point appartenant à Ω_i que l'on appelle nœuds, les champs locaux sur Ω_i sont alors obtenus par interpolation (de forme généralement polynomiale) des valeurs aux nœuds. le domaine Ω_i associé a l'interpolation entre ses nœuds forme un élément. Chaque extrémité de ses derniers correspond donc à un nœud ou point de grille. La variation des champs locaux (ou de leur potentiels associe) à l'intérieur d'un élément finis est obtenu par l'interpolation des valeurs des champs au niveau des nœuds.

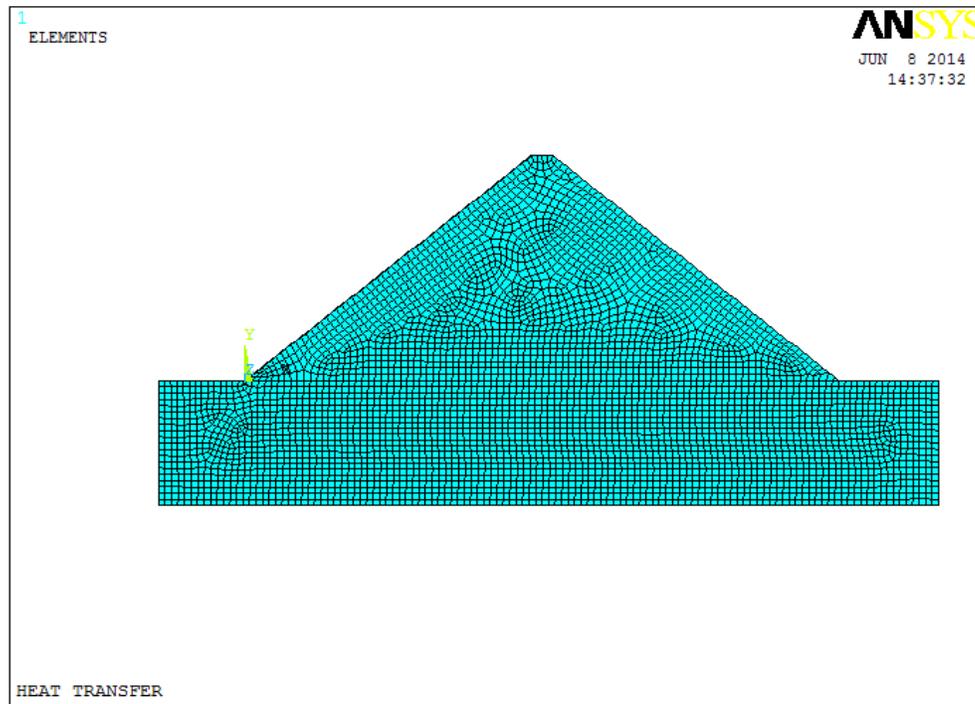


Figure 3.2 : discrétisation d'un élément (exemple d'un barrage en terre a masque amont en béton bitumineux).

Finalement, chercher une solution par élément finis consiste à trouver quelles valeurs il faut donner au nœud de chaque sous-domaine Ω_i (ses champs déterminant le champ local sur Ω), pour la juxtaposition de l'ensemble des champs locaux fournissent une solution qui soit plus proche de la solution réelle du problème.

En résumé, cette méthode nécessite la discrétisation d'un continuum en un modèle composé d'un assemblage d'éléments finis qui possèdent des formes et des tailles variées. De plus le calcul de la solution nécessite la prise en compte d'un certain nombre de paramètres, tels que :

- La géométrie discrétisée en éléments finis.
- Les contraintes imposées sur le dispositif
- Les propriétés des matériaux composant le dispositif.

Nous venons de décrire succinctement l'approche globale de la méthode des éléments finis. Par la suite, nous exposerons les principales étapes mathématiques de cette méthode.

3.5. Méthodes des éléments finis

3.5.1 Introduction

Comme nous l'avons précédemment évoquée, la méthode des éléments finis a pour but de remplacer un problème mathématique défini dans un milieu continu et sous forme d'équations différentielles ou d'intégrales, par un problème discret sous forme matricielle qu'il est possible de résoudre numériquement.

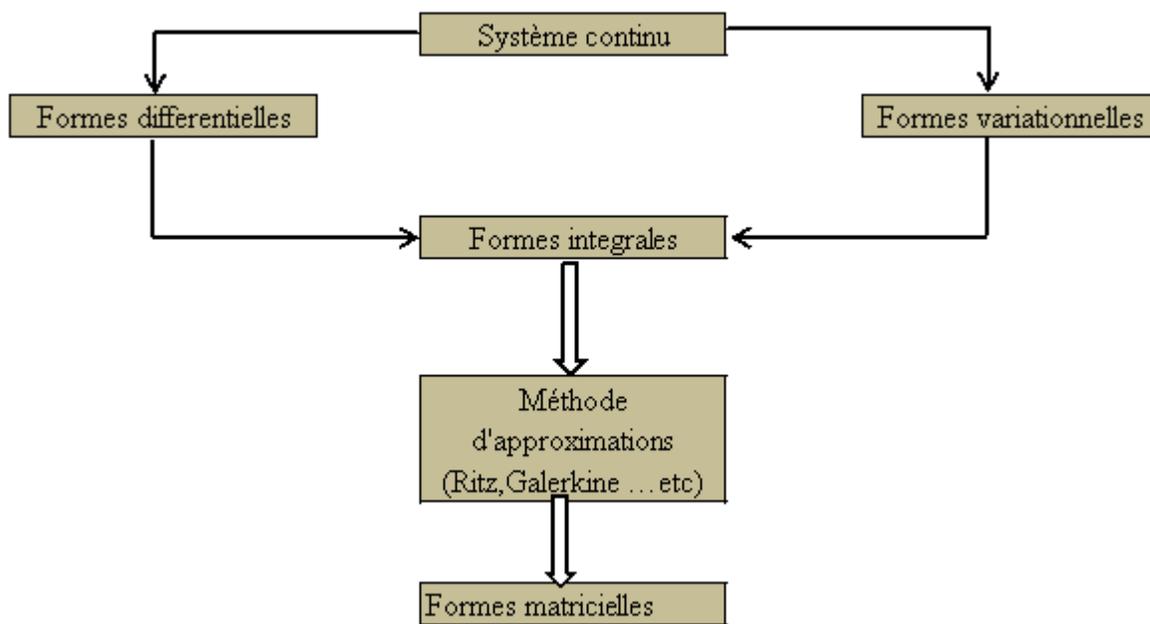


Figure 3. 3 : Méthode d'approximation.

La figure (3.3) permet de distinguer un certain nombre de méthode (résidus pondéré, ou méthode variationnelle) utilisées afin d'obtenir la forme intégrale du problème mathématique initial. Un système (physique) peut être formulé de façon équivalente par une formulation variationnelle ou par un système d'équations différentielles. La transformation puis la discrétisation de cette forme intégrale conduit à une équation matricielle qui sera résolue numériquement.

3.5.2. Les formulation variationnelle

Pour résoudre un système différentiel, partiellement modélisant un système physique, il est nécessaire de le mettre sous forme intégrale, appelé aussi forme variationnelle ou encore forme faible. Ces systèmes peuvent être déduits par des considérations mathématiques ou physiques, pour être suffisamment générale, on note :

-U(M) le champ d'inconnu

- On symbolise le système différentiel par un operateur différentiel

-Les conditions aux limites sur le bord symbolisé par un operateur C nul sur la frontière Σ

-Le problème analytique s'énonce comme suite :

$$- D(u(M)) = 0 \quad \forall M \in \Omega$$

$$-C(u(N)) = 0 \quad \forall N \in \Sigma$$

3.5.3. Résultat d'analyse fonctionnelle

Dans des espaces fonctionnels de fonctions définies sur un domaine Ω , avec des conditions sur les fonctions de cet espace et des conditions sur Ω qu'on supposera satisfaites, on peut définir un produit scalaire entre deux fonctions f et g :

$$\langle f \cdot g \rangle = \int_{\Omega} f(M) \cdot g(M) d\Omega \quad (3.19)$$

D'autre part, un produit scalaire a la propriété suivante :

$$\langle f \cdot g \rangle = 0 \quad \forall g \Leftrightarrow f = 0$$

En utilisant cette propriété, on aura :

$$\int_{\Omega} f(M) \cdot g(M) d\Omega = 0 \quad \forall g(M) \Leftrightarrow f(M) = 0 \quad (3.20)$$

3.5.4. Formes variationnelles

En utilisant (3.21) une nouvelle formulation du problème consiste à trouver le champ u tels que :

$$\int_{\Omega} \Psi(M) \cdot D(u(M)) d\Omega \quad \forall \Psi(M) \quad (3.21)$$

Avec $C(u(N)) = 0 \quad \forall N \in \Sigma$ et la fonction $\Psi(M)$: fonction de teste de pondération.

Cette formulation est formulation variationnelle au système différentiel initial .Il est possible d'en obtenir d'autre en transformant les intégrales .En effet, l'operateur D fait intervenir des

opérateurs comme le gradient, le Laplacien, la divergence, etc. L'ensemble de ses opérateurs permet de modifier la forme des intégrales initiales en faisant apparaître des intégrales de bords (définie sur les frontières de Σ de Ω) qui permettent de prendre en compte une partie des conditions aux limites.

Finalement, après d'éventuelles transformations d'intégrales, le problème peut se mettre sous la forme suivante :

Trouver le champ u , tel que :

$$A(\Psi(M), u(M)) = B(\Psi(M), u(M)) \quad \forall \Psi(M) \quad (3.22)$$

Avec $C(u(N)) = 0 \quad \forall N \in \Sigma$

Où A et B sont des opérateurs produisant les intégrales sur Σ et Ω , portant également sur $\Psi(M)$, et $u(M)$ ainsi que leurs dérivés. C'est un opérateur qui tient compte des conditions aux limites restantes (les conditions de Dirichlet par exemple)

3.5.5. Application à l'équation de la chaleur

On rappelle la forme différentielle de l'équation de la chaleur (3.17) appliquée à un volume V dont la surface est notée S .

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K(T) \cdot \vec{\Delta}(T)) + g(x, y, z, t)$$

Avec les conditions aux limites :

$T = T_p$ la température imposée sur une surface S_T ,

$\vec{n} K(T) \vec{\nabla}(T) = \phi_s + h(T_f - T) + \sigma \cdot \epsilon (T_e^4 - T)$; L'ensemble des flux imposés sur la surface S_s (l'ensemble des flux définie précédemment dans le paragraphe 1.1.2)

$S = S_T \cup S_s$ et $S_T \cap S_s = \emptyset$.

En appliquant (3.22) sur l'expression de l'équation de la chaleur on obtient :

$$\int_V \Psi \left\{ \nabla \cdot (K(T) \vec{\nabla}(T)) + g(x, y, z, t) - \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad (3.23)$$

En utilisant le théorème de divergence sur le premier terme de l'intégrale, il devient :

$$\int_V \nabla \cdot (\Psi (\nabla(T) \overline{\nabla(T)})) dV = \int_V \overline{\nabla}(\Psi) K(T) dV + \int_V \Psi (g(x, y, z, t) - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}) dV = 0 \quad (3.24)$$

Le théorème d'Ostrogradski sur la première intégrale de (3.24) fait apparaître des intégrales définies sur la surface du volume étudié, On a donc :

$$\begin{aligned} \int_V K(T) \overline{\nabla}(\Psi) \overline{\nabla}(T) dV - \int_{S_g} \Psi (h(T_f - T) + \sigma_\varepsilon (T_e^4 - T^4)) dS + \int_V \rho \cdot C_p \cdot \Psi \frac{\partial T}{\partial t} dV \\ = \int_{S_g} \Psi \cdot \phi_s \cdot dS + \int_V \Psi \cdot g(x, y, t) dV \end{aligned} \quad (3.25)$$

Cette expression prend bien une forme variationnelle, puisqu'elle s'écrit :

$$A(\Psi(M), T(M)) = B(\Psi(M), T(M)) \quad \forall \Psi(M) \quad (3.26)$$

Les seules conditions aux limites restantes sont :

- $T = T_p$ la température imposé sur une surface S_T

La formulation du problème sous forme variationnelle ne permet pas d'avoir la solution, mais elle permet de réduire le nombre d'inconnues, ou de diminuer les ordres de dérivations de ces dernières afin d'améliorer l'efficacité de la résolution numérique.

3.6. Maillage et interpolation

3.6.1. Maillage

L'opération du maillage consiste à diviser le domaine Ω en sous-domaine appelés mailles, il faut donc :

- Définir le domaine Ω
- Le diviser en mailles Ω_i , telles que l'ensemble des Ω_i soit une répartition de toutes ses opérations sont assistées par des logiciels a éléments finis (ou des logiciels dédiés).

3.6.2. L'interpolation

On rappelle que les solutions approchées par la méthode des éléments finis sont une juxtaposition des champs locaux définis dans chaque maille. Pour qu'une maille devienne un élément, il faut :

- ❖ Choisir arbitrairement la position des nœuds, ainsi la résolution de ce problème se ramène à calculer les valeurs de la solution approchées aux nœuds du maillage. Par ailleurs, le nombre d'inconnues par nœud varie selon la nature du problème et la dimension de l'espace physique ce nombre est appelée degrés de liberté.
- ❖ Choisir une famille de champs locale destinées à fournir une valeur approchée a la solution en tout point de la maille, cette famille de fonction s'appelle l'espace des fonctions d'interpolation de la maille.
- ❖ Considérons un point m appartenant à un élément composées de n nœuds, suivant la dimension (notée d) de l'espace physique, ce point peut avoir 1,2 ou 3 coordonnées.
- ❖ L'interpolation du champ local $u_B^*(m)$ s'effectue à partir des valeurs, notées $u_B^{(j)}$, du champ aux nœuds appartenant à l'élément que l'on note $m^{(j)}$ avec $j= 1, \dots, n$. ($n > d$)
.L'interpolation polynomiales u_B^* sur l'élément est défini par :

$$u_e^*(m) = \sum_{i=1}^n u_e^i p^{(i)}(m) \quad (3.27)$$

Telles que :

$$u_e^*(m^{(j)}) = \sum_{i=1}^n u_e^i p^{(i)}(m^{(j)}) = u_e^{(j)} \quad \forall j \in [1, \dots, n] \quad (3.28)$$

$p^{(i)}(m)$ Sont les polynômes de bases d'interpolation (ou fonction de formes), ils possèdent un nombre de variable égale à la dimension de l'espace physique, on note $\{B_K(m)\}$ une base de polynômes dont la dimension (fournie par le tableau suivant) dépend à la fois du degré d'interpolation et du nombre de variable.

Tableau 3.3 : Dimension des polynômes en fonction du degré d'interpolation et de l'espace physique.

Degré	1Variable (1D)	2Variables (2D)	3Variables (3D)
1(Interpolation linéaire)	2	3	4
2(Interpolation quadratique)	3	6	10
3	4	10	20
4	5	15	35

5	6	21	56
---	---	----	----

Remarquons que généralement dans une interpolation polynomiale à n nœuds, les polynômes $P_{(j)}$ doivent être une n -base de polynômes, ils peuvent s'écrire de la manière suivante :

$$p^{(i)}(m) = \sum_{K=1}^n a_K^{(i)} B_K(m) \quad (3.29)$$

Les $a_K^{(i)}$ sont des coefficients des polynômes $p^{(i)}(m)$,

La relation (4.27) implique que :

$$p^{(i)}(m^{(j)}) = \delta_{ij} \quad (3.30)$$

Soit :

$$\sum_{K=1}^n a_K^{(i)} B_K(m^{(j)}) = \delta_{ij} \quad (3.31)$$

Cette relation montre que la matrice $[P]$ des coefficients $a_K^{(i)}$ des polynômes $p^{(i)}(m)$ sur la base $\{B_K(m)\}$, est l'inverse de la matrice $[C]$ des valeurs des polynômes de la base $\{B_K(m)\}$, aux nœuds de l'élément, les coefficients des polynômes de l'interpolation sont données par :

$$[P] = [C]^{-1} \quad (3.32)$$

3.6.2.1. Exemple d'interpolation

Considérons l'élément fini linéique de longueur L , présenté sur la fig (3.4), on veut construire une interpolation du déplacement axiale u_e entre les nœuds 1, 2,3 de l'élément et suivant l'axe des coordonnées X , le champ de déplacement veut alors :

- U_e^1 au nœud 1.
- U_e^2 au nœud 2.
- U_e^3 au nœud 3.

L'interpolation est de la forme.

$$U_e = \sum_{i=1}^3 U_e^{(i)} P^{(i)}(x)$$

Comme l'élément ne comporte que 3 nœuds, le tableau (3.3) montre que le degré d'interpolation vaut 2, ce qui correspond donc à une interpolation quadratique. La base $\{B_K\}$ est formée des 3 polynômes $\{B_1 = 1, B_2 = X, B_3 = X^2\}$, le calcul des coefficients $a_K^{(i)}$ des polynômes $p^{(i)}(x)$, est déduite de la relation (3.32), et s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} a_1^{(1)} & a_2^{(1)} & a_3^{(1)} \\ a_1^{(2)} & a_2^{(2)} & a_3^{(2)} \\ a_1^{(3)} & a_2^{(3)} & a_3^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.33)$$

En rappelant que les polynômes $p^{(i)}(x)$ s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} P^{(1)} \\ P^{(2)} \\ P^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^{(1)} & a_2^{(1)} & a_3^{(1)} \\ a_1^{(2)} & a_2^{(2)} & a_3^{(2)} \\ a_1^{(3)} & a_2^{(3)} & a_3^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

L'interpolation du déplacement $U_e(x)^*$ se déduit de (3.27)

$$U_e(x)^* = (1 - 3x + 2x^2)U_e^1 + (4x - 4)U_e^2 + (-x + 2x^2)U_e^3 \quad (3.35)$$

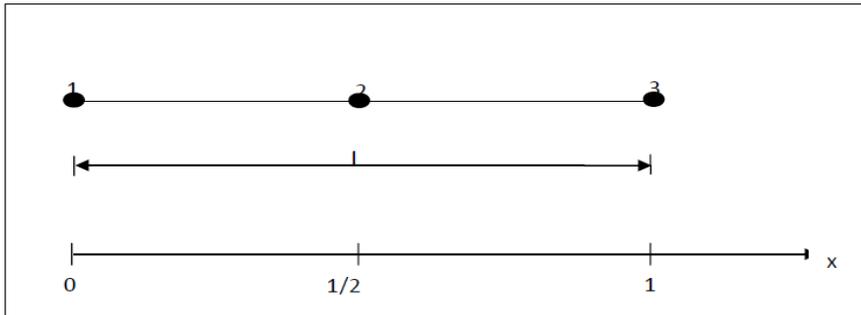


Figure 3.4 : un exemple d'un élément linéique formé par trois nœuds.

Remarquons : la matrice $[P^{(1)}, P^{(2)}, P^{(3)}]^T$ est souvent appelée la matrice qui regroupe la matrice $[N_e]$ d'interpolation élémentaire. Donc, le champ de calcul local discrétisé dans chaque élément s'écrit :

$$u_e^*(x, y, z, t) = [N_e(x, y, z)].\{u_e(t)\} \quad (3.36)$$

Où $\{u_e(t)\}$ est la matrice qui regroupe toutes les valeurs du champ approché $u_e^*(x, y, z, t)$ aux nœuds de l'élément.

3.6.3. Discrétisation

La solution analytique d'un problème (3.22) sous forme variationnelle est en générale impossible à obtenir .Par conséquent, nous sommes conduits à chercher une solution approchée U^* par la méthode numérique des éléments finis. L'emploi de cette technique nécessite la décomposition (le maillage) du domaine d'étude Ω en sous -domaines Ω_i .ces derniers possèdent une forme géométrique simple et son relie entre eux par des nœuds .De plus, l'intégration d'une loi d'interpolation entre les valeurs des nœuds permet le calcul de la solution approchée à l'intérieur de chaque sous-domaine Ω_i que l'on appelle élément.

Finalement, la résolution du problème analytique (3.22) consiste à résoudre le problème approchée (ou discrétisé) suivant :

$$A(\Psi(M), u^*(M)) = B(\Psi(M), u^*(M)) \quad \forall \Psi(M) \quad (3.37)$$

Avec $u^*(N) = 0 \quad \forall N \in \Sigma$ et en posant :

$$u^*(M) = [N_1(M), N_2(M) \dots \dots \dots, N_n(M)] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix} = [N(M)]. \{u\} \quad (3.38)$$

Où :

- n est le nombre de nœuds du maillage Ω
- $N_i(M)$ sont les fonctions d'interpolations composant la matrice d'interpolation notée $[N(M)]$.
- $\{u\}$ est le vecteur comprenant l'ensemble des valeurs du champ approché aux nœuds du maillage.

3.6.3.1. La méthode de Galerkinge

Cette méthode consiste à utiliser des fonctions teste $\Psi_i(M)$ qui correspondent aux coefficients $a_K^{(i)}$ des polynômes d'interpolation définis dans le paragraphe (3.6.2) les fonctions de testes s'écrivent donc :

$$\Psi_i(M) = \frac{\partial u^*(M,t)}{\partial u_i} = N_i(M) \quad (3.39)$$

Avec

$$u^*(M, t) = \sum_{i=1}^n N_i(M) u_i(t) = [N]^T \{u\} \quad (3.40)$$

Si on applique la méthode de Galerkin à un élément fini, alors les fonctions de $\Psi_i(M)$ sont égales aux fonctions d'interpolation N_i (3.35) de l'élément fini. De ce cas, la relation (3.39) devient :

$$\Psi_i(M) = \frac{\partial u_e^*(M, t)}{\partial u_i} = N_i(M) \quad (3.41)$$

Avec

$$u_e^*(M, t) = \sum_{i=1}^n N_e^i(M) u_e^i(t) = [N]_e^T \{u\} \quad (3.42)$$

3.6.3.2 Application de la méthode Galerkin à l'équation de la chaleur

Pour résoudre l'équation de la chaleur (3.17), par la méthode des éléments finis, considérons l'expression de sa forme variationnelle (3.22) en remplaçant le terme Ψ par une fonction de teste

$$\Psi_i : \int_V \Psi_i (\nabla \cdot (K(T) \vec{\nabla}) + g(x, y, t) - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}) dV = 0 \quad (3.43)$$

Pour discrétiser l'intégrale ci-dessus, on pose T^* , la température approchée du champ de température réel T . d'après (4.37), s'écrit :

$$T^* = [N]^T \{T\} \quad (3.44)$$

De plus on pose :

$$\vec{\nabla}(T) = [d][N]^T \{T\} = [B]^T \{T\} \quad (3.45)$$

Où $[d]$ et $[B]$ sont respectivement l'opérateur différentiel et la matrice de dérivation. La forme de ces deux matrices dépend du référentiel (cartésien, cylindrique ...).

Nous avons montré dans le paragraphe (3.5.5) que l'expression (3.23) peut aboutir à la forme intégrale (3.24). Pour simplifier le calcul. Considérons que le modèle numérique comprend uniquement une conductivité thermique linéaire, sous la formulation de Galerkin et sous une forme discrétisée, l'équation de la chaleur s'écrit :

$$[M]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = [F_{ext}] + [F_{int}] = [F] \quad (3.46)$$

Avec

- $[M] = \int_V [N] \rho C [N]^T dV$, matrice de masse ou de chaleur spécifique de l'élément,

- $[K] = \int_V [B] K [B]^T dV + \int_{S_s} [N] h [N]^T dS$, matrice de raideur ou de conductivité thermique de l'élément,

- $[F_{int}] = \int_{S_s} [N] (\phi_s + h T_f + \sigma_\epsilon (T_e^4 - T^4)) dS$, le vecteur des flux sur les surfaces

- $[F_{ext}] = \int_V [N] g dV$, puissance injectée dans l'élément.

Dans la pratique, les $[K][M]$ et $[F]$ sont construite éléments par éléments.

Cette opération s'appelle l'assemblage, l'équation de la chaleur discrétiser (3.45) devient pour un élément :

$$[M^e] \{\dot{T}\} + [K^e] \{T\} = [F_{ext}^e] + [F_{int}^e] = [F^e] \quad (3.47)$$

- $[M^e] = \int_{V_e} [N_e] \rho_e C_e [N_e]^T dV$, matrice de masse ou de chaleur spécifique de l'élément.

- $[K^e] = \int_{V_e} [B_e] K_e C_e [B_e]^T dV + \int_{S_s^e} [N_e] h [N_e]^T dS$, le vecteur des flux sur les surfaces.

- $[F_{ext}^e] = \int_{V_e} [N_e] g dV$, puissance injecté dans l'élément.

Dans ces relations, le volume V_e correspond au volume de l'élément S_s^e correspond à la surface de l'élément appartenant à S_s . Dans le cas contraire, la matrice $[F_{ext}^e]$ est nulle.

Afin d'établir le système matriciel sur l'ensemble du domaine V (constitué de n éléments), il est nécessaire de effectuer l'assemblage des matrices élémentaire. On peut définir les grandeurs matricielles globales :

$$M = \sum_{e=1}^n M^e; K = \sum_{e=1}^n K^e; F_{int} = \sum_{e=1}^n F_{int}^e; F_{ext} = \sum_{e=1}^n F_{ext}^e \quad (3.48)$$

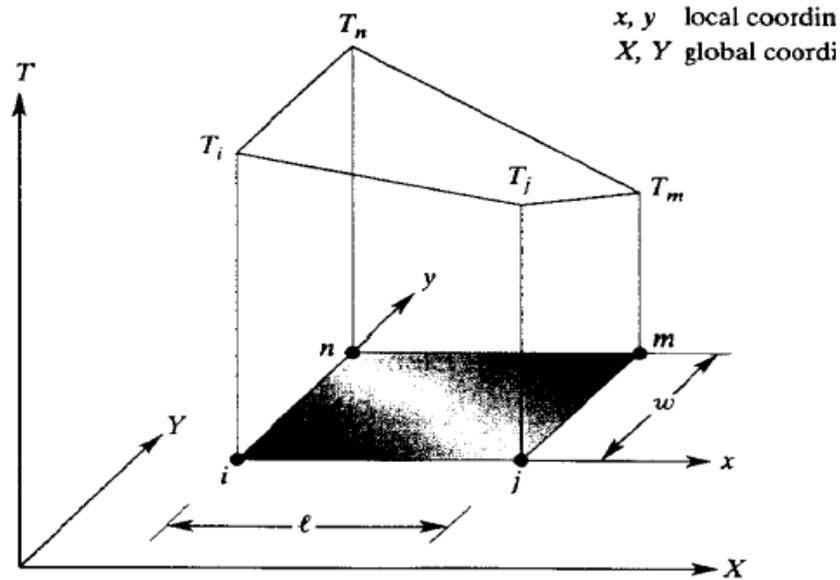
Finalement, en injectant (3.46) dans (3.45), on obtient le système global

$$M \dot{D} + K D = F_{int} + F_{ext} \quad (3.49)$$

L'étape de la discrétisation est l'opération de l'assemblage des matrices élémentaires permettant de ramener le traitement du problème initial à une résolution de système d'équations algébrique, ces systèmes sont généralement de grande taille, leur résolution nécessite l'emploi d'algorithmes disponibles au sein du logiciel à éléments finis.

3.6.4 Exemple de calculs élémentaires (rectangle a quatre nœuds, problème plan)

Soit un élément rectangulaire de dimension l et w ci-dessus :



La distribution de la température dans l'élément est régie par une fonction qu'on peut approximer par l'équation suivante à quatre inconnues $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$:

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy \tag{3.50}$$

Le calcul des coefficients α_i s'effectue comme suit :

$$\begin{cases} T = T_i & x = 0 & y = 0 \\ T = T_j & x = l & y = 0 \\ T = T_m & x = l & y = w \\ T = T_n & x = 0 & y = w \end{cases} \tag{3.51}$$

En appliquant les conditions nodales à l'équation (3.51), (3.50) et après solution on aura :

$$\alpha_1 = T_i, \alpha_2 = \frac{1}{l}(T_j - T_i), \alpha_3 = \frac{1}{w}(T_n - T_i), \alpha_4 = \frac{1}{lw}(T_i - T_j + T_m - T_n) \tag{3.52}$$

En substituant ces quantités dans l'équation (3.50), on aura l'écriture matricielle suivante :

$$T(x, y, t) = [N_i(x, y, t), N_j(x, y, t), N_m(x, y, t), N_n(x, y, t)] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} \quad (3.53)$$

Avec $N_{i,j,m,n}$ fonctions de formes données comme suit :

$$\begin{cases} N_i = \left(1 - \frac{x}{l}\right) \left(1 - \frac{y}{w}\right) \\ N_j = \frac{x}{l} \left(1 - \frac{y}{w}\right) \\ N_m = \frac{xy}{lw} \\ N_n = \frac{y}{w} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \end{cases} \quad (3.54)$$

Ainsi l'équation gouvernante de la distribution de la température est donnée comme suit:

$$K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.55)$$

Appliquant maintenant la méthode de Galerkin pour l'équation (3.55) pour obtenir les quatre équations résiduelles $r(T)$ suivantes:

$$\begin{aligned} \int_A N_i \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q \right) dA &= \int_A \left(\rho c N_i \frac{\partial T}{\partial t} \right) dA \\ \int_A N_j \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q \right) dA &= \int_A \left(\rho c N_j \frac{\partial T}{\partial t} \right) dA \\ \int_A N_m \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q \right) dA &= \int_A \left(\rho c N_m \frac{\partial T}{\partial t} \right) dA \\ \int_A N_n \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q \right) dA &= \int_A \left(\rho c N_n \frac{\partial T}{\partial t} \right) dA \end{aligned} \quad (3.56)$$

On peut écrire cette équation sous forme condensée suivante :

$$\int_A [N]^T \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q \right) dA = \int_A \left(\rho c [N]^T \frac{\partial T}{\partial t} \right) dA \quad (3.57)$$

L'équation (3.57) est constituée de quatre intégrales :

$$\int_A [N]^T \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) dA + \int_A [N]^T \left(K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) dA + \int_A [N]^T q dA - \int_A \rho c [N]^T \frac{\partial T}{\partial t} dA \quad (3.58)$$

Pour le calcul de l'équation (3.58), on utilise la formule de changement de variable suivante :

$$[N]^T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.59)$$

Ainsi on aura

$$\int_A [N]^T \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) dA = \int_A K_x \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) dA - \int_A K_x \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) dA \quad (3.60)$$

$$\int_A [N]^T \left(K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) dA = \int_A K_y \frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \frac{\partial T}{\partial y} \right) dA - \int_A K_y \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) dA \quad (3.61)$$

L'équation résiduelle (3.58) peut être réécrite comme suite :

$$\begin{aligned} \int_A K_x \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) dA + \int_A K_y \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) dA + \int_A \rho c \frac{\partial T}{\partial t} [N]^T dA = \int_A K_x \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) dA \\ + \int_A K_y \frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \frac{\partial T}{\partial y} \right) dA + \int_A [N]^T q dA \end{aligned} \quad (3.62)$$

En utilisant l'équation (3.53), l'équation (3.62) peut s'écrire sous forme matricielle suivante :

$$\rho c \int_A \{N\} [N]^T \{\dot{T}\} dA + K_x \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]^T \{T\} dA + K_y \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]^T \{T\} dA = \{F\} \quad (3.63)$$

$$\text{Avec } \left\{ \begin{aligned} \{N\} &= \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_m \\ N_n \end{Bmatrix} & [N]^T &= [N_i, N_j, N_m, N_n] \\ \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_j}{\partial x} \\ \frac{\partial N_m}{\partial x} \\ \frac{\partial N_n}{\partial x} \end{Bmatrix} & \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]^T &= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_m}{\partial x} & \frac{\partial N_n}{\partial x} \end{bmatrix} \end{aligned} \right.$$

Cette equation est sous forme :

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{F\}$$

Avec :

$$[C] = \rho c \int_A [N] [N]^T dA \quad [K] = K_x \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]^T dA + K_y \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]^T dA$$

De l'équation suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [N_i N_j N_m N_n] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} = \frac{1}{lw} [(-w + y)(w - y)y - y] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} \quad (3.64)$$

On aura :

$$\frac{\partial [N]^T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} \frac{1}{lw} \begin{Bmatrix} -w + y \\ w - y \\ y \\ -y \end{Bmatrix} \quad (3.65)$$

Ainsi on aura :

$$-\int_A K_x \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) dA = -K_x \int_A \frac{1}{(lw)^2} \begin{Bmatrix} -w + y \\ w - y \\ y \\ -y \end{Bmatrix} [(-w + y)(w + y)y - y] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} dA =$$

$$-\frac{K_x w}{6l} \begin{bmatrix} 2 & -2 & -1 & 1 \\ -2 & 2 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 2 & -2 \\ 1 & -1 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} \quad (3.66)$$

De la même manière on aura la deuxième quantité égale à :

$$\int_A K_y \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) dA = -K_x \int_A \frac{1}{(lw)^2} \begin{Bmatrix} -l + x \\ -x \\ x \\ l - x \end{Bmatrix} [(-l + x) - x x l - x] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} dA =$$

$$-\frac{K_y}{6l} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & -2 \\ 1 & 2 & -2 & -1 \\ -1 & -2 & 2 & 1 \\ -2 & -1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} \quad (3.67)$$

Ensuite on évalue la quantité $\int_A [N]^T q dA$:

$$\int_A [N]^T q dA = q \int_A \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{Bmatrix} dA = \frac{qA}{4} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.68)$$

En utilisant le théorème de Green, l'intégration surfacique peut être formulée en intégrale linéaire autour de l'élément comme suit :

$$\int_A K_x \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) dA = \int_l [N]^T \frac{\partial T}{\partial x} \cos \theta dl \quad (3.69)$$

$$\int_A K_y \frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \frac{\partial T}{\partial y} \right) dA = \int_l [N]^T \frac{\partial T}{\partial y} \sin \theta dl \quad (3.70)$$

l représente un segment linéaire sur la limite de l'élément et θ l'angle unité de la normale. En négligeant la radiation, la conservation d'énergie dans le sens x s'écrit :

$$-K_x \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_f) \quad (3.71)$$

Ainsi l'équation (3.69) devient :

$$-\int_l K_x [N]^T \frac{\partial T}{\partial x} \cos \theta dl = -\int_l h(T - T_f) [N]^T \cos \theta dl \quad (3.72)$$

L'intégrale de cette équation a deux termes :

$$-\int_l h(T - T_f) [N]^T \cos \theta dl = -\int_l hT [N]^T \cos \theta dl + \int_l hT_f [N]^T \cos \theta dl \quad (3.73)$$

Les termes :

$$\int_l hT [N]^T \sin \theta dl$$

$$\int_l hT [N]^T \cos \theta dl$$

Representent les conditions de convection thermique sur les cotés du rectangle, ils contribuent dans le calcul de la matrice de conductivité sur chaque coté du rectangle, on aura ainsi:

1. $[K]$ sur le coté ij :

$$[K]^e = \frac{hl_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

2. $[K]$ sur le coté jm :

$$[K]^e = \frac{hl_{jm}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

3. $[K]$ sur le coté mn :

$$[K]^e = \frac{hl_{mn}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

4. sur le coté ni :

$$[K]^e = \frac{hl_{ni}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Avec $l_{ij} = l_{mn} = l$ et $l_{jm} = l_{ni} = \omega$

Les matrices élémentaires du chargement thermique sont:

1. $[F]$ sur le coté ij :

$$\{F\}^e = \frac{hT_f l_{ij}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.78)$$

2. $[F]$ sur le coté jm :

$$\{F\}^e = \frac{hT_f l_{jm}}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.79)$$

3. $[F]$ sur le coté mn :

$$\{F\}^e = \frac{hT_f l_{mn}}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.80)$$

4. $[F]$ sur le coté ni :

$$\{F\}^e = \frac{hT_f l_{ni}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.81)$$

Au final la matrice de conductivité pour un élément rectangulaire bilinéaire est donnée par la relation suivante :

$$[K]^e = \frac{K_x \omega}{6l} \begin{bmatrix} 2 & -2 & -1 & 1 \\ -2 & 2 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 2 & -2 \\ 1 & -1 & -2 & 2 \end{bmatrix} + \frac{K_y \omega}{6\omega} \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & 2 & -2 & -1 \\ -1 & -2 & 2 & 1 \\ -2 & -1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

La matrice de charge est donnée sous forme suivante:

$$\{F\}^e = \frac{qtA}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

La matrice de capacité thermique est:

$$[C] = \frac{\rho C_p A}{6} \begin{bmatrix} 2 & 2 & -1 & 0 \\ 2 & 4 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 4 & -2 \\ 0 & -1 & -2 & 2 \end{bmatrix}$$

La dernière étape consiste à l'assemblage des matrices sous forme globale tout en solutionnant le système d'équation $[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{F\}$ pour obtenir les températures nodale .

3.7. Description d'ANSYS

Le logiciel ANSYS [4,5] a été développé par Dr John Swanson, fondateur de la société ANSYS Inc. Qui a son siège à Houston, PA, USA .Il s'agit d'un outil de développement en

analyse d'ingénierie. La méthode utilisée est celles des éléments finis .Il est utilisée dans des domaines allant de l'automobile et l'électroniques à l'aérospatiale et la chimie.

Le logiciels ANSYS permet la modélisation de structures, produits, composante ou systèmes et d'étudier leurs réponses physiques telles que les niveaux de contraintes, les distributions de températures ou l'effet de champs électromagnétiques.

3.7.1. Interface utilisateur

L'interface utilisateur est basée sur l'environnement X Windows conjointement à OSF/Motif .La partie graphique est interactive et permet la visualisation 3D, incluant les gradients, les iso surfaces, les flux de particules et les coupes de volumes .Il est possible de générer des images en PostScript, HPGL, TIFF.

3.7.2. Préprocesseur

La phase de préprocesseur est celle où sont spécifiées les données .L'utilisateur peut choisir le système de coordonnées et le type d'éléments. Définir des constantes et des propriétés des matériaux, crée des modèles solides et les mailler, ainsi que définir des équations de couplage et contraintes, l'utilisateur peut aussi exécuter un programme qui lui indiquera la taille des fichiers générés, la mémoire nécessaire, le temps d'exécution et le wavefront nécessaire, le maillage peut être de 3types :

- Maillage conforme (seulement des briques)
- Maillage libre (tétraédrique)
- Maillage adaptatif

3.7.3. Solveur

Le type d'analyse sélectionné déterminé les équations qui seront utilisées par le solveur.les catégories disponibles incluent :

- Structure, thermique, champ EM, Champ électrique, fluide, acoustique
- Champ couplés : ceci signifie qu'il est possible de résoudre simultanément plusieurs aspects (par exemple, la thermomécanique, l'hydromécanique ...etc.).
- Chaque catégorie peut encore inclure différents types d'analyse spécifique (statistique ou dynamique etc.) .Dans le simulateur ANSYS utilisé dans nos travaux, il existe différents algorithmes de résolution pour traiter les problèmes a éléments finis .On peut citer deux classes de méthodes :
 - Les Méthodes de résolution directes ;
 - Les Méthodes itératives.

3.7.3.1. Les méthodes de résolution directes

Ces méthodes aboutissent à la solution en un nombre fini d'opérations .Elles sont adaptées au mode de stockage de la matrice $[K]$. Si cette matrice est symétrique, la méthode de décomposition de Cholesky est généralement utilisée. Si elle ne l'est pas, les logiciels recourent à la méthode d'élimination de Gauss. Les méthodes directes sont employées pour des systèmes de tailles moyennes (inferieur à quelques milliers d'inconnues).Le temps de calcul est sensiblement proportionnel au nombre d'inconnues.

3.7.3.2 Les méthodes itératives

Dans ce cas, la solution approchée est atteinte en un nombre infini d'opérations convergentes vers la solution analytique .Ces méthodes intègrent donc un critère d'arrêt, lorsque la solution approchée est suffisamment proche de la solution analytique. Si le système à résoudre est :

$$[K]\{U\} = \{B\}$$

Alors, l'algorithme de résolution cherche à diminuer le résidu $\|R\|$, qui s'écrit :

$$\|R\| = \|[K]\{U_i\} - \{B\}\|$$

Où : $\{U_i\}$ est la solution approchée du problème à l'ième itération.

Suivant le type de méthode itérative, la norme $\|X\|$ peut être la norme euclidienne ou la norme du maximum. De plus, la plus part des algorithmes sont basés sur la descente du gradient : faire évoluer les $\{U_i\}$ dans le sens de $-grad(\|R\|)$. Le critère d'arrêt est soit $\|R\| < \varepsilon_1$

Soit $\|U_i - U_{i-1}\| < \varepsilon_2$. Le choix de ε_1 ou de ε_2 dépend de se que l'on considère comme petit.

Les méthodes itératives sont employées pour des systèmes de grandes tailles, où le traitement par la méthode directe serait prohibitif en termes de temps de calcul .Finalement, ce type de méthode est un compromis entre l'exactitude et le cout de calcul.

3.7.4 Post processeur

C'est la phase où l'utilisateur peut manipuler les résultats de la phase précédente et les visualiser interactivement ou faire sauvegarder pour impression et/ou vidéo.

3.8. Conclusion

Cette partie nous a permis d'avoir un aperçue sur le traitement des problèmes thermiques en premier lieu, et les différents types des transferts thermiques existant. Dans le cadre de nos travaux, seul les transferts thermiques par convection, conduction seront traités, (le rayonnement non traité). En effets c'est les principaux modes de transfert de chaleur qui existe entre le masque en béton bitumineux d'un barrage en terre et le milieu environnant. Par conséquent, une analyse

thermique est indispensable pour pouvoir estimer la répartition de la température sur ce dernier ,pour cela il existe de nombreuses méthodes d'analyses numériques parmi lesquelles on peut citer la méthode des éléments finis .Celle qui correspond à la méthode utilisée par notre simulateur de références (ANSYS), seules les principales étapes de bases ont été exposées à partir de l'exemple du traitement de l'équation de la chaleur, il s'agissait uniquement d'exposer la démarche générale, la terminologie et les concepts qui seront nécessaires à la bonne compréhension des travaux ultérieurs.

4.1 Introduction

L'enrobé bitumineux est un matériau susceptible aux contraintes thermiques, dans les conditions de températures extrêmes l'enrobé perd son caractère viscoélastique linéaire. Les variations de températures peuvent induire des contraintes thermiques extrêmes sous l'effet du phénomène de retrait ou dilatation ; à basse température de service le matériau devient plus élastique, plus fragile et a tendance à se fissurer (retrait contrarié) ; à haute température de service les contraintes engendrent des déformations que l'enrobé ne peut plus supporter, les contraintes de tractions créées par l'effet de la dilatation empêchées (fissuration).

L'objectif principale de ce chapitre est de fournir un panorama générale des concepts et notions propres au traitement des problèmes thermiques utilisé par le logiciel commercial ANSYS [14.00], les résultats de cette analyse sont présentés dans les figures présentées ci-après.

Le principe de l'analyse thermique dans ANSYS est basé sur une équation d'équilibre thermique obtenue à partir du principe de la conservation de l'énergie. La solution par éléments finis qu'on utilise dans "ANSYS" calcule les températures nodales, puis il emploie ces températures pour obtenir d'autres quantités thermiques.

✚ Un barrage à masque est formé :

D'un massif en enrochements construit en travers de la rivière avec des pentes de talus assez douce pour assurer la stabilité. Les enrochements ne sont pas imperméables et, à eux seuls, ils sont incapables de retenir l'eau.

Une couche d'étanchéité appelées masque posée à l'amont du massif en enrochement et qui s'appuie sur ce massif. Le masque étanche sur toute sa surface. Un soin particulier doit être porté à ce que l'étanchéité soit aussi assurées sur la périphérie du masque aussi bien en pied du barrage et dans fondation qu'en rive pour éviter que le masque ne soit contourné.

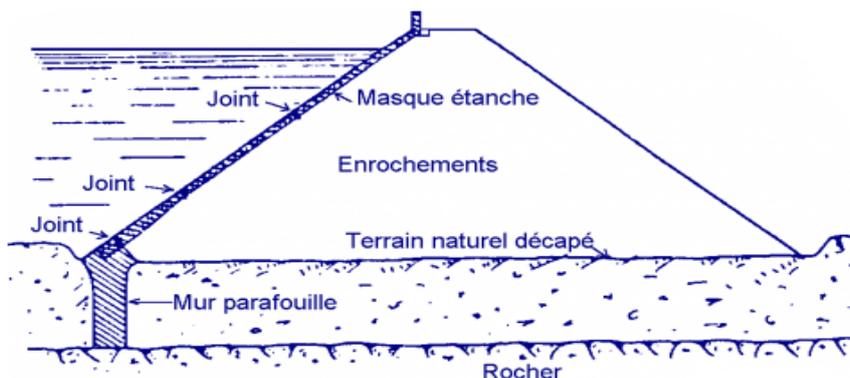


Figure4.1 : coupe sur un barrage en enrochement (Linda Armelle Nzumotchi, 2010)

4.1.2 Le barrage de Ghrib

Le barrage de Ghrib est l'un des importants barrages en Algérie en service, de l'ouest du pays construit entre 1926 et 1938, c'était l'un des premiers barrages en enrochement réalisé avec un masque amont en béton bitumineux, cette solution a été adoptée après des ruptures qui avait affectés plusieurs masques en béton à cause de la déformation du massif.

- Le masque du barrage Ghrib est composé de :
 - Un support
 - Une couche drainante de 8 cm d'épaisseur en béton poreux de ciment.
 - D'une couche en béton bitumineux de 6cm d'épaisseur chacune
 - Un avant masque qui assure la protection thermique du béton bitumineux formé de dalle en béton poreux de 10cm d'épaisseur, solidarisées par un grillage métallique suspendu au couronnement du barrage

Le masque réalisé s'est comporté de façon satisfaisante jusqu'en 1953 date depuis laquelle des désordres ce sont produits à plusieurs reprises.

Les principales caractéristiques du barrage sont données ci-après :

- Longueur en crête270m
- Largeur du massif à la base148m
- Hauteur du massif72m
- Pente talus amont : varient de 2/13à1/1
- Pente talus avale 5/4
- Capacité de la retenue : 300.10^6 m^3

4.1.2.1 structures du masque étanche

La figure (4.2) représente la coupe d'un masque en béton bitumineux, et les différentes couches, qui le constituent.

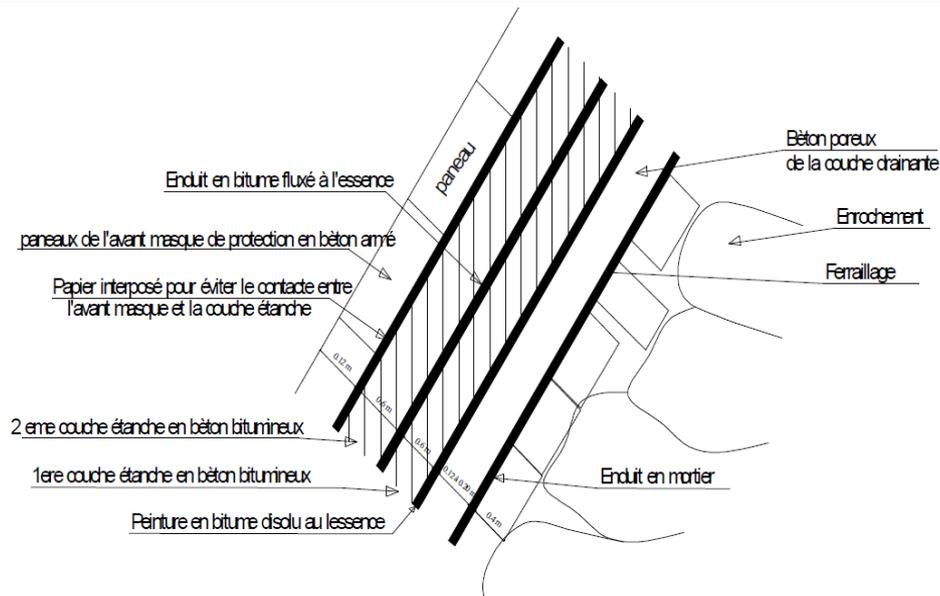


Figure 4.2 : Coupe du masque étanche (Belbachir, K, Montel B, Chevrier L, 1973)

4.2.1 Discrétisations du modèle physique

Un barrage en terre de forme trapézoïdale de hauteur de 72 m montré sur la figure (4.2), forme le domaine de désertisation en éléments finis. Le problème de conduction de la chaleur est résolu par éléments finis bidimensionnel, le type d'élément utilisé dans ANSYS pour le problème de conduction est l'élément thermique plane 55, l'élément quadrilatéral quatre nœuds, la température comme degrés de liberté pour chaque nœud, la version thermique du modèle a été employée pour calculer le profil des températures dans le masque, pour calculer les contraintes thermiques.

La distribution des composantes des contraintes thermiques à été calculée par la méthode des éléments finis (FEM), le type d'élément structural utilisé dans ANSYS est l'élément plane 42 qui est utilisé pour la modélisation des structures solide à deux dimensions. L'élément est défini par quatre nœuds, ayant deux degrés de liberté pour chaque nœud (U_x , U_y).

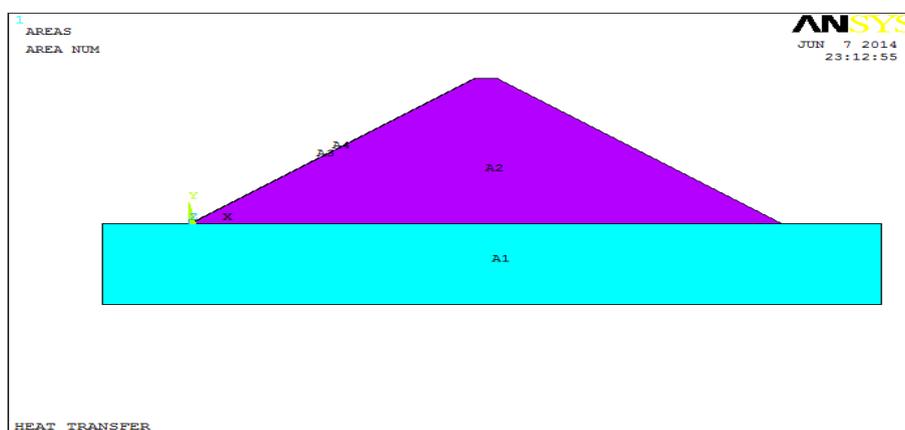
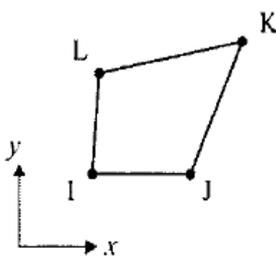


Figure 4.3 : Modèle du barrage utilisé.

Tableau 4.1 : Type d'éléments utilisés

Elément	Thermal	Structural
Type	Plane 55	Plane 42
Nombre de nœuds	4	4
Nombre de degrés de liberté a chaque nœuds	1	2
Nature	Température T	Déplacements Ux et Uz

PLANE55 - 2-D THERMAL
(DOF: TEMPERATURE))



PLANE42 - 2-D PLANE
(DOF: UX, UY)

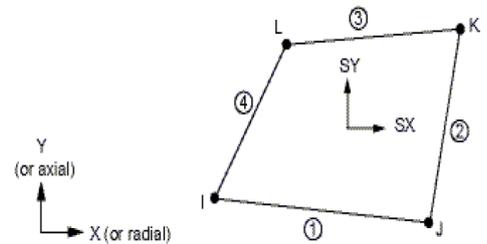
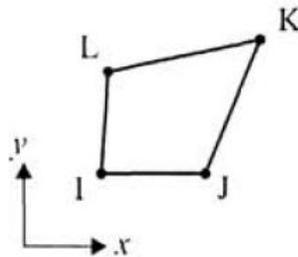


Figure 4.4 : type d'éléments utilisés

PLANE42 utilise la méthode standard où souche volumétrique termes de contraintes aux points de Gauss d'intégration sont remplacés par la déformation volumétrique moyenne des éléments Cette méthode est également connue comme la méthode d'intégration réduite sélective.

Tableau4.2 : caractéristiques physiques des matériaux utilisés

les caractéristiques	Béton bitumineux	Béton	Roche
conductivité thermique	1.16	1.63	.
Chaleur spécifique	930	1047	.
Densité	2230	2300	2000
Elasticité	9,50E+09	1.1067E+09	7E+07
coefficient de poisson	0.41	0.25	0.30
coefficient d'expansion thermique	23.10 ⁻⁶	.	.

4.3 Analyse du champ couplé

Une analyse de champ couplé est une analyse qui tient compte de l'interaction entre deux champs ou plus de technologie .il ya plusieurs manières de faire ceci.

4.3.1 Analyse directe

L'analyse directe du champ couplé exige l'utilisation d'un élément qui contient tous les degrés de liberté nécessaires et les résoudre au mêmes temps pour chaque pas de temps. Le couplage est manipulé en calculant les vecteurs de charges des éléments qui contiennent toutes les conditions aux limites nécessaires. Le transfert de charges entre les environnements thermiques et structuraux se produit intérieurement dans le solutionneur.

4.3.2 Analyse indirecte (séquentielles)

Le couplage indirect emploie une méthode séquentielle par laquelle la solution thermique est obtenue puis employé comme une charge pour l'analyse structurale ; les deux solutions doivent être exécutées pour chaque pas de temps. Ceci exige l'utilisation des éléments thermiques et structuraux, bien que la maille soit employée pour les deux. Les charges doivent être transféré entres les environnements thermiques et structuraux extérieurement à partir du solutionneur.

4.4 Analyse thermique

Une analyse thermique calcule la distribution de la température et les quantités thermiques reliées dans un système ou un composant (Zienkiewicz, 1972), (Trinth 1984), les quantités thermiques typiques d'intérêts sont :

- Les distributions des températures
- La quantité de chaleur gagnée ou perdue
- Gradient thermique
- Flux thermique

Les simulations thermiques jouent un rôle important dans la conception de beaucoup d'application de technologie, comme les barrages, dans beaucoup de cas les ingénieurs suivent une analyse thermique avec une analyse des contraintes, pour calculer les contraintes thermiques (c'est -à -dire les contraintes provoquées par des dilatations ou des contractions thermiques sur le barrage à masque réalisée en béton ou bien en béton bitumineux).

4.4.1 Analyse thermique stationnaire

Une analyse thermique stationnaire calcule les effets de charges thermiques sur un système ou un composant.les ingénieurs et analystes exécute souvent une analyse stationnaire

avant de passer à l'analyse transitoire, pour aider à établir des conditions initiales. Une analyse stationnaire peut également être la dernière étape d'une analyse thermique transitoire, exécuté après tous les effets transitoire aient diminués.

On peut employer ; thermique stationnaire pour déterminer les températures, les gradients thermiques, les flux de la chaleur etc. dans un objet qui sont provoquées par les charges thermiques qui ne changent pas dans le temps.

Une analyse thermique stationnaire peut être linéaire, avec les propriétés constantes du matériau ; ou non linéaire, avec les propriétés du matériau qui dépendent de la température. Les propriétés thermiques de la pluparts des matériaux changent avec la température, ainsi en réalités on confronté a une analyse non- linéaire.

4.4.2 Analyse thermique transitoire (utilisé dans notre travail)

L'analyse thermique transitoire détermine les températures et d'autres quantités thermiques qui changent avec le temps, En générale les ingénieurs utilisent les températures calculées dans l'analyse thermique transitoire comme entrée dans l'analyse structurale pour évaluation des contraintes thermiques.

Une analyse thermique transitoire suit fondamentalement les mêmes procédures qu'une analyse thermique stationnaire. La différence principale et que la plupart des charges appliquées dans une analyse transitoire sont en fonction du temps

La base pour l'analyse transitoire dans ANSYS est une équation d'équilibre thermique obtenue à partir du principe de la conservation de l'énergie (Wilson, Bath, 1974). La solution par élément finis utilisée dans ANSYS calcule les températures nodales, et emploie des températures pour obtenir d'autres quantités thermiques.

$$\nabla \cdot (K(t) \cdot \vec{\Delta}(T)) + g(x, y, t) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(t) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(t) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + g(x, y, t) \quad (4.2)$$

Où c : chaleur spécifique

K : conductivité thermique

ρ : Masse volumique.

La résolution de cette équation différentielle sur un domaine Ω est gouvernée par les conditions aux limites sur la frontière Γ du domaine.

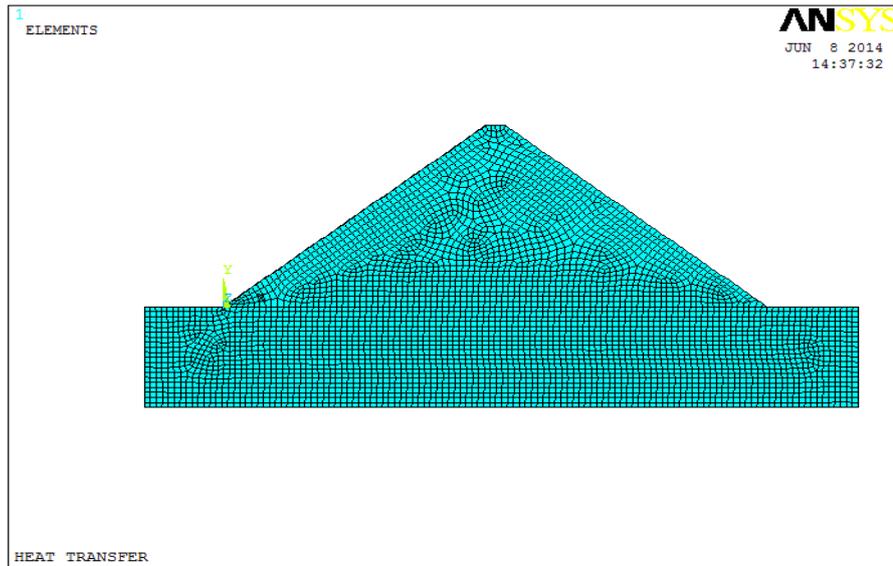


Figure 4.5 : représente l'élément discrétisée en sous domaines Ω , c'est l'étape du maillage dans ANSYS (méthode des éléments finis).

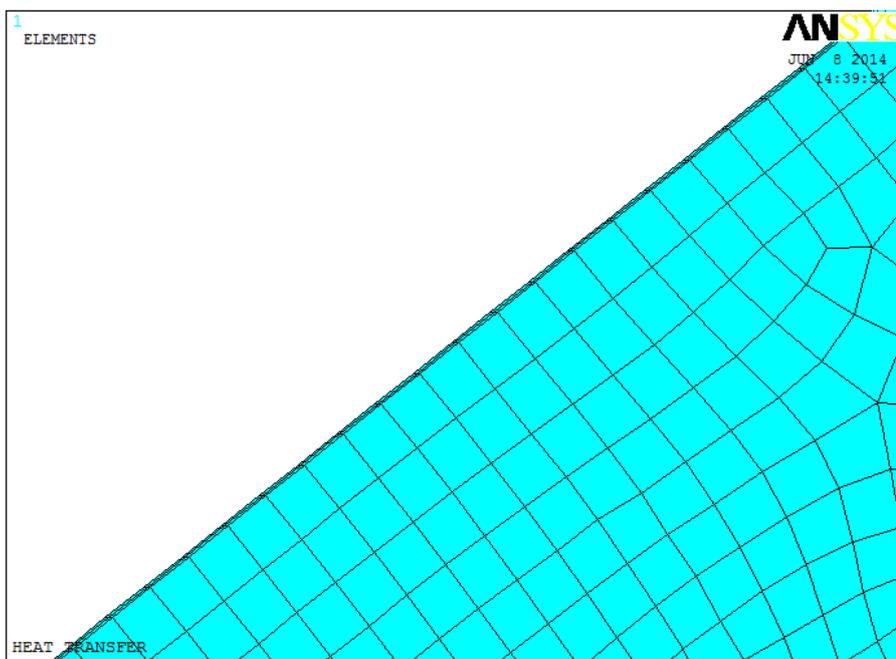


Figure 4.6 : coupe sur l'élément discrétisé en sous domaine

4.4.3 Les éléments thermiques bidimensionnels utilisés dans ANSYS

Les programmes d'ANSYS et d'ANSYS /Thermal incluent environ 40 éléments thermiques (voir ci-dessous les éléments solides à deux dimensions) pour nous aider à exécuter des analyses thermiques.

Tous les éléments s'appliquent aux analyses thermiques stationnaires et non stationnaires.

Les notes d'utilisation pour chaque élément indiquent si d'autres types d'analyses peuvent également employer l'élément.

4.4.3.1 Eléments solides à deux dimensions

PLANE35



Dimension : 2-D

Forme et caractéristiques : Triangle, Six nœuds

Degrés de liberté : Température (dans chaque nœuds)

PLANE55 (utilisé dans notre cas)



Dimension : 2D

Forme et caractéristique : Quadrilatéral, quatre nœuds

Degrés de liberté : Température (dans chaque nœud)

PLANE75



Dimension : 2D

Forme et caractéristique : Harmonique, quatre nœuds

Degrés de liberté : Température (dans chaque nœud)

PLANE77



Dimensions : 2-D

Formes et caractéristiques : Quadrilatéral, huit nœuds

Degrés de libertés : Température (dans chaque nœuds)

Notes d'usage : Utile pour la modélisation des formes courbées

PLANE78



Dimension : 2-D

Formes et caractéristique : Harmonique, huit nœuds

Degrés de liberté : Température (dans chaque nœuds)

4.4.3.2 Eléments solides à trois dimensions

SOLID 70



Dimension : 3-D

Forme et caractéristiques : Brique, huit nœuds

Degrés de libertés : Température (dans chaque nœud)

Note d'usage: can compensate for mass transport heat flow from a constant velocity field

SOLID 90



Dimensions : 3-D

Forme et caractéristiques : Brique ,20 nœuds

Degrees of freedom: Temperature (at each node)

Usage notes: Useful for modeling curved boundaries

SOLID87



Dimensions : 3-D

Forme et caractéristique : Tétraèdre, 10 nœuds

Degrés de libertés : Température (dans chaque nœuds)

Note d'usage : Utile pour le maillage des formes irrégulières

4.4.4 Méthode de résolution

4.4.4.1 Spécification de l'option pour l'incrémentation des charges dans ANSYS

Pour l'analyse thermique on peut spécifier les options suivantes.

4.4.4.1.1 Option générale

Les options générales incluent ce qui suit :

Contrôle de la solution

On doit spécifier le nombre d'incrément de charges (**NSUBST**) ou la taille du pas de temps (**DELTIM**), et le temps à la fin de l'incrément de (charge) (**TIME**). Le reste des commandes de la solution se transfèrent alors à leurs valeurs optimales pour le problème thermique particulier.

L'option de temps

Cette option indique le temps a la fin de l'étape d'un incrément de charge.

La valeur du pas de temps par défaut est de 1,0 pour le premier incrément de charge. Pour les incréments suivants on prend 1,0 par défaut plus le temps spécifié à l'étape précédentes.

Le nombre de sous incréments (substeps) par incrément de charge (loadstep), ou la taille du pas de temps (time steps).

Une analyse non-linéaire exige des multiples sous incréments (multiple substeps) dans chaque incrément de charge (load steps). Par défaut, le programme emploie un sous incrément (one substep) par incrément de charge (load step).

Charge par échelle ou rampant

Si on applique les charges par échelle, les sous incréments de charges restes constant pour tout l'incrément de charge.

Si on applique la charge par rampant (utilisé par défaut dans ANSYS), les sous incrément varient linéairement à chaque incrément de charge.

4.4.4.1.2 Options non-linéaires

On indique les incréments de charge non-linéaire si les non-linéarités sont présentes .Les Options non-linéaires incluent les étapes suivantes :

a) Nombre d'itérations d'équilibre

Cette option indique le nombre maximal d'itération d'équilibre permis par sous incrément (substep).La valeur utilisée par défaut dans ANSYS est de 25 qui devrait être assez pour la plupart des analyses thermiques non-linéaires.

b) Incrément automatique du pas de temps

Pour des problèmes non-linéaires, l'incrément automatique des pas de temps détermine la quantité d'incrément de charge entre les substeps, pour maintenir la stabilité et l'exactitude de la solution.

c) Critère de convergence

ANSYS considère qu'une solution non-linéaire est convergée lorsque les critères de convergences indiquées sont satisfaits. La vérification de la convergence peut être basée sur les températures, le taux de chaleur écoulé, ou tous les deux .Par exemple, si on indique 500 comme valeur typique de la température et 0,001 comme tolérance, le critère de convergence pour la température est de 0,5degrés.

Pour les températures, ANSYS compare le changement de température.

L'arrêt de la solution en cas de non convergence

Si ANSYS ne peut pas converger la solution dans le nombre d'itérations d'équilibre indiquées, ANSYS arrête la solution ou passe à l'incrément de charge suivant, selon ce qu'on a indiqué comme critères d'arrêt.

Line search

Cette option permet à ANSYS d'exécuter une recherche (line search) avec la méthode de Newton-Raphson.

Option de prédiction /correction

Cette option active l'option de prédiction /correction pour la solution du degré de liberté à la première itération d'équilibre de chaque incrément.

Traquer la convergence Graphiquement

Pendant qu'une analyse thermique non-linéaire procède, ANSYS calcule les normes de convergence avec des critères correspondants de convergence pour chaque itération d'équilibre.

La solution graphique pour traquer la convergence (Graphical solution Traking) montre les normes et les critères de convergence calculée pendant que la solution et dans le processus.

Les options d'analyse

Les options d'analyse possible dans ANSYS incluent :

L'option de Newton-Raphson

Elle est utilisée seulement dans des analyses non-linéaires (Zienkiewicz, 1972). Cette option indique combien de fois la matrice tangente est mise à jour pendant la solution .On peut choisir parmi les options suivante :

- Program-chosen (par défaut : recommandé pour l'analyse thermique)
- Full (non modifié)
- Conductivité initiale

Note : pour l'analyse thermique non-linéaire de champs simple, ANSYS emploiera toujours l'algorithme de Newton-Raphson non modifié.

Choix du solutionneur (Solver)

On peut utiliser n'importe laquelle des méthodes suivante ;

- Frontal solver(default)
- Jacobi conjugate Gradient (JCG) solver
- JCGout-of-memory solver
- Incomplete Cholesky conjugate Gradient (ICCG) solver
- Preconditioned conjugate Gradient solver (PCG)

- PCG out-of-memory solver
- Iterative (automatic solver selection option).

4.4.5 Conditions aux limites thermiques

Des températures de (+35°C,+45°C,+55°C) ont été appliquées par conduction a la surface du masque du barrage (en béton bitumineux), avec un coefficient d'échange de 30w/m².°C à 28°C avec le milieu environnant, la temepature initiale du barrage est à 20°C.

La température est obtenue par l'intermédiaire de la technique des éléments finis de Galerkin est mise en application par le logiciel ANSYS.

Les incrément du temps utilisés dans notre analyse

Nombre d'incrément de charges : (LOAD STEP)= 6

Taille de l'incrément de charges (SUBSTEP)=2heur = 7200 s

Taille du pas de temps (TIME STEP)= 60s

Temps totale d'anlyse: (TIME) =12 h= 43 200s

4.4.5.1Evaluation empirique de la température surfacique de l'enrobé

Le changment de la temperature de l'aire (Ta), affecte la viscosité de la surface de l'enrobé bitumineux. L'équation empiriaque suivante donnée par(GeorgeK,pand Hussain, 1986) ,éstime l'évolution de la température surfacique (Ts) de l'enrobé en fonction de la température ambiante de l'aire .

$$T_s = T_{air} \left(1 + \frac{76,2}{h_1+304,8} \right) - \frac{84,7}{h_1+304,8} + 3,3 \quad (4.3)$$

T_s : température sur la surface de l'enrobé;

T_{air} : température de l'air;

h_1 : épaisseur de la couche btumineuse.

Le tableau (4.3) suivant illustre les resultats des températures maximales atteintes sur la surface de la couche du bitume h1 de 10cm en utilisant l'equation (4.3).

Tableau 4.3 : Evaluation des températures à la surface du masque

T_{air}	29°C	37°C	45°C
T_s	35°C	45°C	55°C

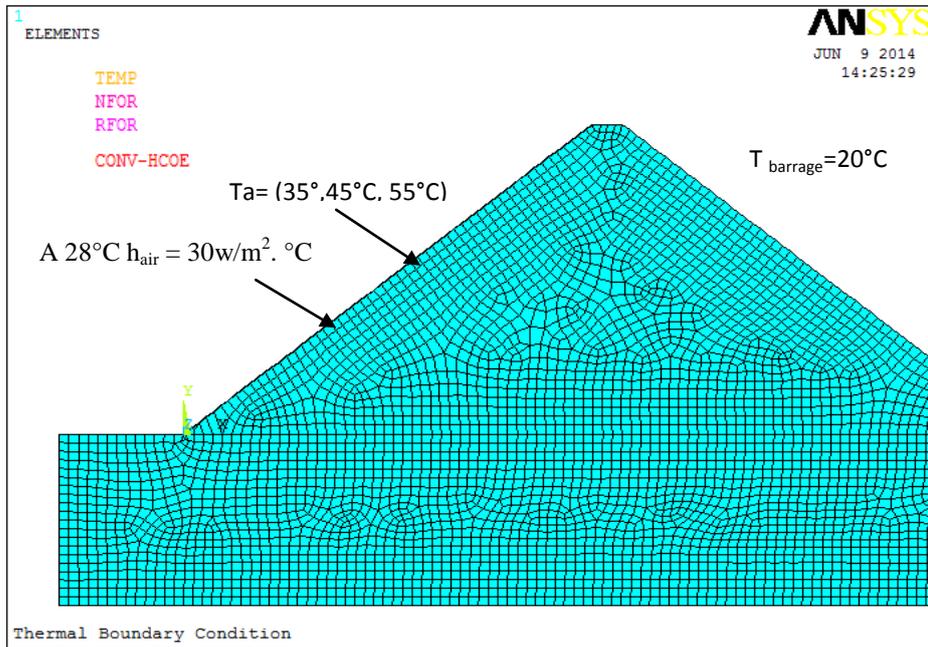


Figure 4.7 : conditions aux limites thermiques.

4.4.5.1.2 Conductivités thermiques

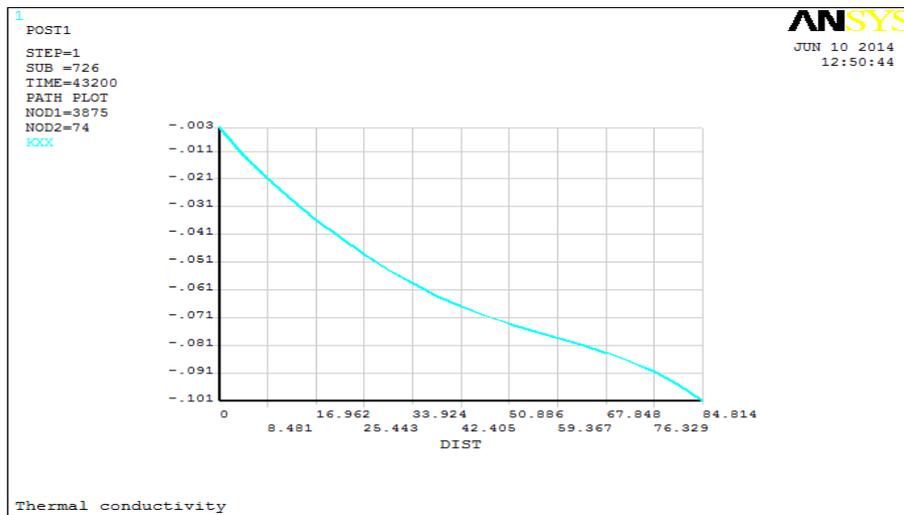


Figure 4.8 : conductivité thermique varie avec la température à (35°C, 45°C)

La conductivité thermique dans le barrage utilisé est fonction de la température est illustrée dans la figure (4.8)

La figure (4.8) montre l'évolution de la conductivité thermique du bitume utilisé est fonction de la température.

La figure (4.9) représente la géométrie du gradient de la température à l'intérieure de la couche bitumineuse a une température imposé de 35°C

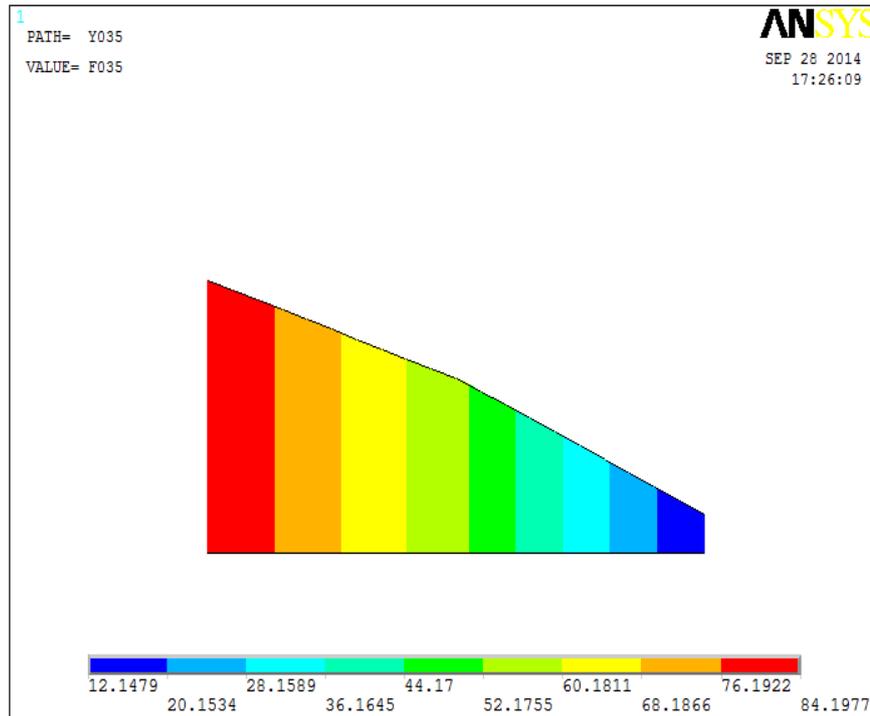


Figure 4.9 : Géométrie du gradient thermique a 35°C

4.4.5.2 profilées des Températures dans les différentes couches :

La figure (4.10, 4.11, 4.12) illustrent les profilées de l'évolution des températures a T= 35°C en fonction du temps.

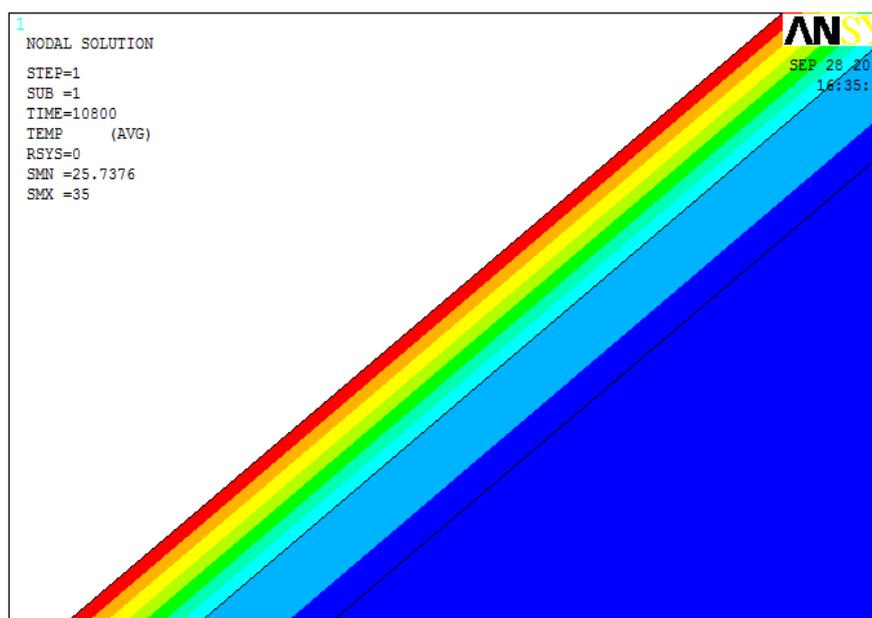


Figure 4.10 : Profilé des températures a T=35°C, t= 3h

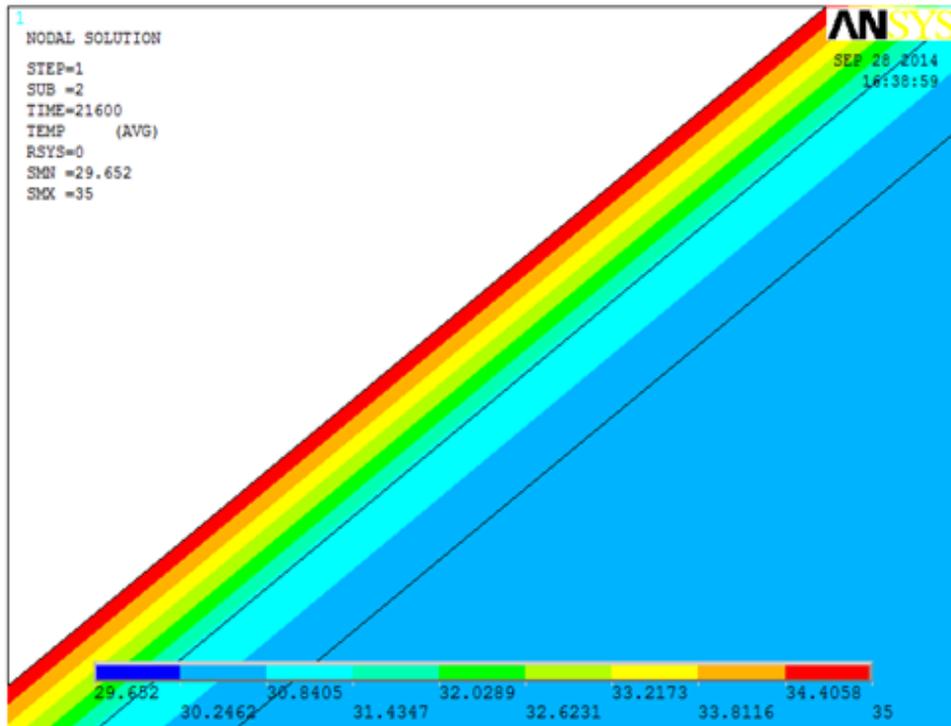


Figure 4.11 : profilé des températures à T= 6h

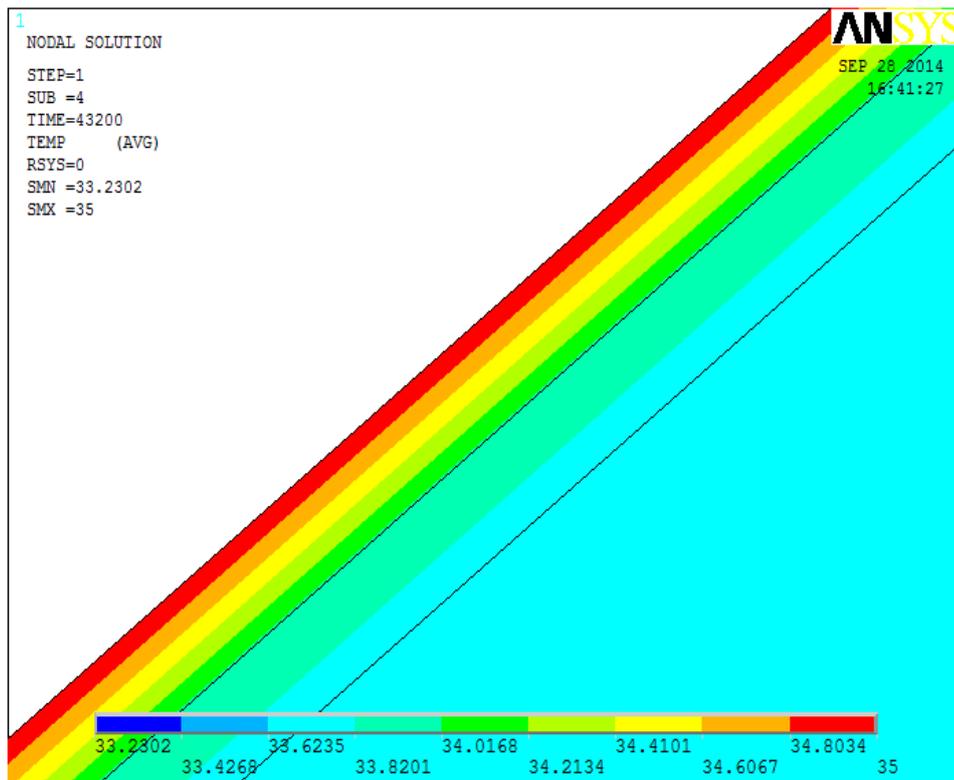


Figure 4.12 : profilé des températures à T= 12h

La température imposée à la surface du masque du barrage est de 35°C. $T_{\text{Initiale du barrage}} = 20^{\circ}\text{C}$

On constate qu'a, t=3h $T_{\text{Barrage}} = 25^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{masque}} = 33^{\circ}\text{C}$;

On constate qu'a, t=6h $T_{\text{Barrage}} = 28^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{masque}} = 34^{\circ}\text{C}$;

On constate qu'à $t=12h$ $T_{\text{Barrage}} = 33^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{masque}} = 34,80^{\circ}\text{C}$;

On peut voir que le maximum des températures est atteint dans à la surface de la couche bitumineuse.

La figure (4.13) présente l'évolution de la température en fonction du temps dans deux nœuds différents.

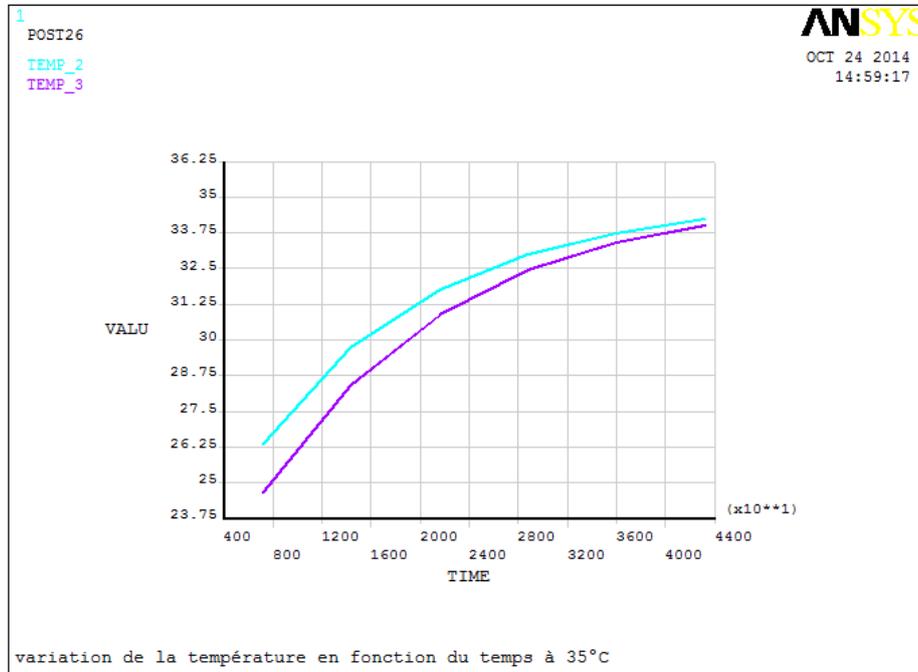


Figure4.13 : évolution de la température dans deux nœuds en fonction du temps à

La figure (4.14) illustre la géométrie des températures à $T= 35^{\circ}\text{C}$

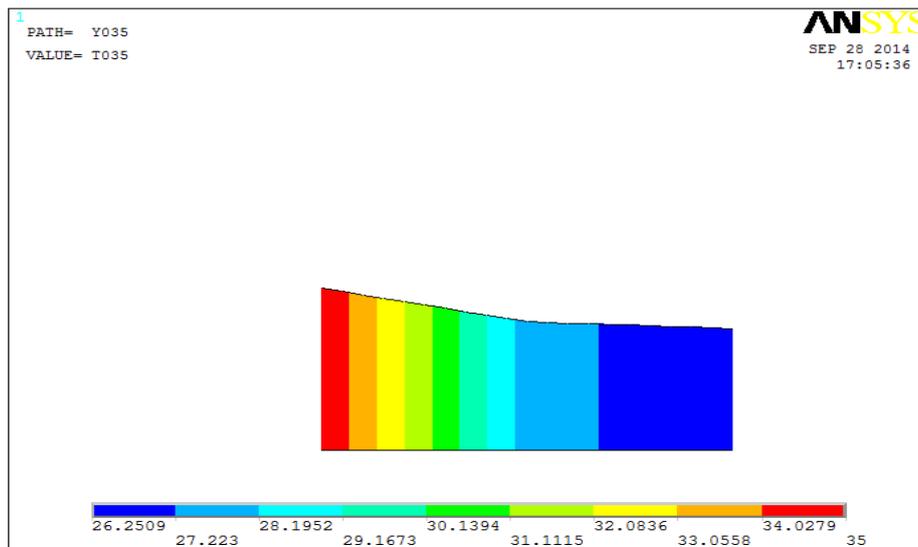


Figure4.14 : Géométrie de la distribution de température à travers les différentes couches à 35°C .

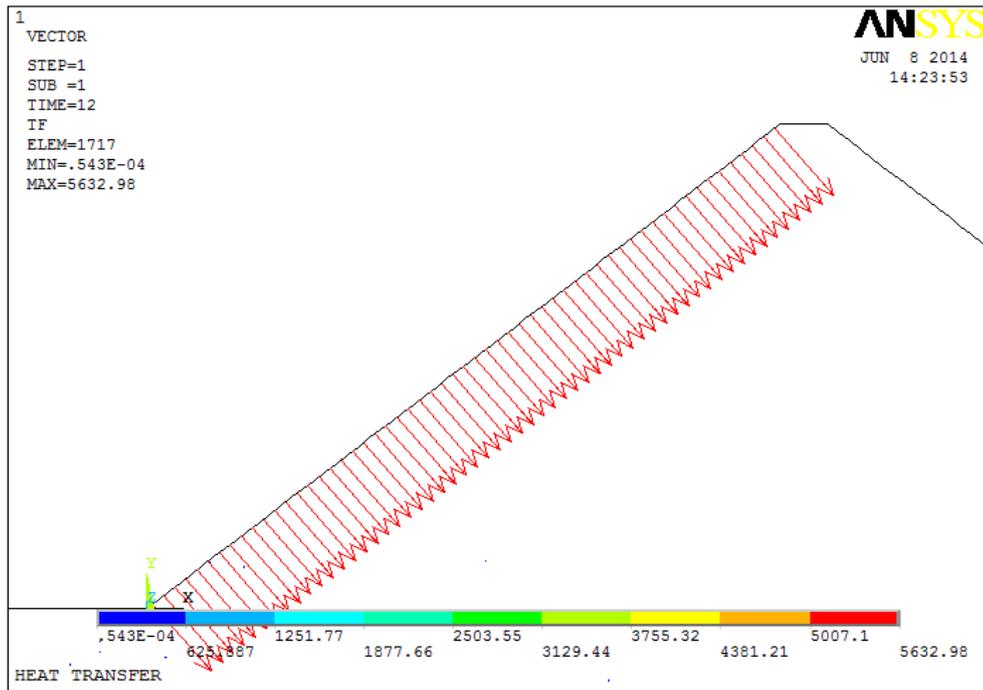


Figure 4.15 : Le flux thermique

D'après le sens des flèches sur la figure (4.15), le flux traverse les parois et se déplace des zones les plus chaudes vers les plus froides.

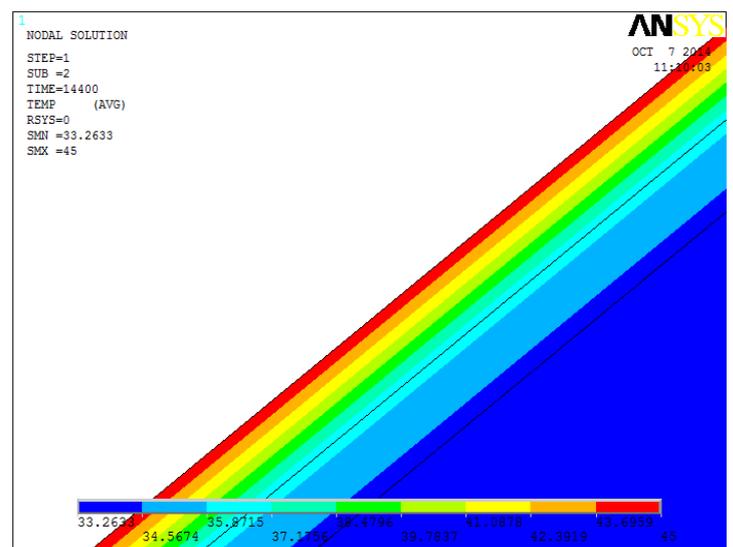
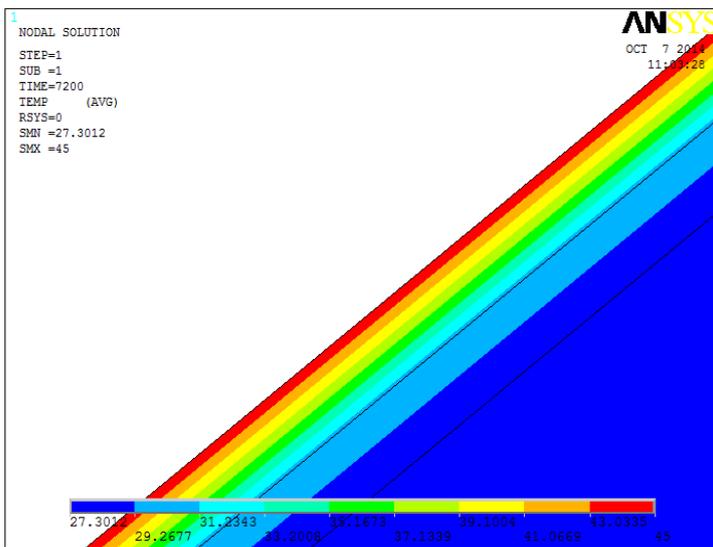
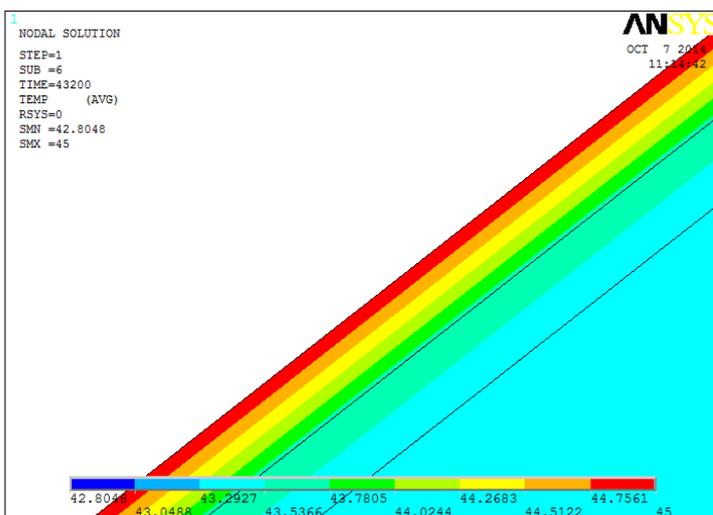


Figure 4.16 : profilé de température à 45°C (à t=2h, t=4h, t=12h)



On constate que les températures à l'intérieur des couches augmentent dans le temps (la conduction à l'intérieur de la couche)

- A t=2h, la température extérieur est de 45°C a la surface et la température intérieur est de 27°C
- A t=4h, la température extérieur est de 45°C a la surface et la température intérieur est de 33°C
- A t=12h, la température extérieur est de 45°C a la surface et la température intérieur est de 42°C

On déduit qu'il ya un échange de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur du barrage, d'ou l'existence d'un gradient thermique.

4.4.6 Variation de la température à travers le masque du barrage

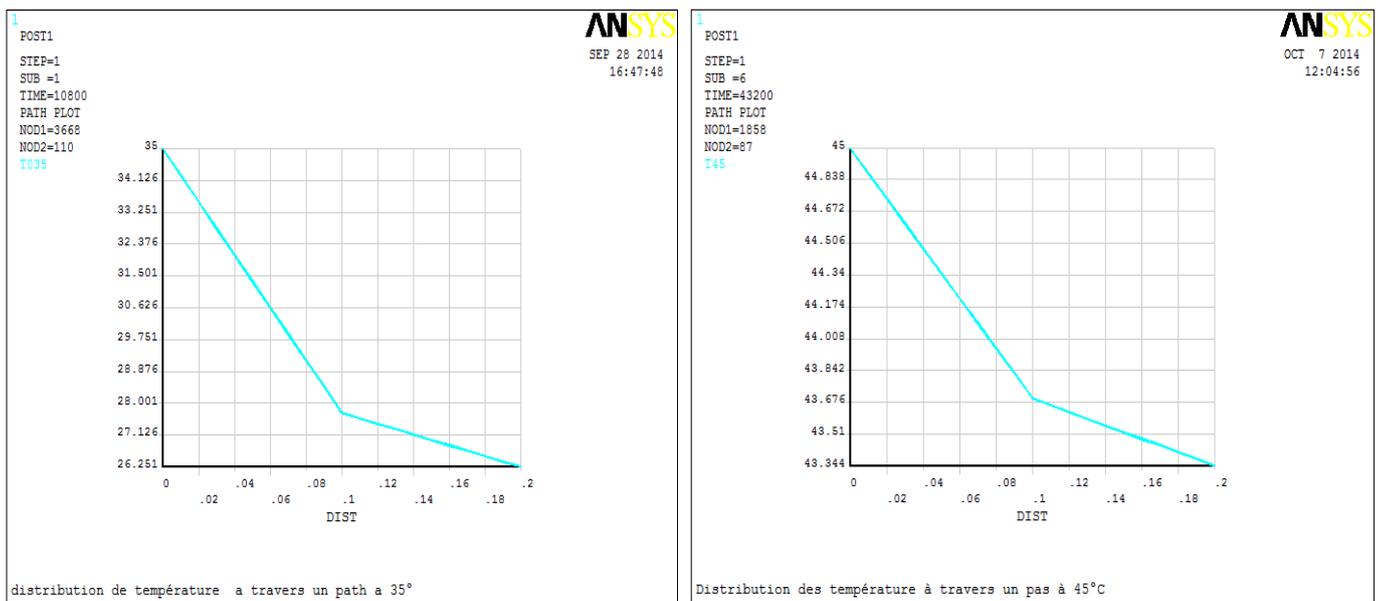


Figure 4. 17 : variation de température au long d'un pas à 35°C et 45°C.

Les variations de températures à travers la couche du béton bitumineux vers le massif du barrage et la surface extérieur est linéaire, ce phénomène peut être attribué a l'indépendance de la température a la conductivité thermique du béton bitumineux (conductivité constante).

4.4.7 Transfert thermique et expansion/contraction

La distribution de la température est basé selon le principe de la conservation d'énergie le procédé de transfert thermique est régie par la loi de fourrier comme suit :

$$\text{div}[K. \text{grad}(T)] + \dot{Q}(t) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.4)$$

Où

K : est la conductivité thermique du matériau (bitume) ;

T : la température du bitume ;

ρ : La densité volumique du bitume ;

\dot{Q} : La source de chaleur du bitume.

On considère qu'aucune source de chaleur n'existe dans le bitume durcit, (paramètre ignoré).

La relation entre la variation de la température et la déformation mécanique associée (c.-à-d. déformation thermique, peut être exprimé comme suit :

$$\varepsilon_{thermal} = \alpha \cdot \Delta T$$

$\varepsilon_{thermal}$ Est la déformation thermique, α est le coefficient d'expansion thermique ($1/^\circ\text{C}$), et ΔT est le gradient thermique ($^\circ\text{C}$)

Les contraintes thermiques correspondant peuvent être obtenues à partir du modèle élaboré, qui caractérise une relation contrainte-déformation. La simulation du transfert thermique et des contraintes thermique associées peuvent être effectuées en utilisant le (transient thermal-stress analysis), qui est disponible dans les codes commerciaux par éléments finis les plus existant, y compris ANSYS.

4.5 Analyse structurale

Le changement de l'analyse thermique à l'analyse structurale est facilement réalisé dans ANSYS car le commutateur d'élément est automatique. Élément thermique de type Plane 55 vers l'élément structural de type plane 42.

Les températures à partir de l'analyse thermique précédente sont maintenant appliquées comme une charge pour déterminer les contraintes et les déformations thermiques. L'élément est défini par quatre nœuds ayant deux degrés de liberté à chaque nœuds : translation dans les directions nodales de x et de y. La géométrie, position des nœuds et le système de coordonnées de cet élément son montrés dans la figure de l'élément choisi

La relation entre la variation de la température et la contrainte mécanique associée (c'est-à-dire contrainte thermique) peut être exprimée comme suit :

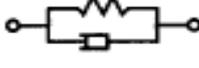
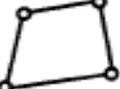
$$\varepsilon_{thermal} = \alpha \cdot \Delta T \tag{4.5}$$

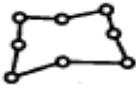
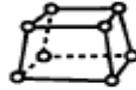
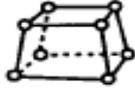
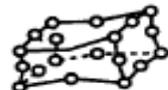
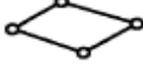
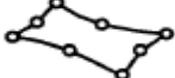
Où $\varepsilon_{thermal}$ est la déformation thermique, α est le coefficient d'expansion thermique ($1/^\circ\text{C}$), et ΔT est le gradient thermique ($^\circ\text{C}$).

Les contraintes thermiques correspondantes peuvent être obtenues à partir du modèle constitutif élaboré qui caractérise une relation, dans cette étude nous allons juste prendre les déformations provoquées par le procédé du transfert thermique.

4.5.1 Types d'éléments structuraux utilisés dans ANSYS

Tableau 4.4 : les types d'éléments utilisés dans ANSYS

Structural Point	Structural 2-D Line	Structural 2-D Beam		
Structural Mass  MASS21 1 node 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Spar  LINK1 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY	Elastic Beam  BEAM3 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, ROTZ	Plastic Beam  BEAM23 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, ROTZ	Offset Tapered Unsymmetric Beam  BEAM54 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, ROTZ
Structural 3-D Line			Structural 3-D Beam	
Spar  LINK8 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ	Tension-Only Spar  LINK10 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ	Linear Actuator  LINK11 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ	Elastic Beam  BEAM4 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Thin Walled Plastic Beam  BEAM24 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
	Structural Pipe			
Offset Tapered Unsymmetric Beam  BEAM44 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Elastic Straight Pipe  PIPE16 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Elastic Pipe Tee  PIPE17 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Curved Pipe (Elbow)  PIPE18 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Plastic Straight Pipe  PIPE20 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
		Structural 2-D Solid		
Immersed Pipe  PIPE59 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Plastic Curved Pipe  PIPE60 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Triangular Solid  PLANE2 6 nodes 2-D space DOF: UX, UY	Axisymmetric Harmonic Struct. Solid  PLANE25 4 nodes 2-D space DOF: UX, UY, UZ	Structural Solid  PLANE42 4 nodes 2-D space DOF: UX, UY

<p>Structural Solid</p>  <p>PLANE82 8 nodes 2-D space DOF: UX, UY</p>	<p>Axisymmetric Harmonic Struct. Solid</p>  <p>PLANE83 8 nodes 2-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Structural 3-D Solid</p>  <p>SOLID45 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Layered Solid</p>  <p>SOLID46 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Anisotropic Solid</p>  <p>SOLID64 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>
<p>Reinforced Solid</p>  <p>SOLID65 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Solid with Rotations</p>  <p>SOLID72 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Solid with Rotations</p>  <p>SOLID73 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Tetrahedral Solid</p>  <p>SOLID92 10 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Structural Solid</p>  <p>SOLID95 20 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>
<p>Structural 2-D Shell</p>		<p>Structural 3-D Shell</p>		
<p>Plastic Axisymmetric Shell with Torsion</p>  <p>SHELL51 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX</p>	<p>Axisymmetric Harmonic Struct. Shell</p>  <p>SHELL61 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX</p>	<p>Shear/Twist Panel</p>  <p>SHELL28 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ or ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Membrane Shell</p>  <p>SHELL41 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Plastic Shell</p>  <p>SHELL43 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>
<p>Elastic Shell</p>  <p>SHELL63 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>16-Layer Structural Shell</p>  <p>SHELL91 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Structural Shell</p>  <p>SHELL93 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>100-Layer Structural Shell</p>  <p>SHELL99 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	

5.5.2 Conditions aux limites structurales

La base du barrage est considérées comme étant fixe : $U_x=0$, $U_y=0$, (fig 4.18)

Chargement : Températures à partir du fichier résultat obtenu dans l'analyse thermique,

Propriétés géométriques : $E = 9.510^9 \text{N/m}^2$, $\mu = 0.41$. $\alpha = 23.10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$

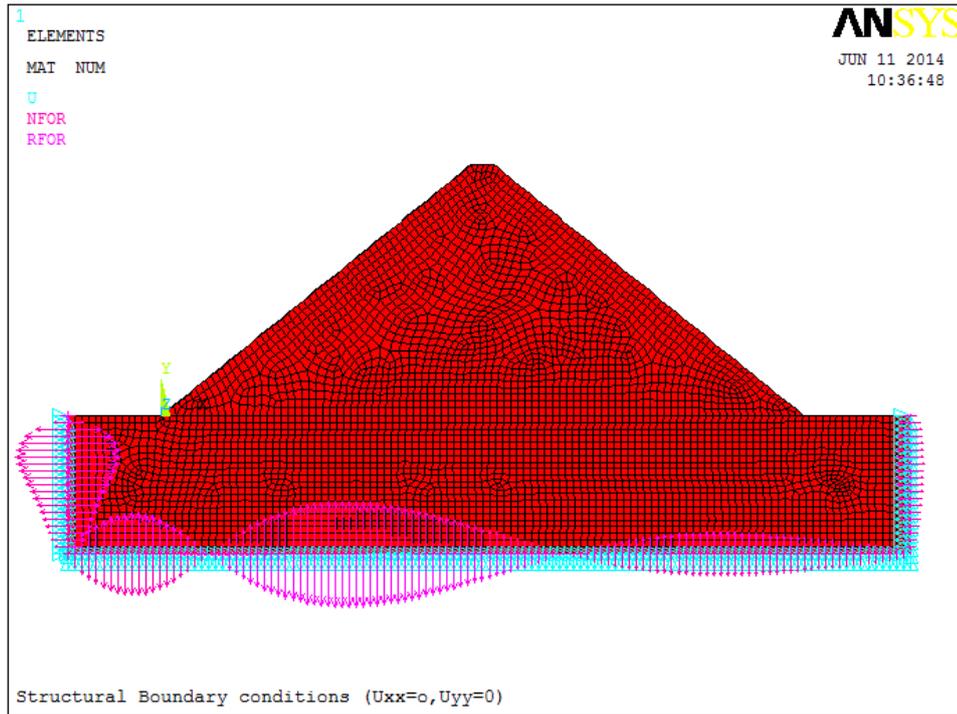


Figure 4.18 : Conditions aux limites structurales du Barrage.

4.5.3 Resultats et analyse structurale

4.5.3.1 Position déformé du barrage

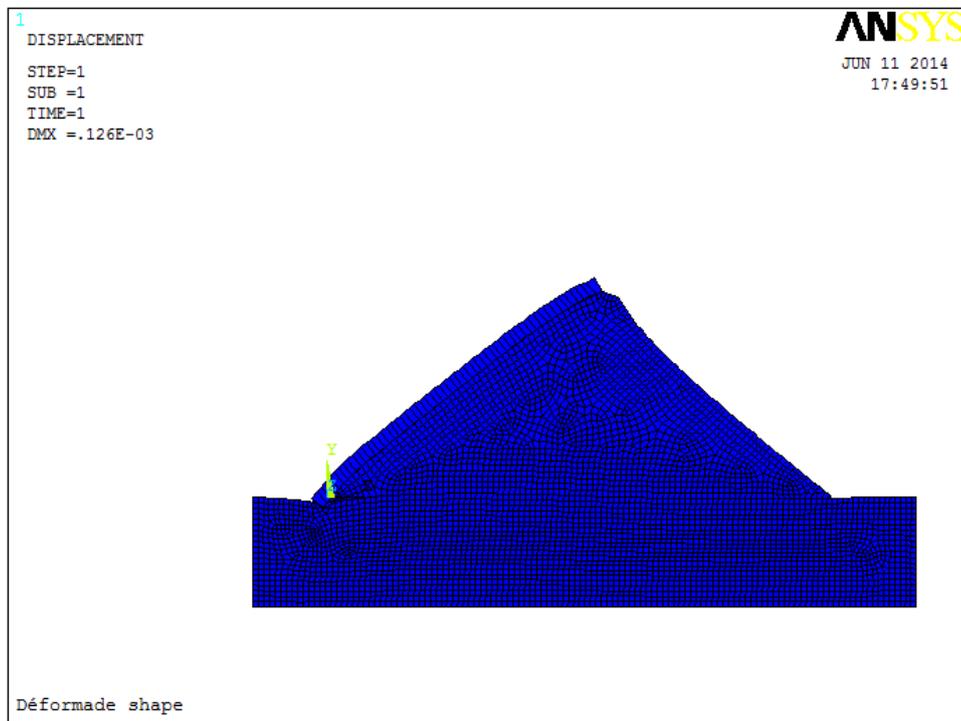


Figure 4.19 : Position de la déformé du barrage à $T=35^{\circ}\text{C}$.

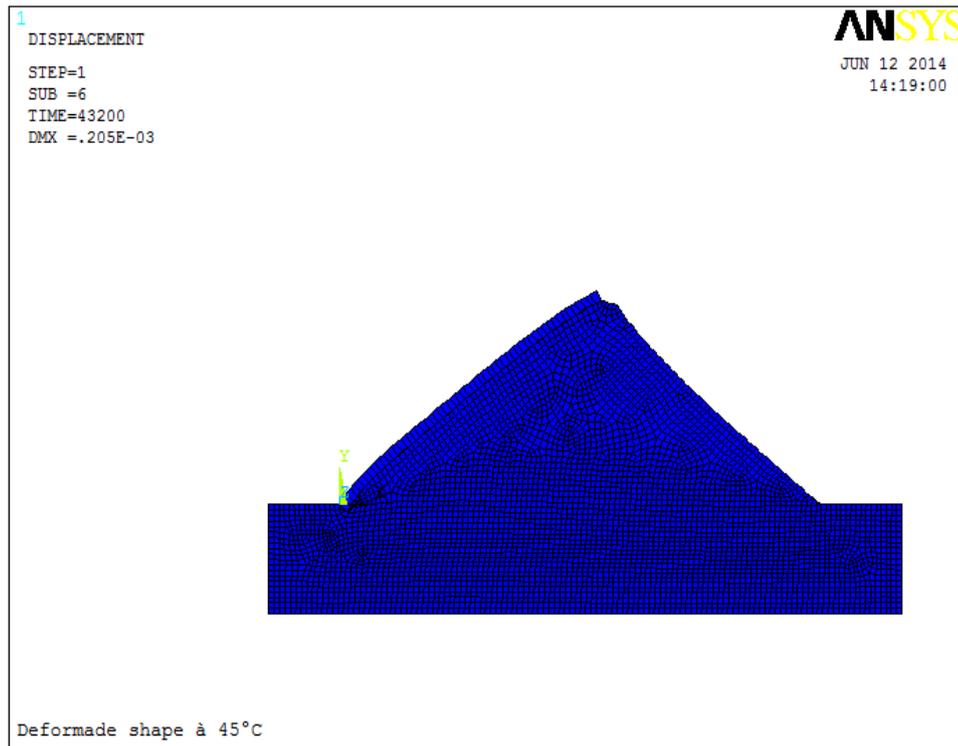


Figure 4.20 : position de la déformé du barrage à $T=45^{\circ}\text{C}$

Les figures (4.19, 4.20) illustrent la position de la déformé du barrage à une température de 45°C , la base reste inchangé étant donné qu'elle est fixe et encastres (fondation du barrage).

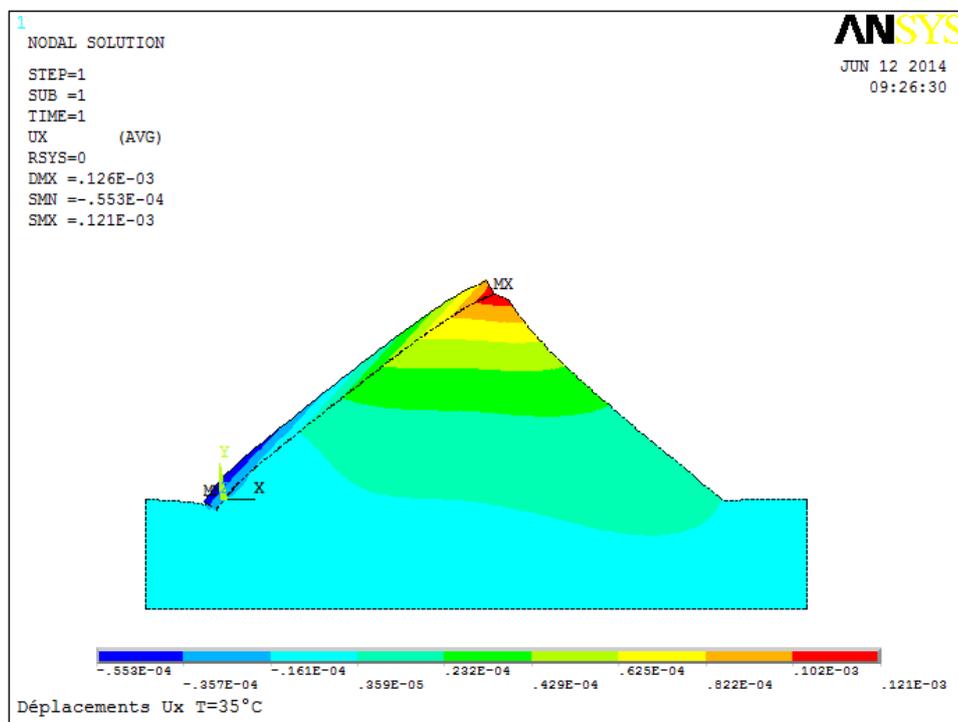


Figure 4.21 : Déplacements suivant xx à $T= 35^{\circ}\text{C}$.

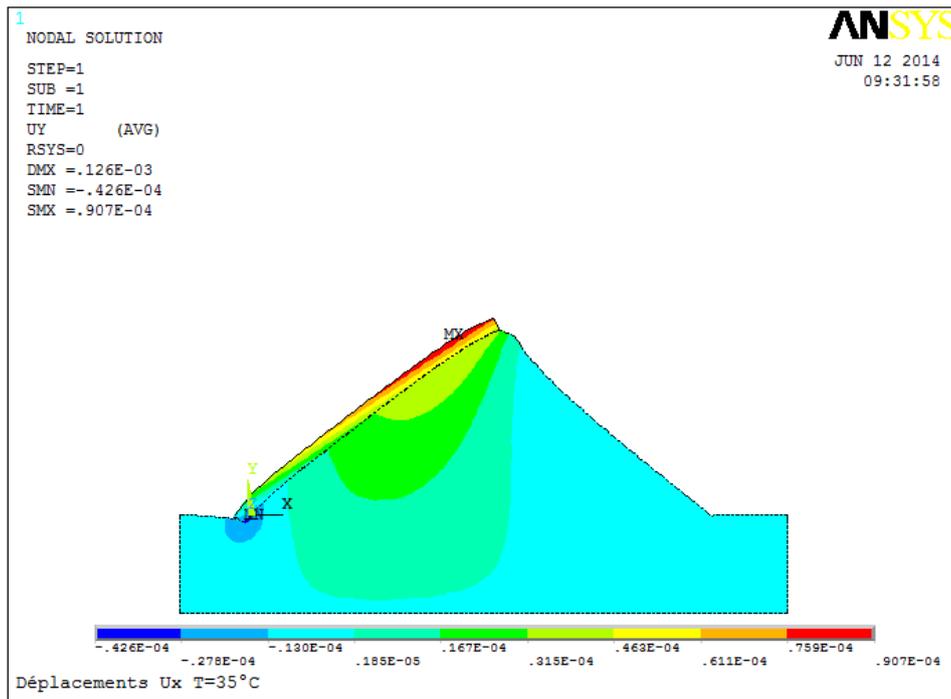


Figure 4.22 : Déplacements suivant yy à $T=35^{\circ}\text{C}$

- Les figures (4.21, 4.22) nous montrent des déformations du barrage à une température de 35°C , on constate qu'il ya des déplacements suivant (xx) et suivant (yy), les Déplacements au niveau de la base sont négligeable du moment qu'elle est considéré fixe.

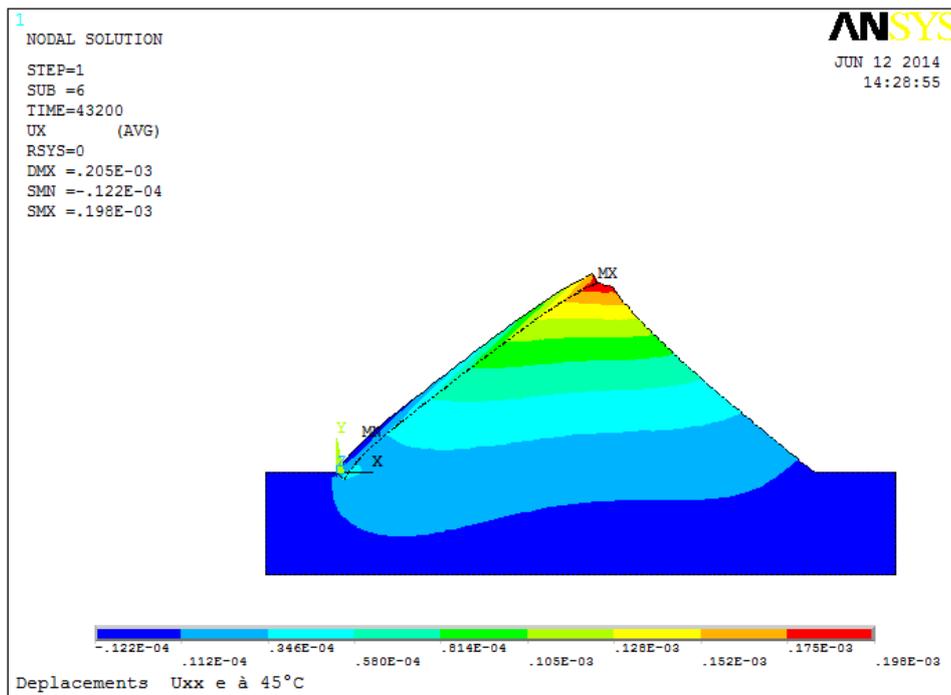


Figure 4.23 : Déplacements suivant xx à $T= 45^{\circ}\text{C}$.

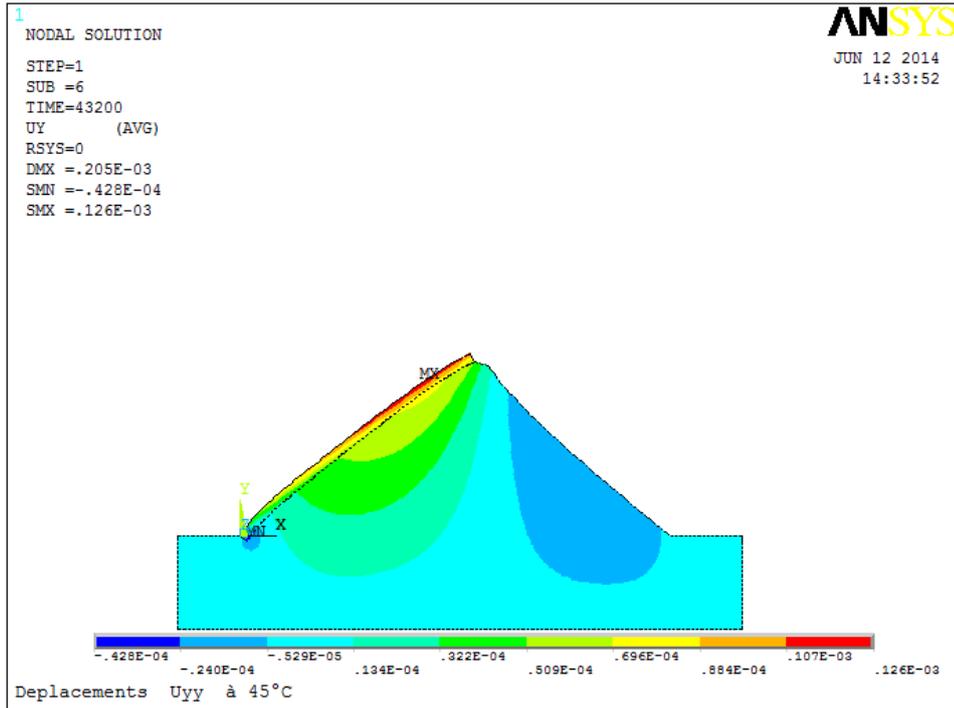


Figure 4.24 : Déplacements suivant Uyy à $T=45^{\circ}\text{C}$.

- Les figures (4.23, 4.24) représentent les déplacements suivant les deux plans (xx)-(yy) à une température égale a 45°C .

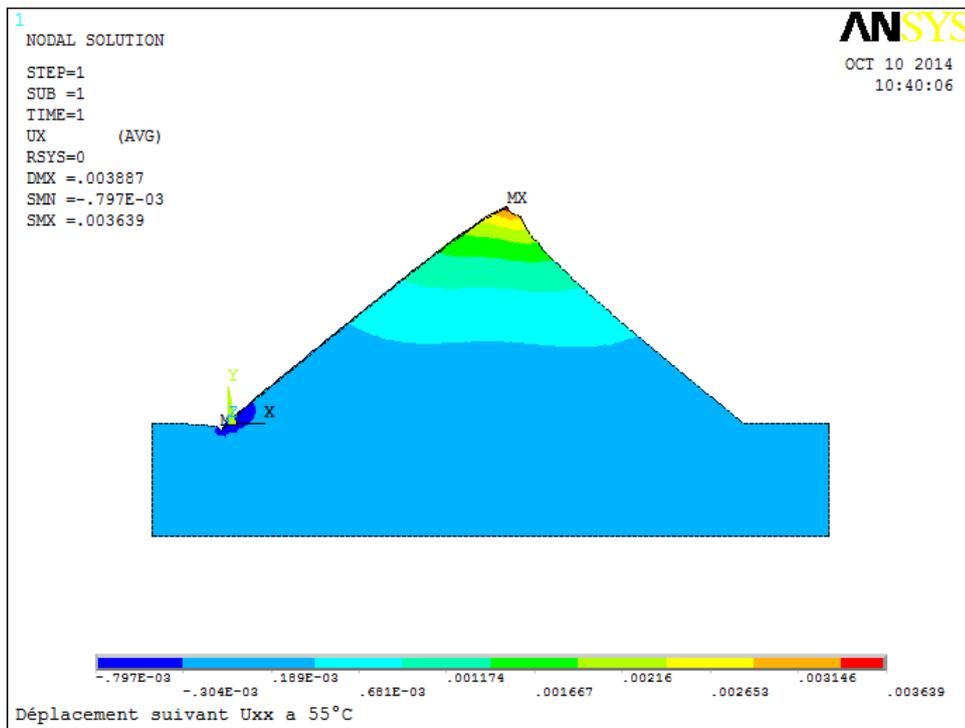


Figure 4. 25 : Déplacements suivant xx a $T=55^{\circ}\text{C}$

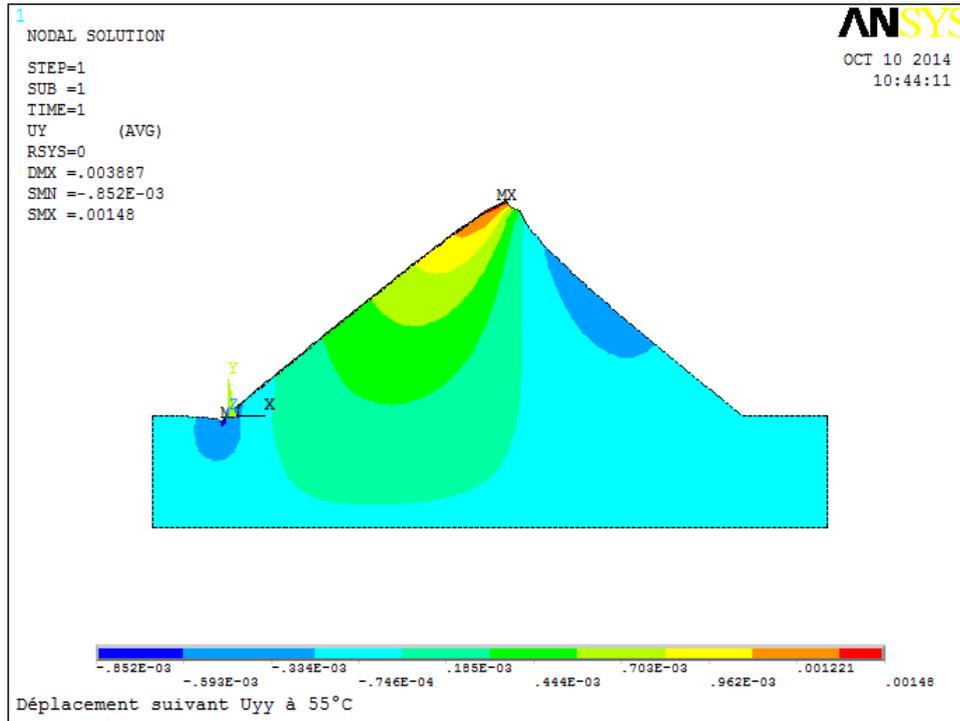


Figure 4.26 : Déplacements suivant yy a $T=55^{\circ}\text{C}$

Les figures (4.25, 4.26) nous montrent les Déplacement à une température de 55°C ,
 Les déplacements on augmentés avec l'augmentation de température.

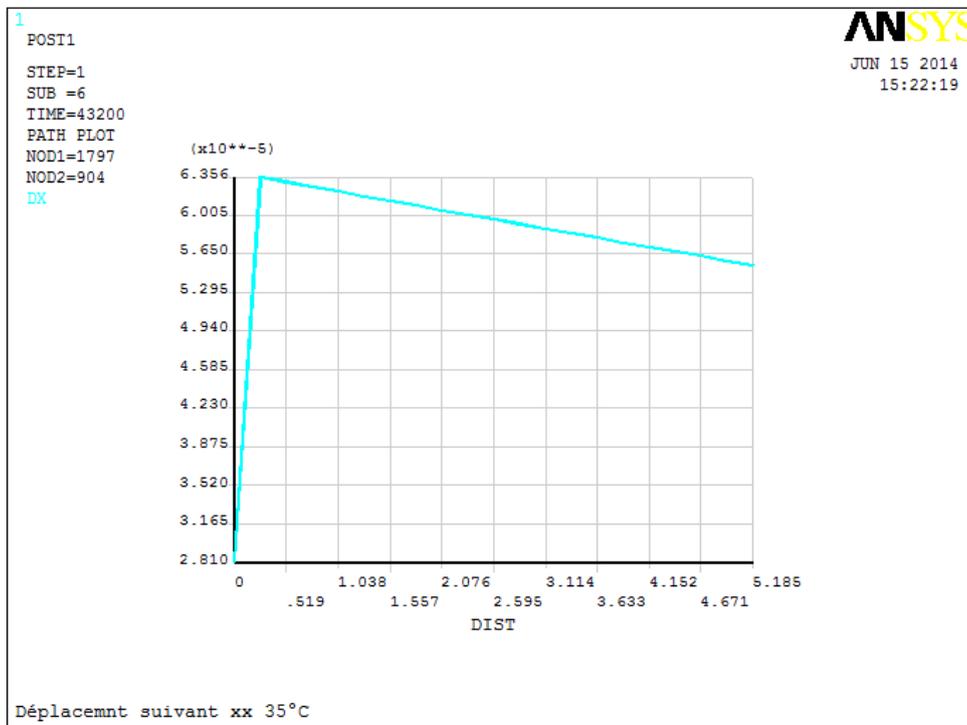


Figure 4.27 : Déplacement U_{xx} à $T=35^{\circ}\text{C}$

- La figure (4.27) : les déplacements (xx) sont linéaires sur une profondeur comprise entre [0-0.30m], il ya une croissance des déplacements a certaine profondeur du barrage puis, on observe une décroissance. Le pic atteint = 6.3510^{-5} .

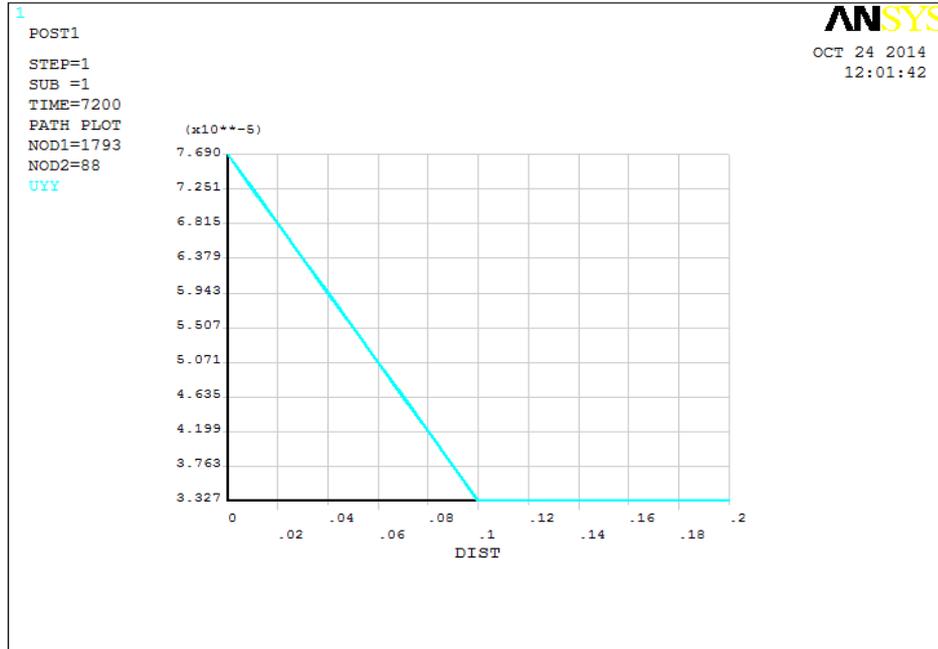


Figure 4.28 : Déplacement Uyy à T=35°C

- La figure (4.28) : les déplacements (yy) observé décroît linéairement sur une profondeur comprise entre [0-0,10], après avoir atteint un pic égale à $7.69 \cdot 10^{-5}$ m (dans la couche bitumineuse).

On déduit que les déplacements suivant (xx) et (yy) sont de l'ordre de 10^{-5} m.

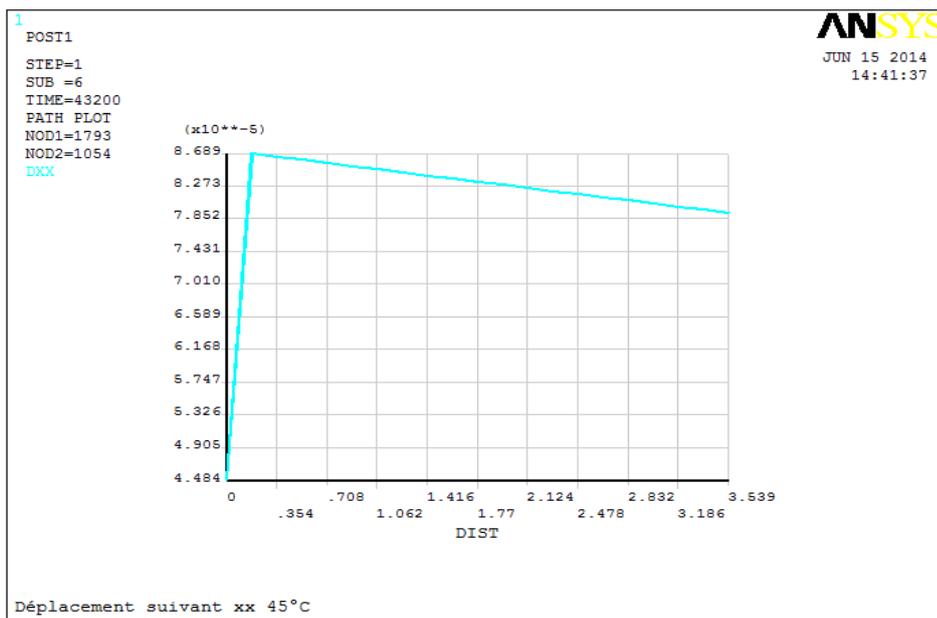


Figure 4.29 : Déplacements U xx à T=45°C

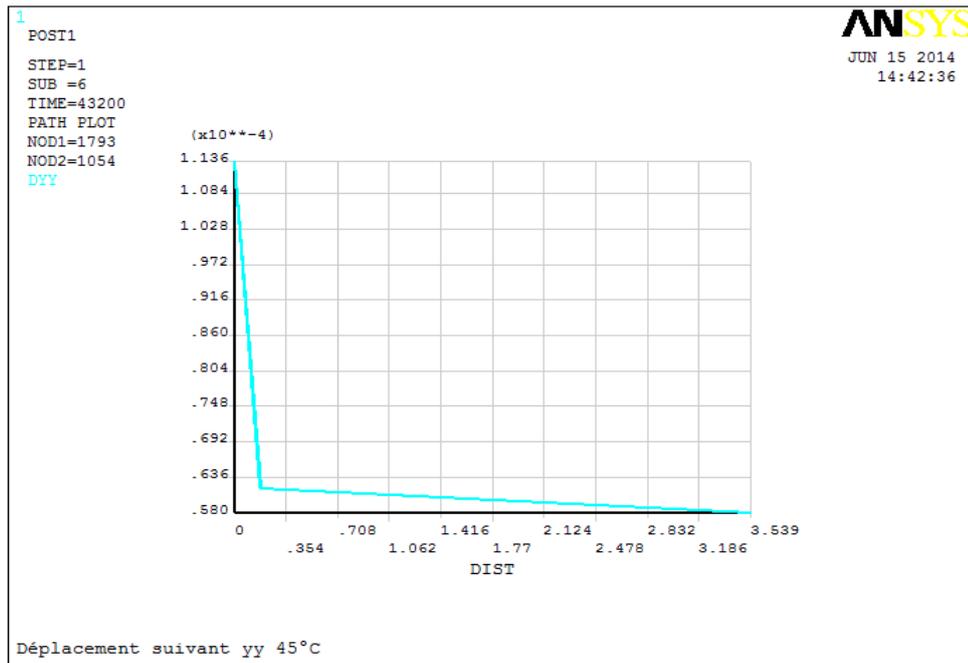


Figure 4.30 : Déplacement Uyy à T= 45°C

Les figures (4.29-4.30) représentent les déplacements suivant (xx) et (yy), à T=45°C, On remarque que les déplacements suivant (xx), elle croît de a l'intérieur de la couche bitumineuse pour atteindre un pic de $8,68 \cdot 10^{-5}$ m, et elle décroît tout au long du barrage.

Suivant (yy) les déplacements décroît linéairement dans l'intervalle [0-25]. Ils sont de l'ordre de $1.136 \cdot 10^{-4}$ m.

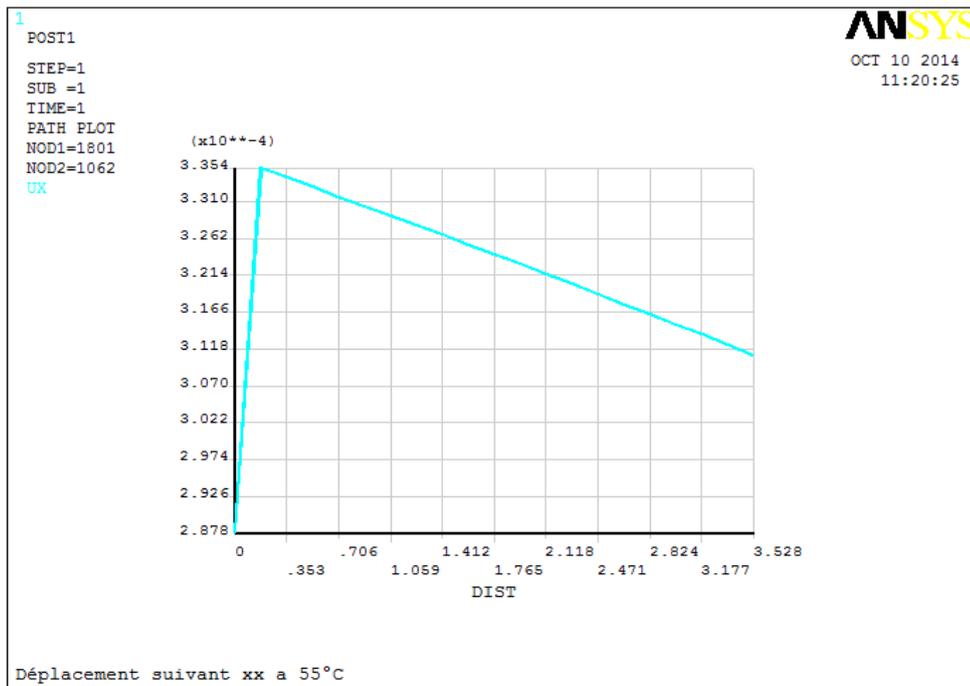


Figure 4. 31 : Déplacements suivant xx àT= 55°C

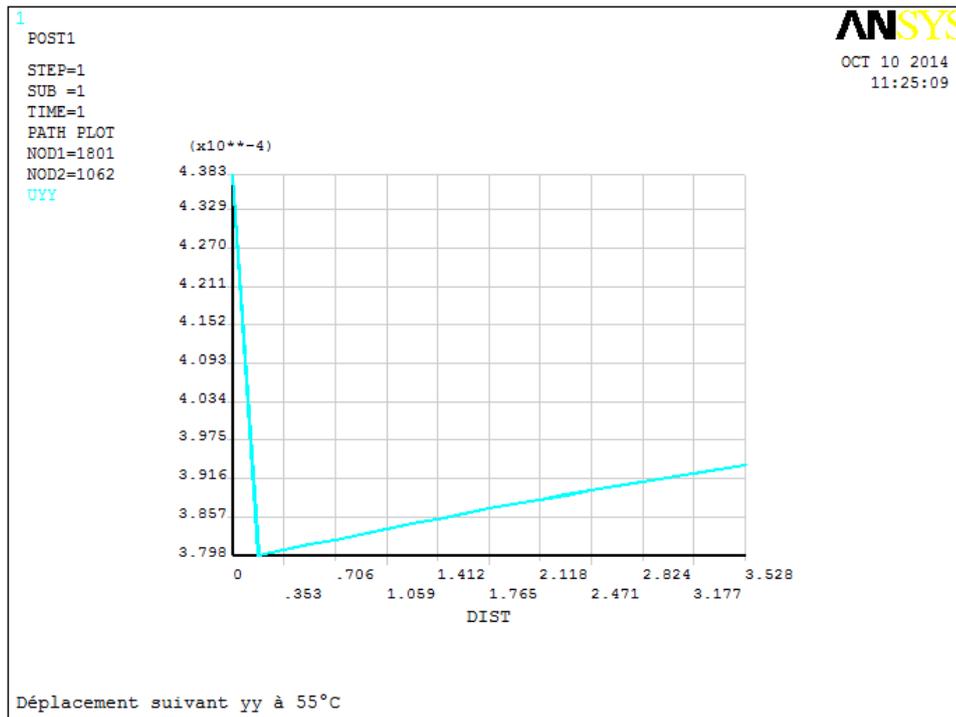


Figure 4.32 : Déplacement suivant yy à T=55°C

Les figures (4.31-4.32) illustrent : les déplacements suivant (xx) et (yy) à T=55°C

- Suivant (xx) est de l'ordre 3.3510^{-4} m
- Suivant (yy) est de l'ordre 4.3810^{-4} m

Conclusion :

Les déplacements augmentent avec l'accroissement de la température suivant (xx) ;

Suivant (yy) les déplacements décroissent.

La courbe est une asymptote, les déformations sont proportionnelles aux températures en fonction de la profondeur de la couche du bitume.

$$D_x (35^{\circ}\text{C}) = 6,36.10^{-5}\text{m} ;$$

$$D_x (45^{\circ}\text{C}) = 8,69.10^{-5}\text{m} ;$$

$$D_x (55^{\circ}\text{C}) = 3.35 10^{-4}\text{m} ;$$

Les déformations sont de l'ordre de $[10^{-5}-10^{-4}$ (m/m), considérées comme étant des déformations linéaire suivant (Charif, 1990), (Doubanah, 1995).

4.5.3.2 Résultats des contraintes

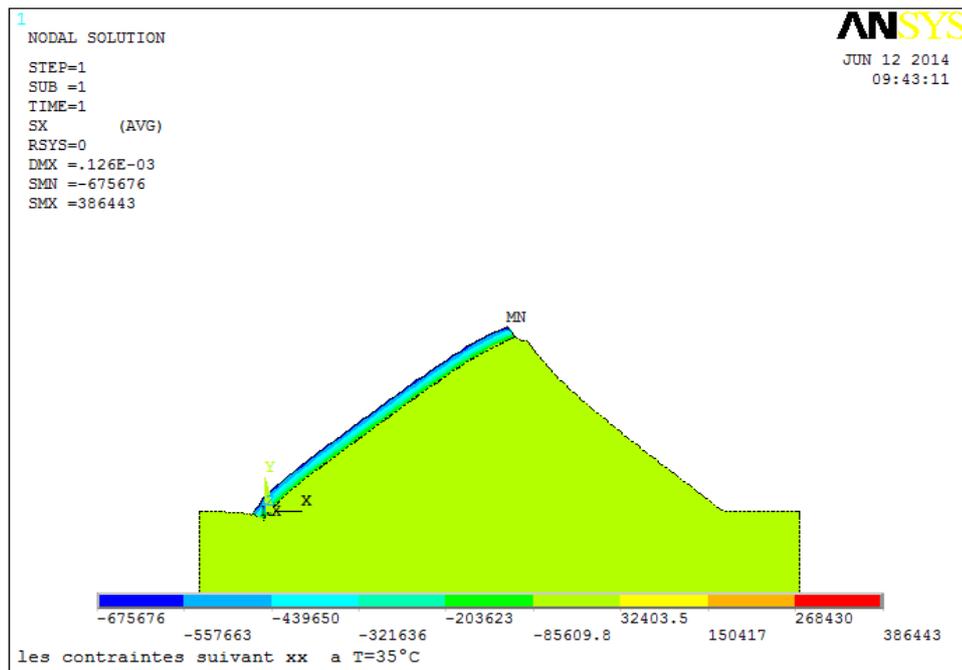


Figure 4.33 : Contraintes suivant xx à T=35°C.

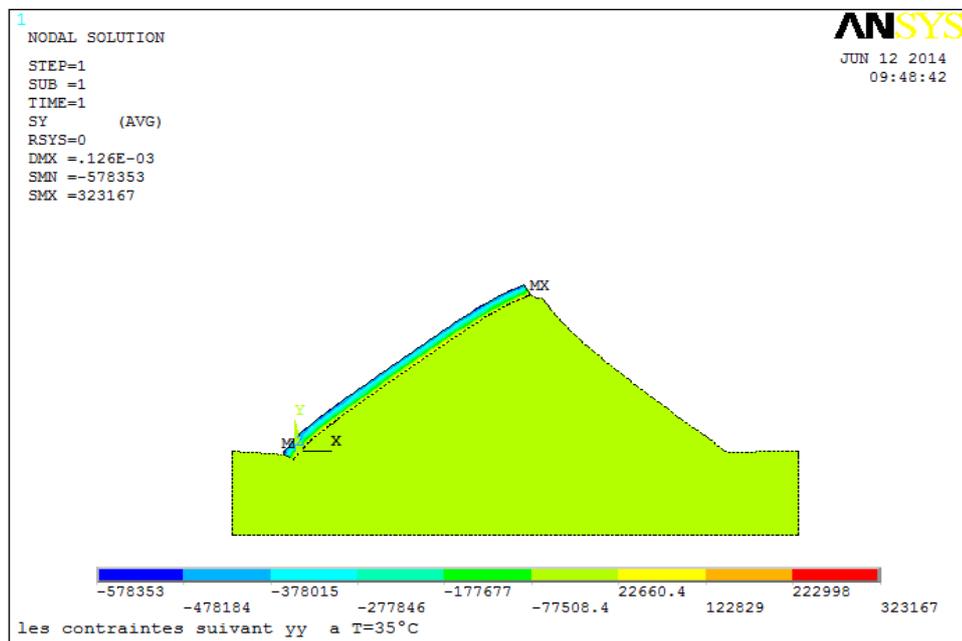


Figure 4.34 : Contraintes suivant yy à T= 35°C.

Les figures (4.33-4.34) représentent le contour des contraintes suivant (xx) et (yy), à T= 35°C.

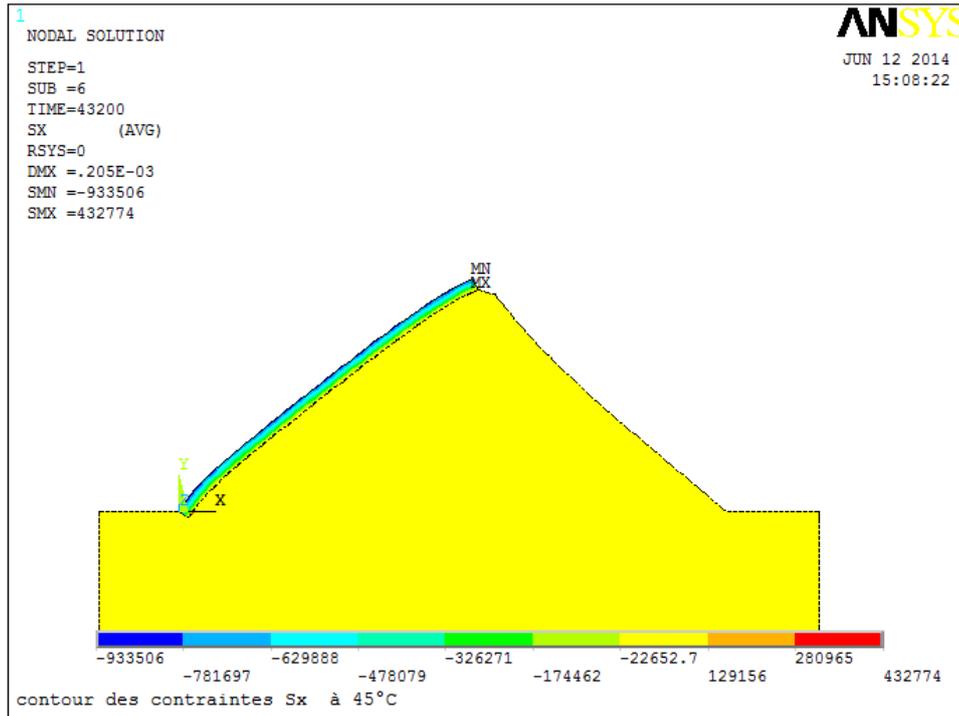


Figure 4.35 : contour des contraintes suivant xx à T=45°C.

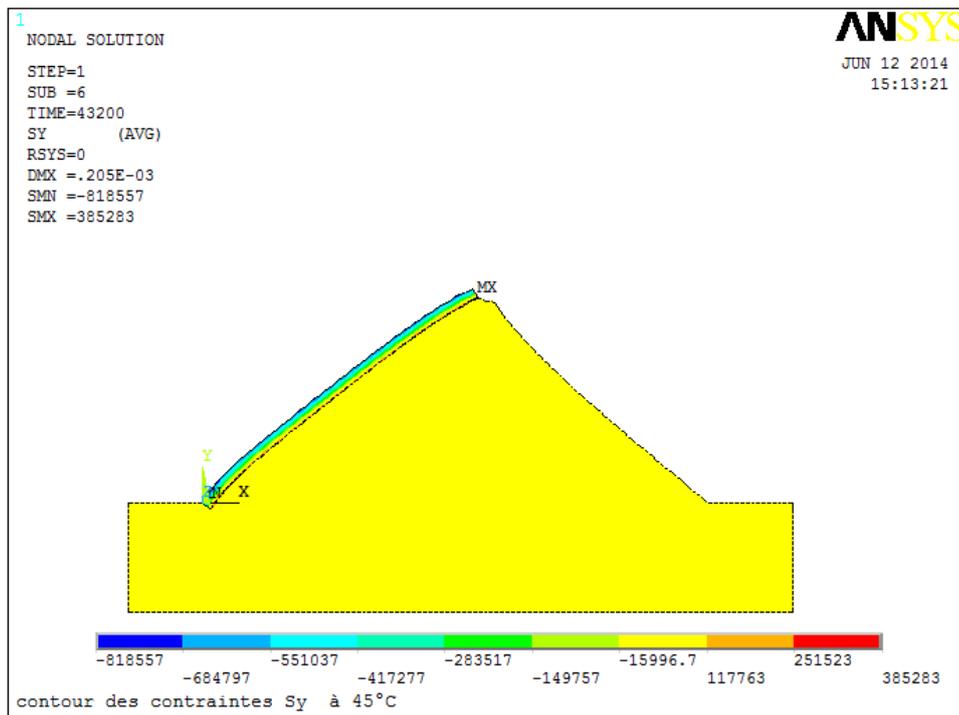


Figure 4.36 : Contour des contraintes Sy à T=45°C

Les figures (4.35-4.36) représentent le contour des contraintes a T= 45°C suivant (xx) et (yy)

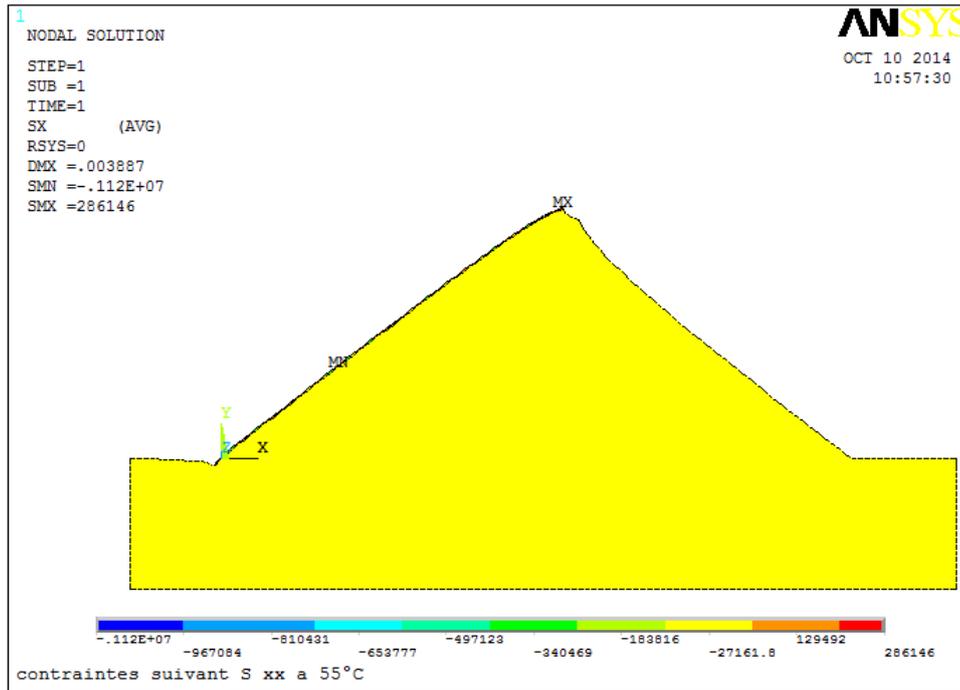


Figure 4.37 : Contour des contraintes suivant xx à $T=55^{\circ}\text{C}$

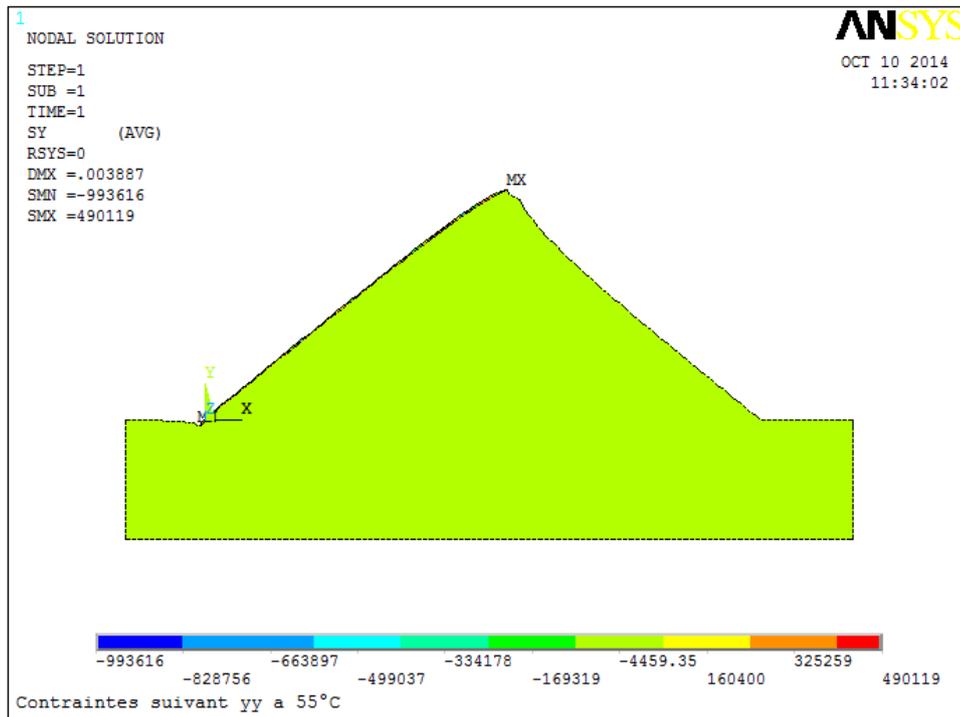


Figure 4.38 : Contour des contraintes suivant yy à $T=55^{\circ}\text{C}$

Les figures (4.37-4.38) le contour de contraintes suivant (xx) et (yy) à $T=55^{\circ}\text{C}$

On remarque l'existence de contrainte de compression et des contraintes de tractions.

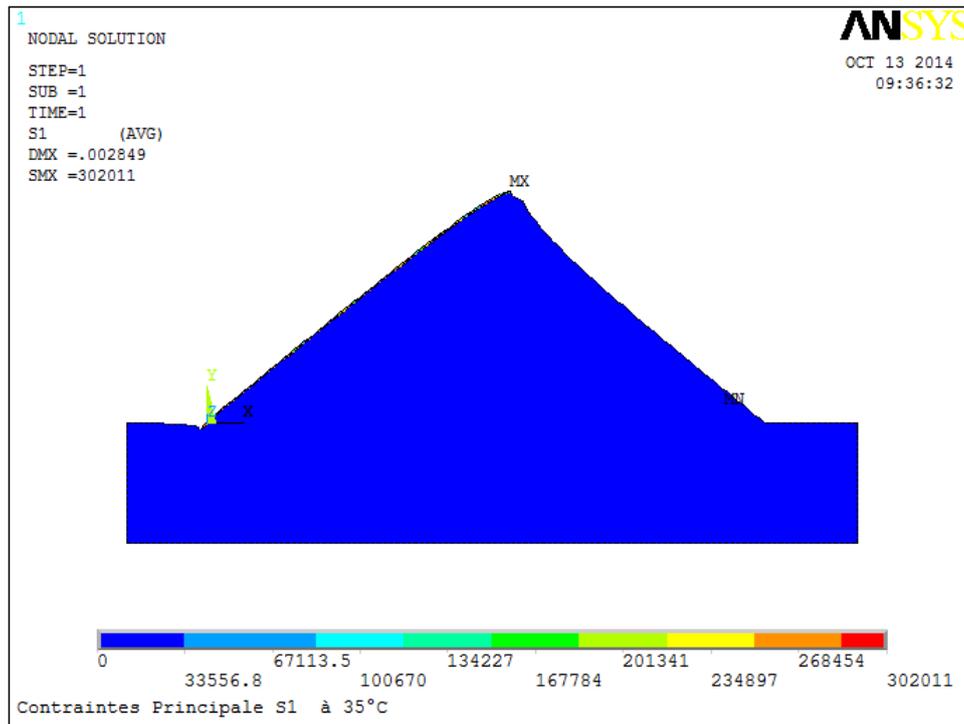


Figure 4.39 : Contour des contraintes principales S1 a T=35°C.

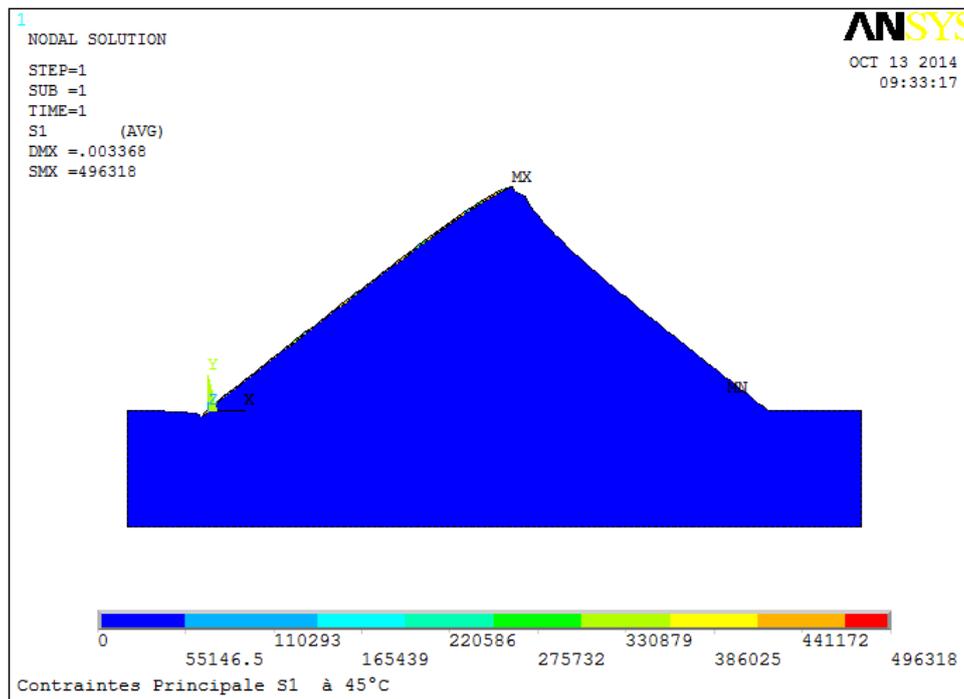


Figure 4.40 : Contour des contraintes principales S1 à 45°C

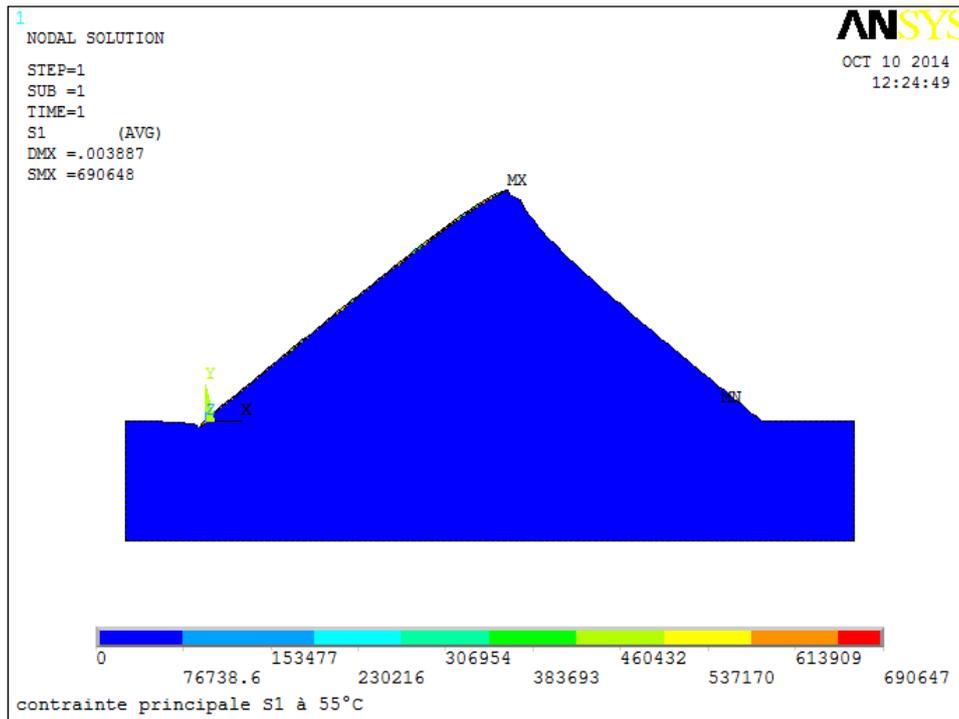


Figure 4.41 : Contour des contraintes principales S1 à 55°C

Les figures (4.39-4.40-4.41) montrent le contour des contraintes principales S1, à T= 35°C, 45°C, 55°C.

Les contraintes principales suivant S1, sont des contraintes de traction.

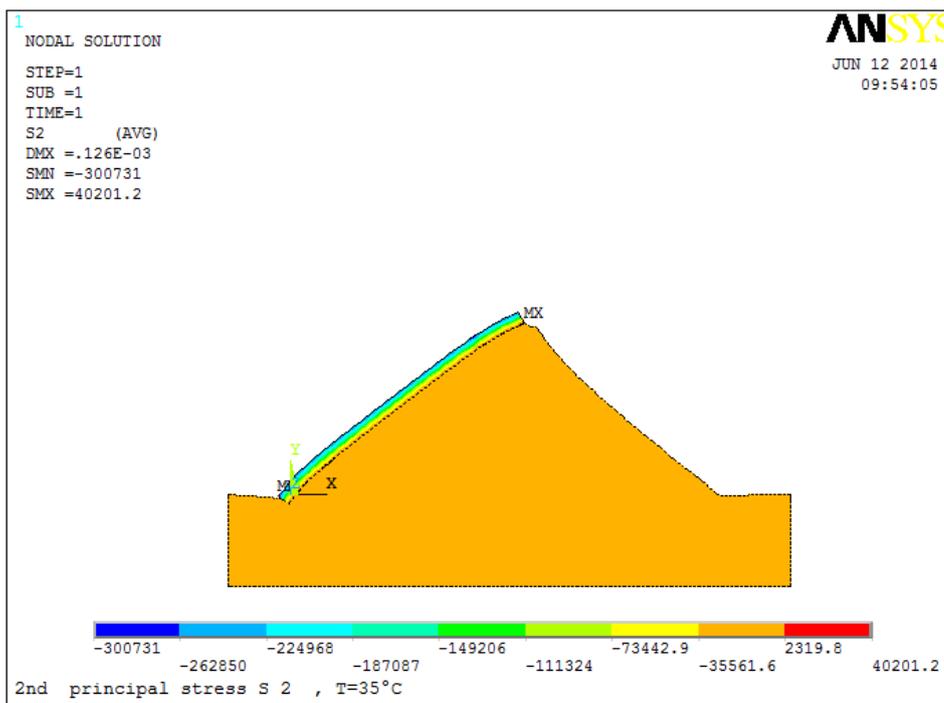


Figure 4.42 : contour des contraintes principales S2 à T= 35°C.

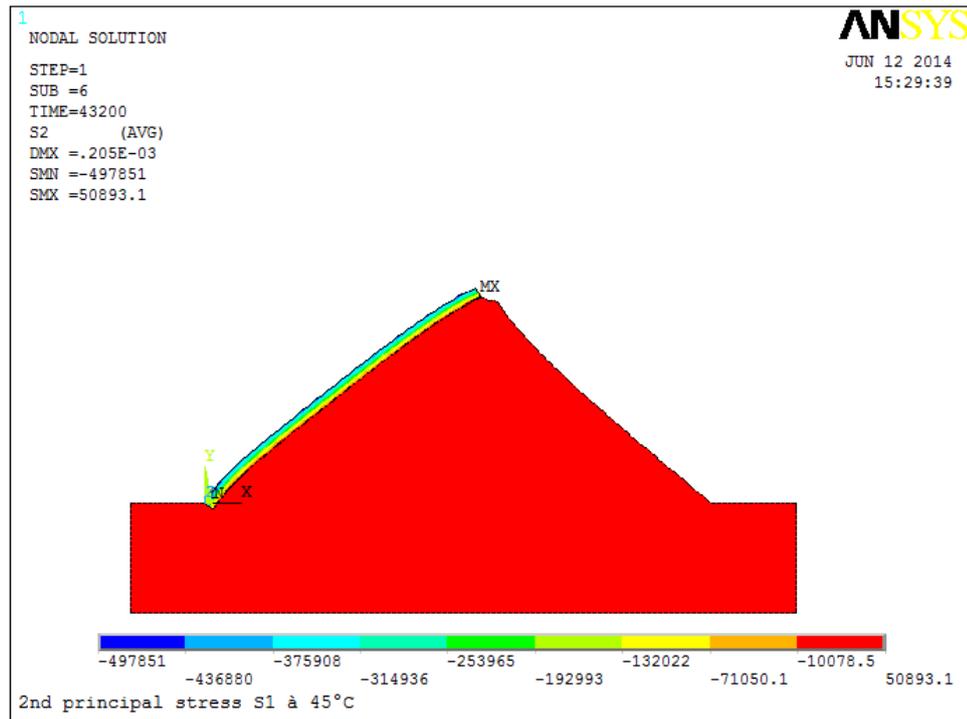


Figure 4.43 : Contour des contraintes principales S2 à T=45°C

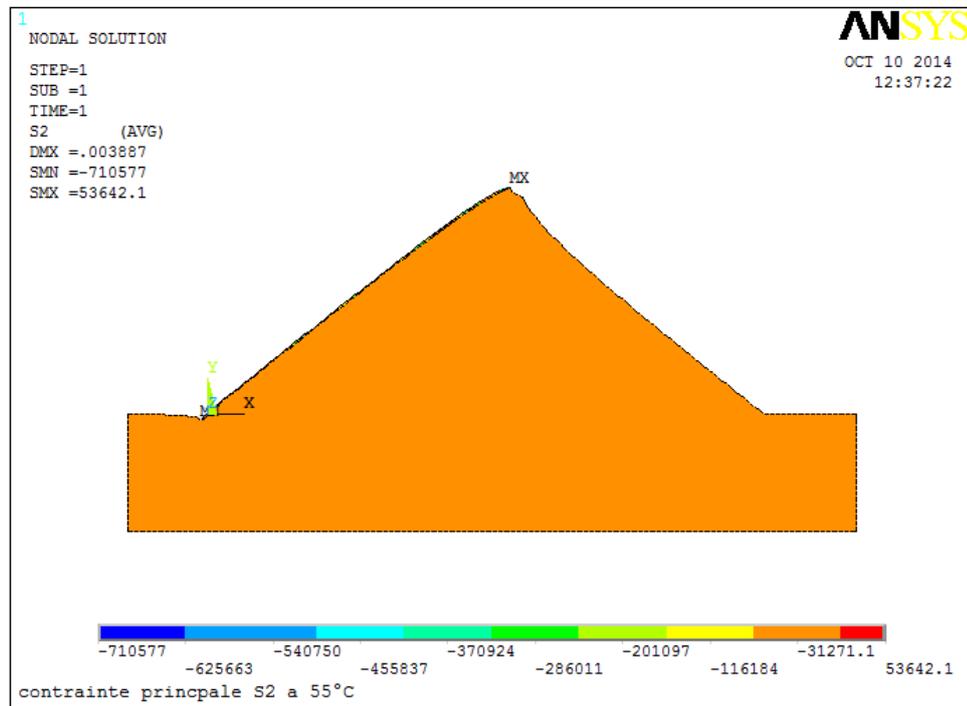


Figure 4.44 : Contraintes principale S2 à T=55°C

Les figures (4.42-4.43-4.44) illustrent le contour des contraintes principales S2 à T=35°C, 45°C, 55°C.

Dans la direction principale S2, on constate l'apparition de contrainte de compression qui évolue vers des contraintes de traction.

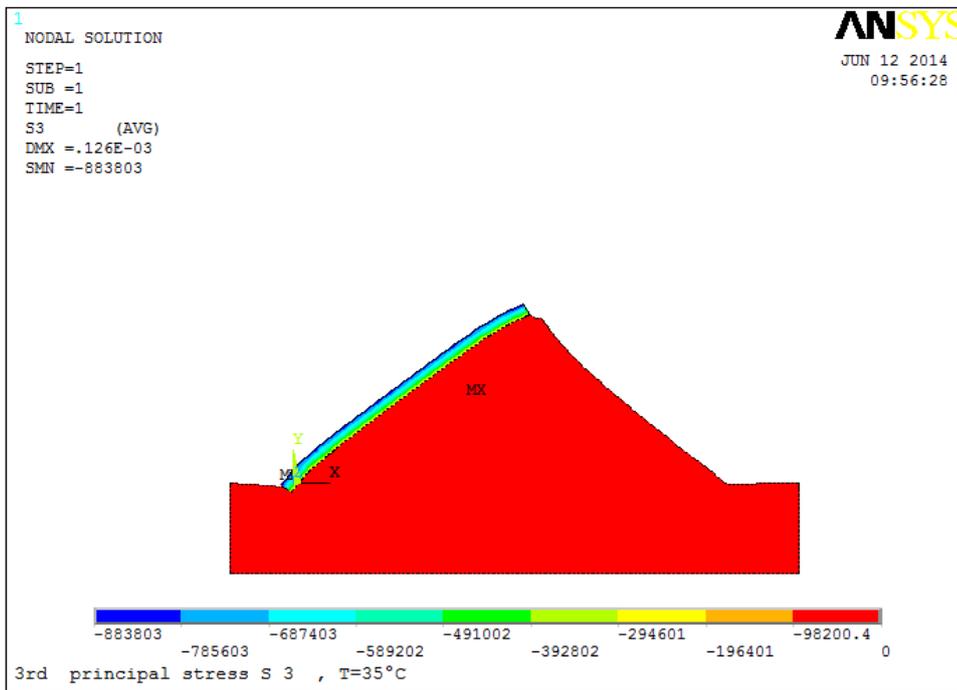


Figure 4.45 : Le contour des contraintes principales S3, à T= 35°C

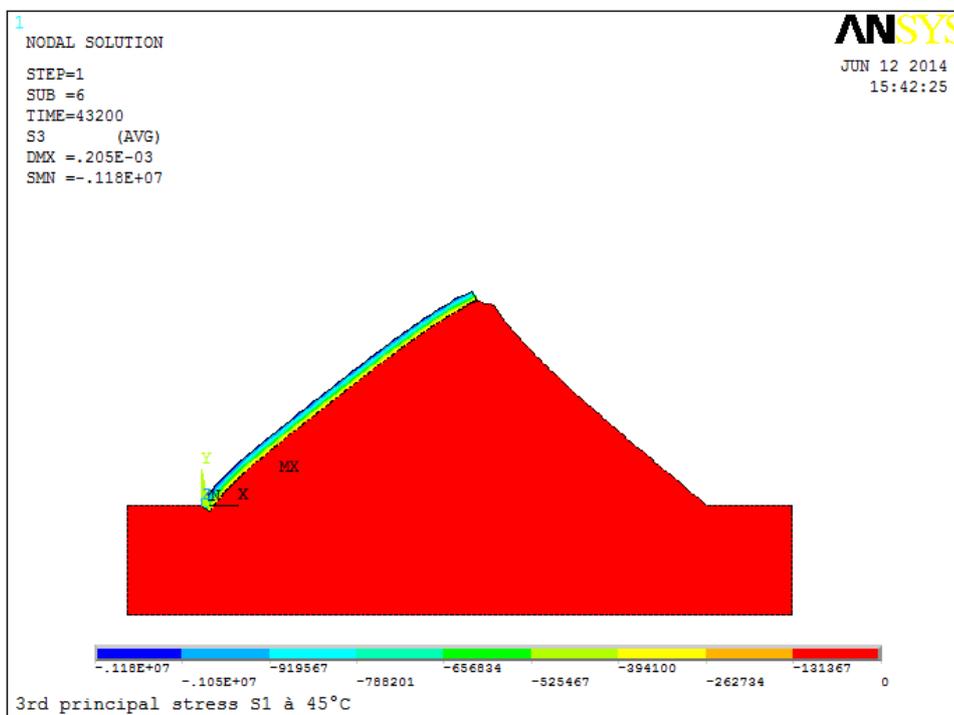


Figure 4.46 : Contour des contraintes principale S3 a T=45°C

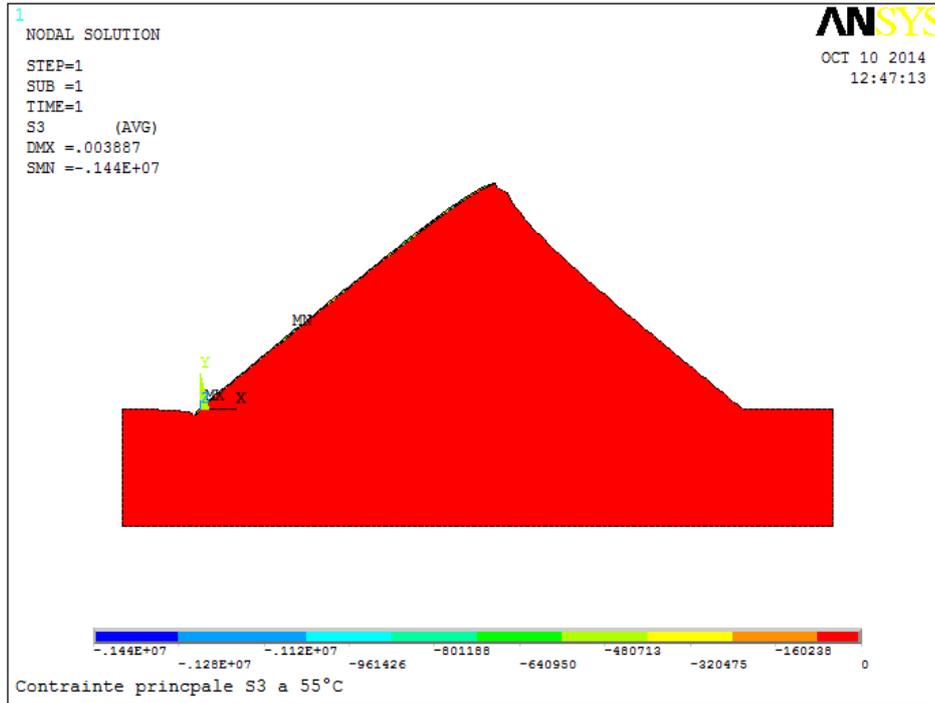


Figure 4.47 : contour des contraintes principale S3 à T=55°C

Les figures (4.45-4.46-4.47) montrent les contours des contraintes principales suivant S3 à T=35°C, 45°C, 55°C.

L'existence de contraintes de compression.

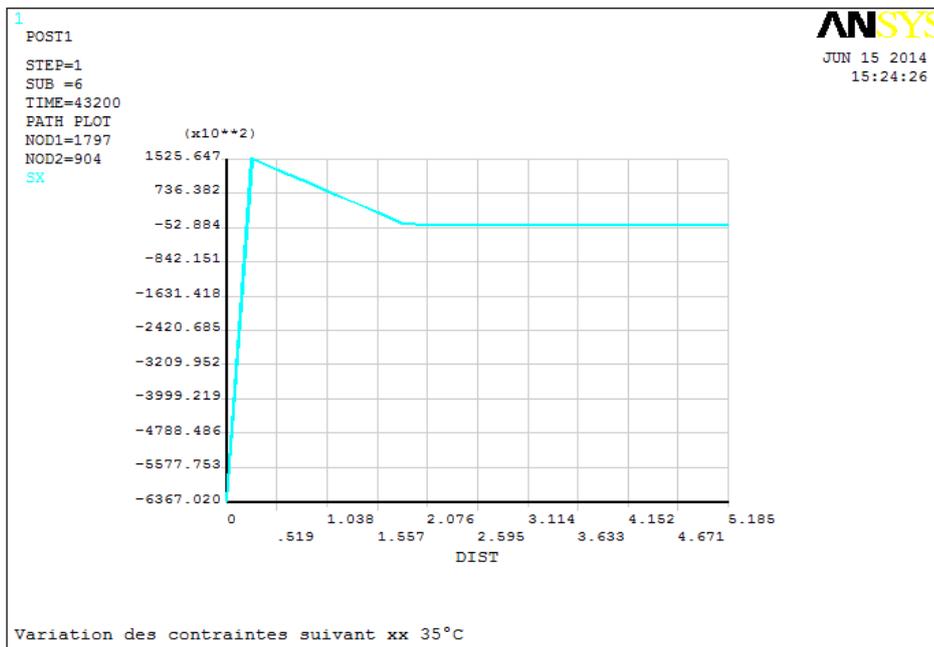


Figure 4.48 : Variation es contraintes suivant xx à T=35°C

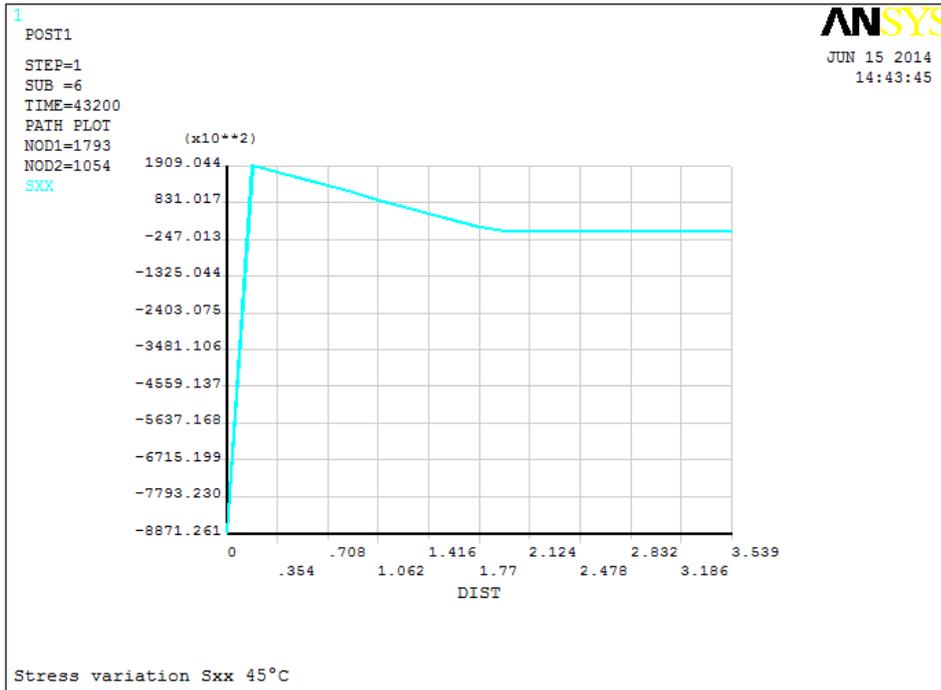


Figure 4.49 : variation des contraintes suivant xx à 45°C

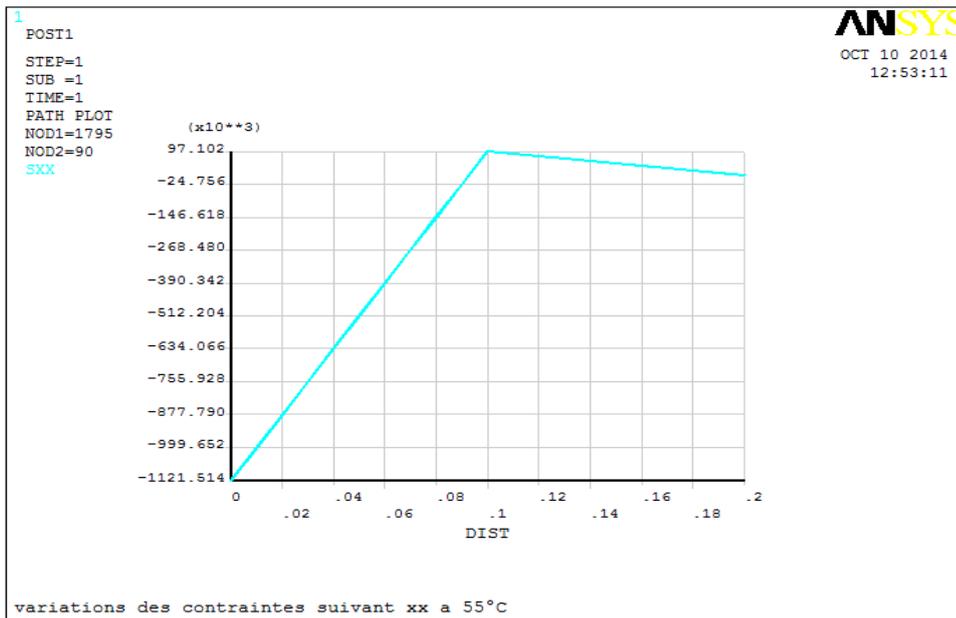


Figure 4.50 : variations des contraintes suivant xx à T= 55°C

Les figures (4.48-4.49-4.50) montrent les variations des contraintes suivant (xx) dans un nœud du barrage (path).

On constate l'existence de contrainte de compression, et des contraintes de traction qui sont de l'ordre de :

$$\text{À } \begin{cases} T = 35^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_{xx} = 1,5 \text{ Mpa} \\ T = 45^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_{xx} = 1,9 \text{ Mpa} \\ T = 55^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_{xx} = 0,97 \text{ Mpa} \end{cases}$$

Ces contraintes de traction diminuent avec l'augmentation de la température, cela est due au phénomène de relaxation (qui est plus efficace pour les hautes températures)

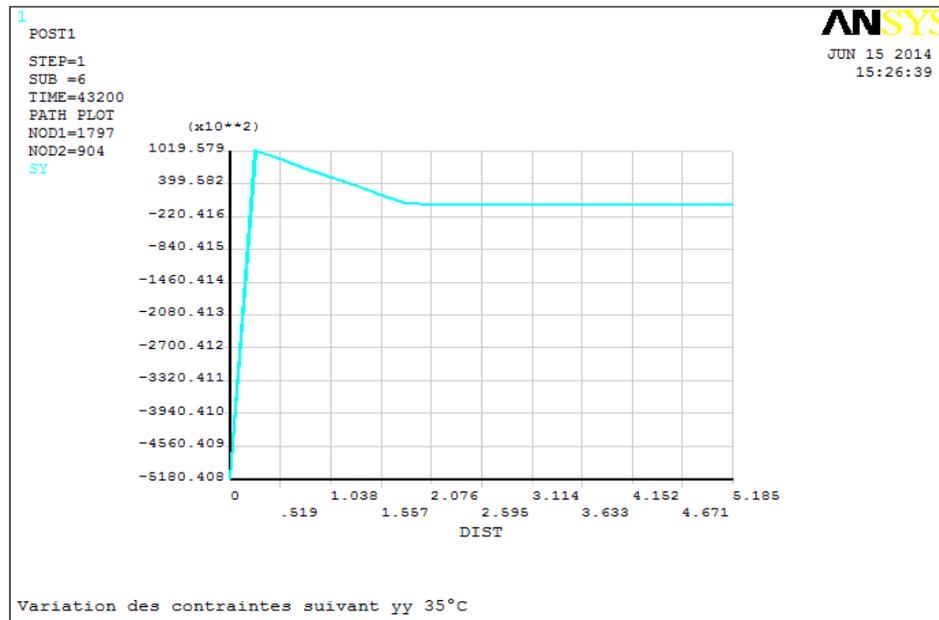


Figure 4.51 : Variation des contraintes suivant yy à T=35°C

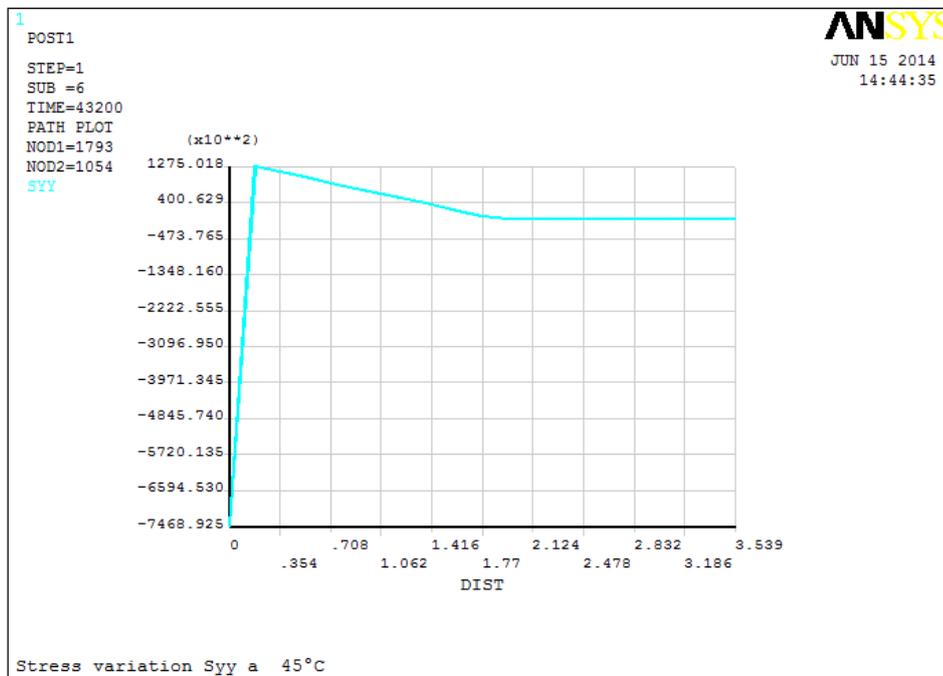


Figure 4.52 : Variation des contraintes suivant yy à T=45°C.

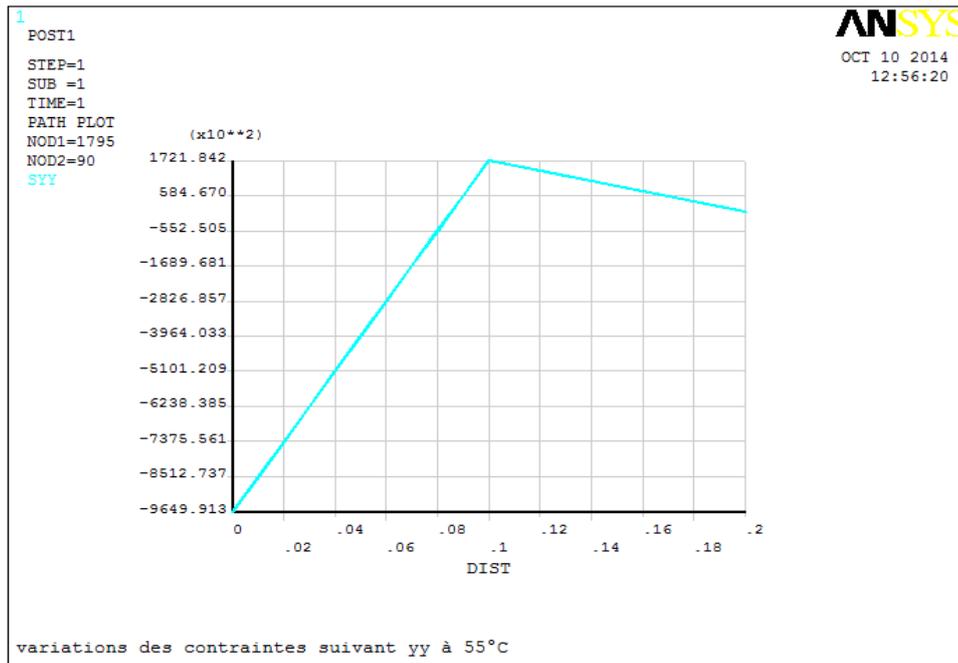


Figure 4.53 : variation des contraintes suivant yy à T=55°C

Les figures (4.51-4.52-4.53) montrent les variations des contraintes suivant (yy), Les contraintes évoluent linéairement dans la couche du bitume, les contraintes de compression passent à des contraintes de traction qui sont de l'ordre :

$$\text{À } \begin{cases} T = 35^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_{yy} = 0,10 \text{ Mpa} \\ T = 45^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_{yy} = 0,12 \text{ Mpa} \\ T = 55^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_{yy} = 0,17 \text{ Mpa} \end{cases}$$

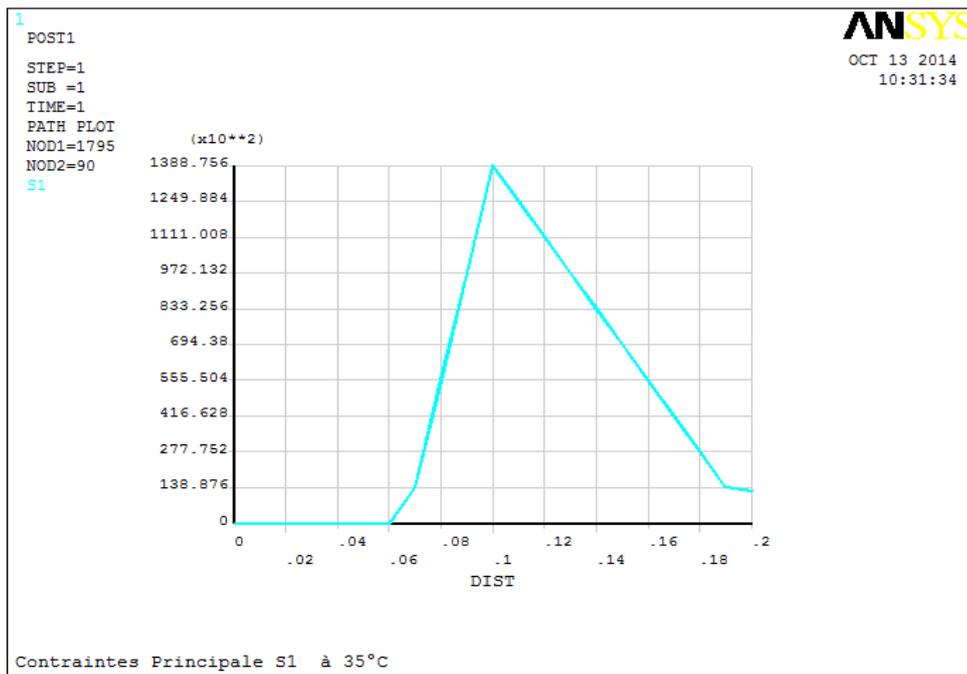


Figure 4.54 : Variation des contraintes principales S1 à 35°C

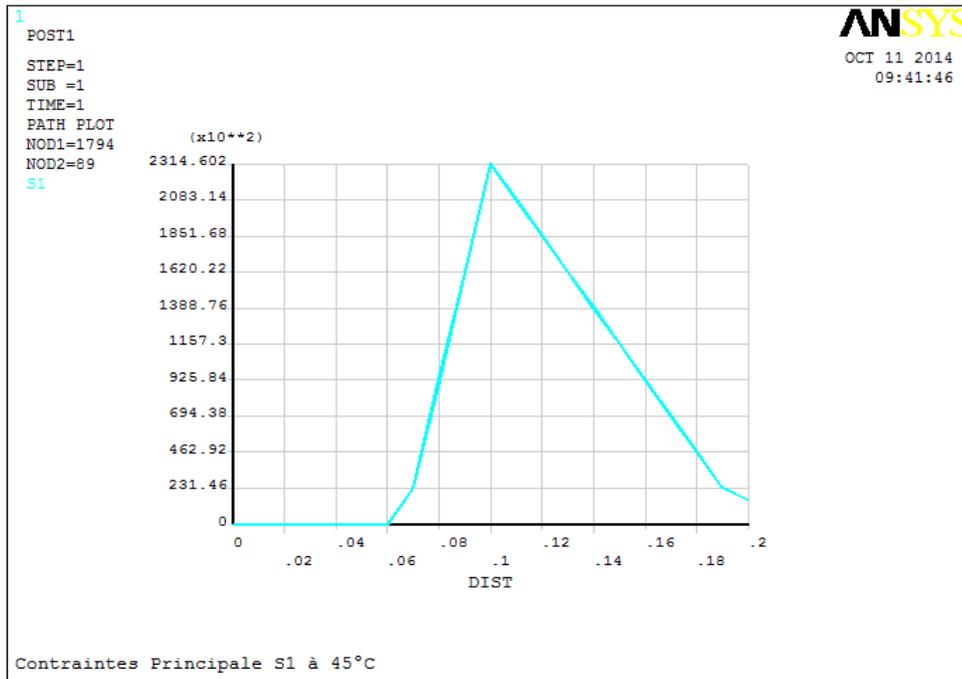


Figure 4.55 : variation des contraintes principales S1 à 45°C

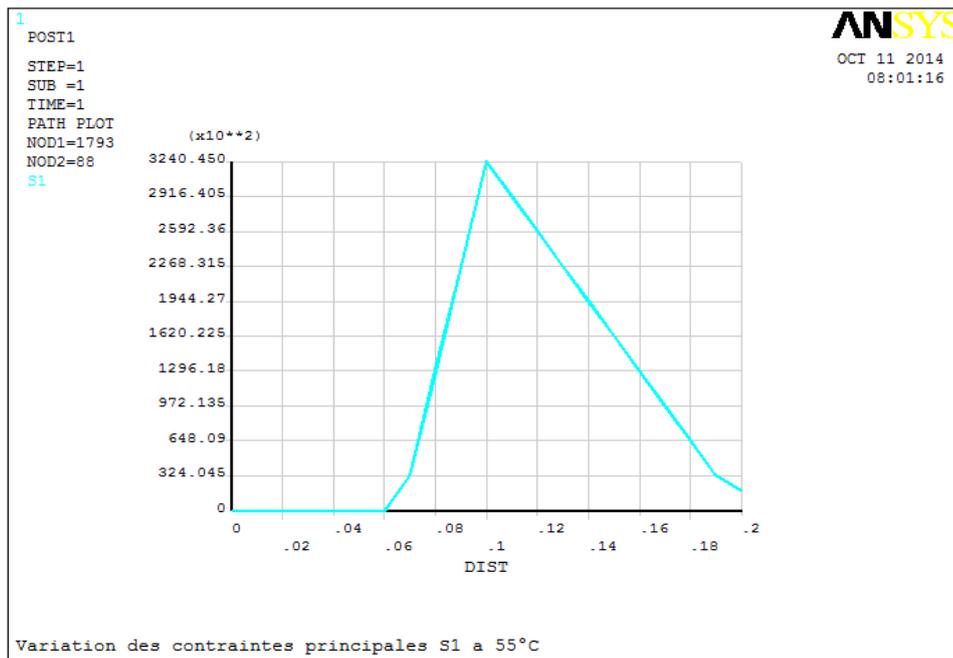


Figure 4. 56 : variations des contraintes principales S1 à 55°C

Les figures (4.54- 4.55-4.56) indiquent les contraintes principales S1 à (35°C- 45°C- 55°C).

On constate que les contraintes principales S1 sont nulle jusqu'a une profondeur de 0.5cm ; puis elles croient linéairement sur l'autre moitié de la couche bitumineuse, jusqu'a atteindre un maximum, puis elles diminuent linéairement dans la couche du béton.

Ce sont des contraintes de traction (dilatation) qui sont empêchées par le phénomène de relaxation du bitume (qualité viscoélastique linéaire), elles sont de l'ordre de :

$$\hat{A} \begin{cases} T = 35^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_I = 0,13 \text{ Mpa} \\ T = 45^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_I = 0,23 \text{ Mpa} \\ T = 55^{\circ}\text{C} \rightarrow \sigma_I = 0,32 \text{ Mpa} \end{cases}$$

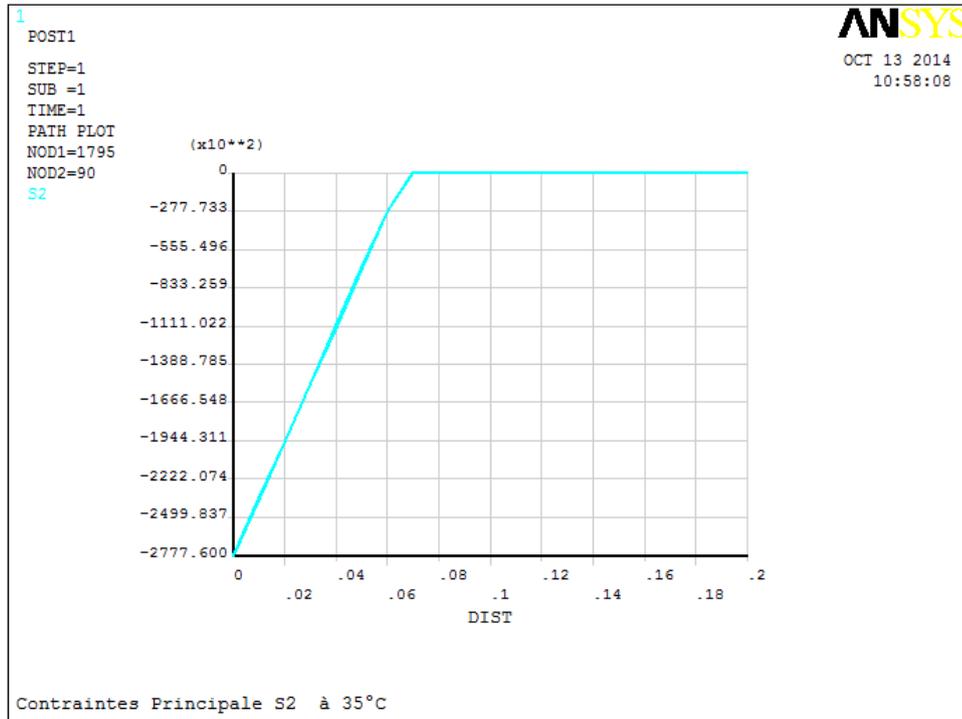


Figure 4.57 : Variation des contraintes principale S2 a T=35°C

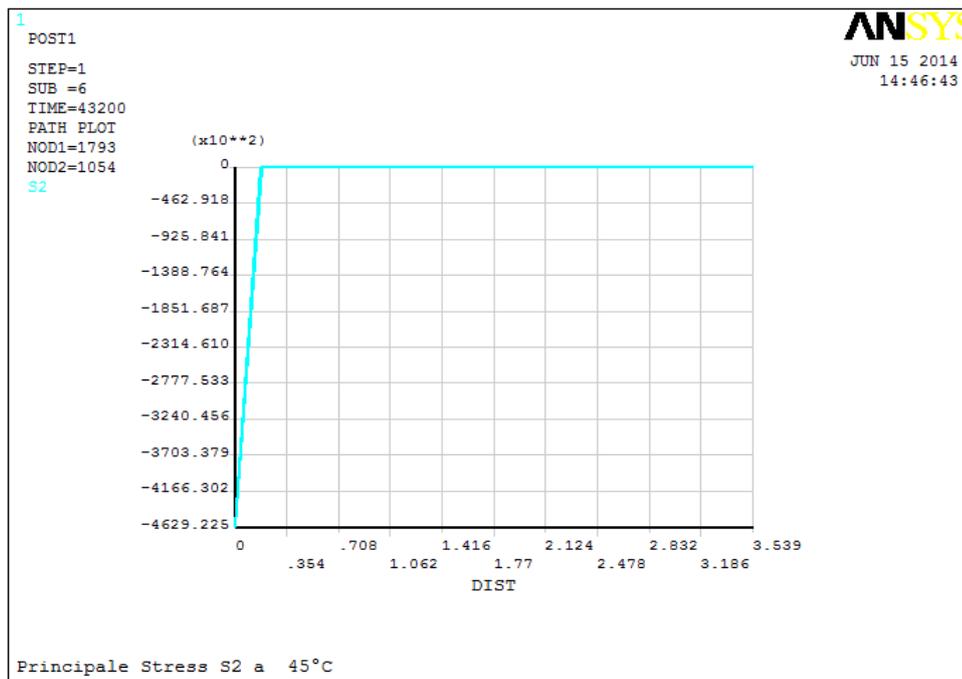


Figure 4.58 : Variation des contraintes principale S2 a T=45°C

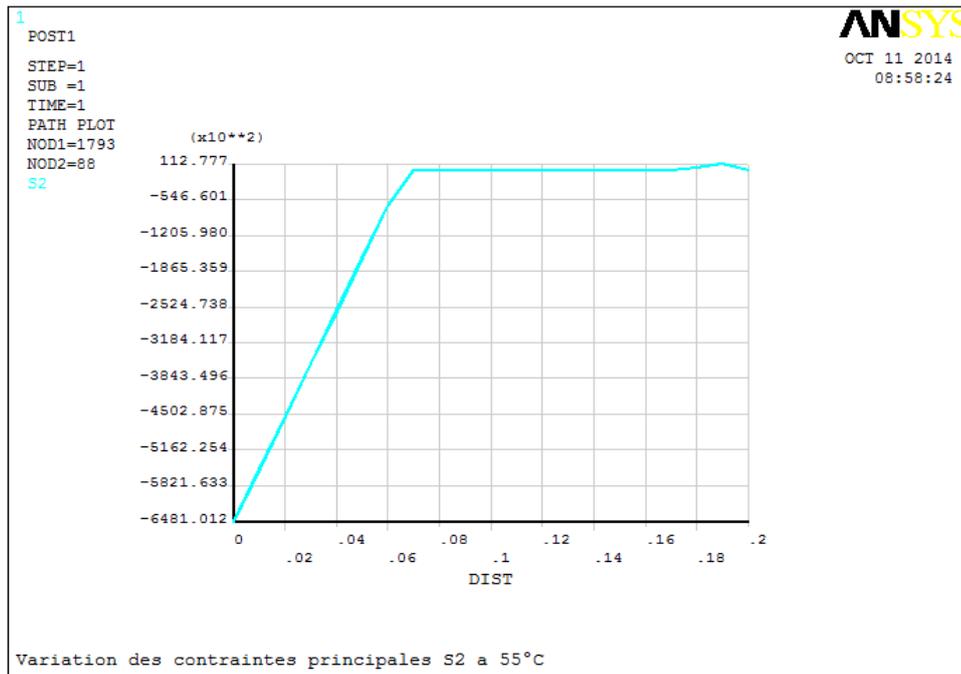


Figure 4.59 : Variation des contraintes principales S2 à T=55°C

Les figures (4.57- 4.58-4.59) représentent les contraintes principales S2 (35°C, 45°C, 55°C), ce sont des contraintes de compression qui s'annulent pour la température T=35°C, 45°C, 55°C. On constate que la relaxation est total (contraintes dissipées, phénomène efficaces pour ces plages de température)

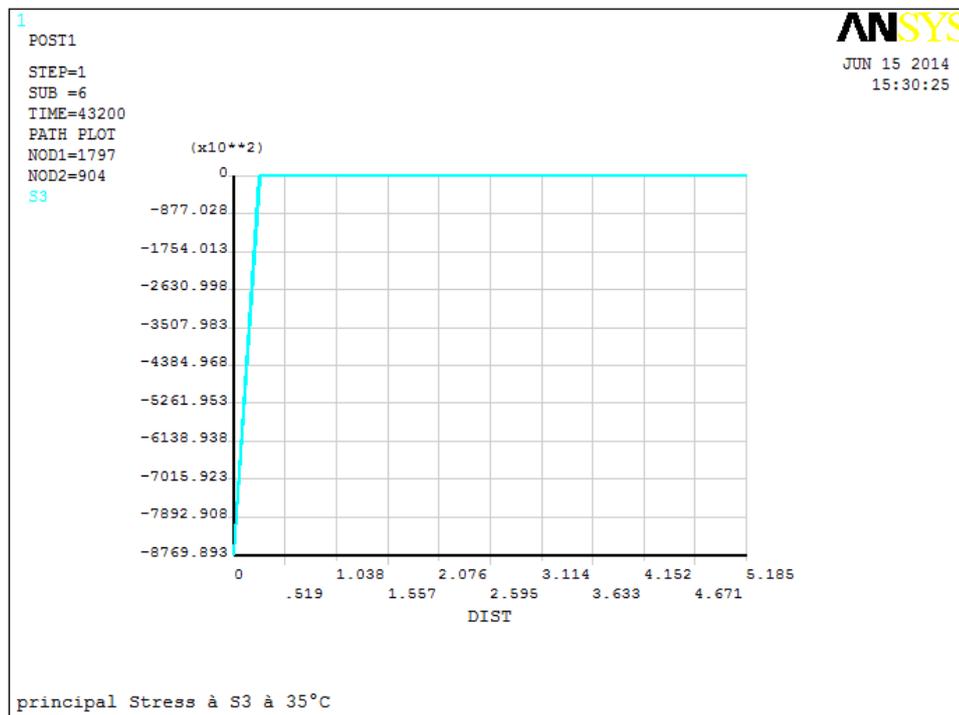


Figure 4.60 : variations des contraintes principales S3 à T= 35°C

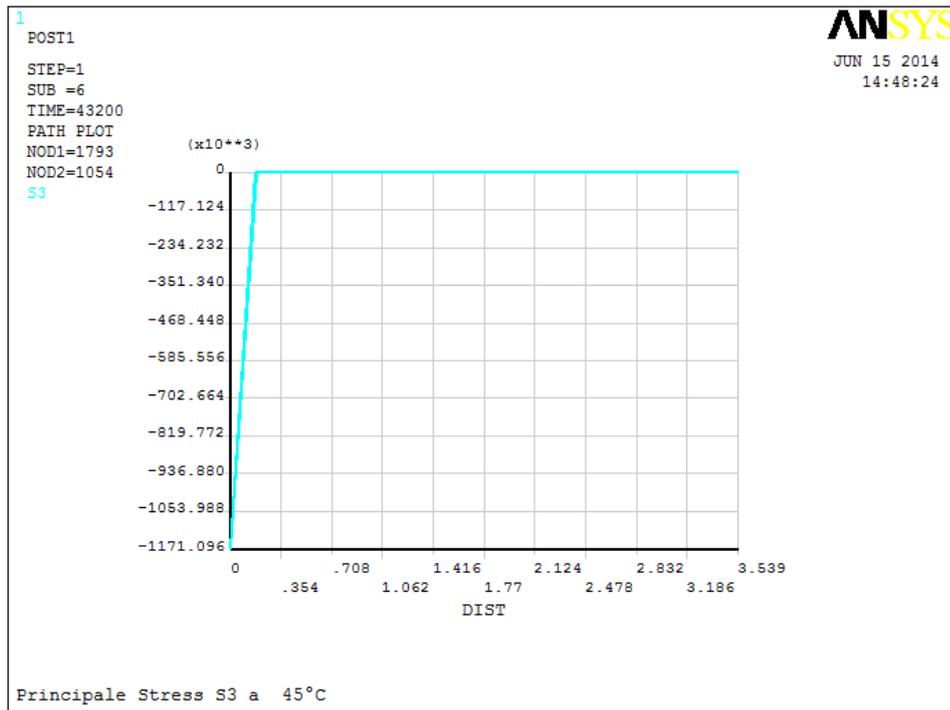


Figure 4.61 : Variations des contraintes principales S3 à T=45°C

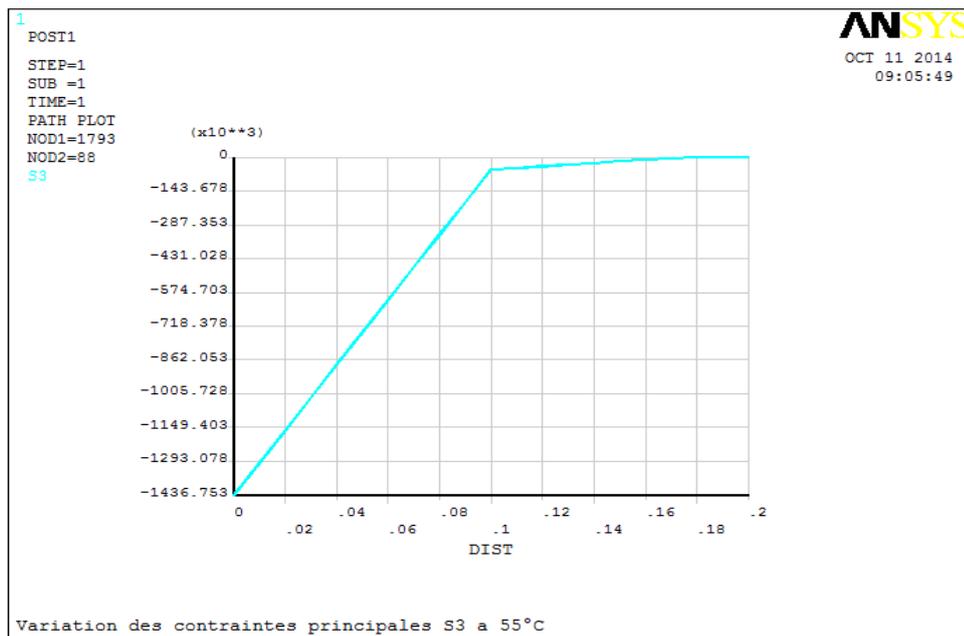


Figure 4.62 : Variation des contraintes principales S3 à T=55°C

Les figures (4.60-4.61-4.62) représentent les variations des contraintes principales suivant S3 à (35°C, 45°C, 55°C), ce sont des contraintes de compression, qui s'annulent, (la relaxation est totale, toutes les contraintes se dissipent)

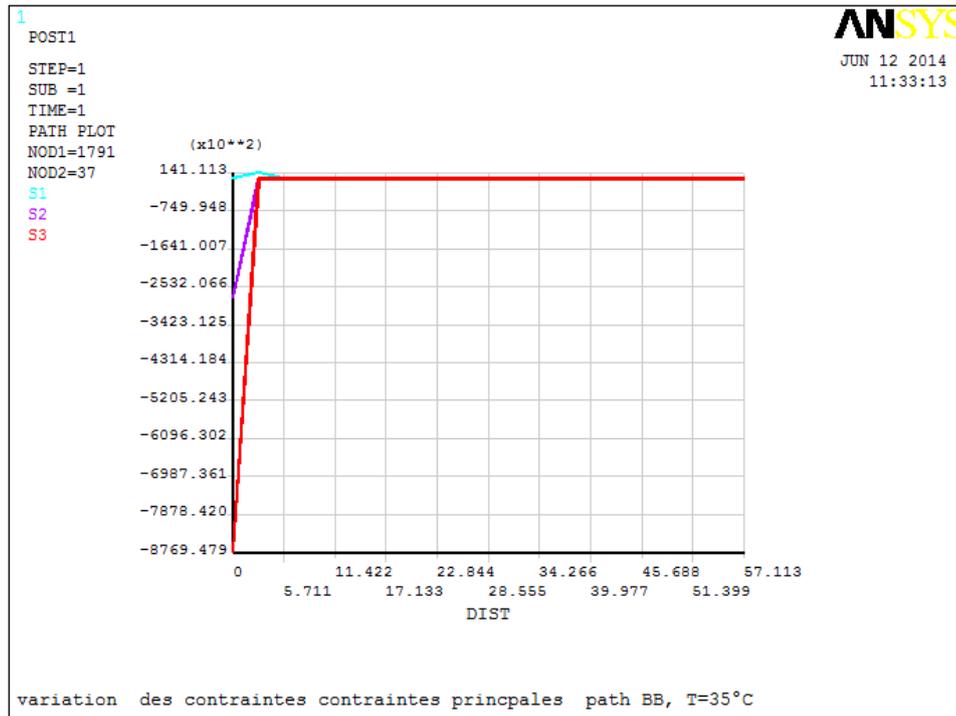


Figure 4.63 : courbe de variations des contraintes principales dans le barrage à 35°C.

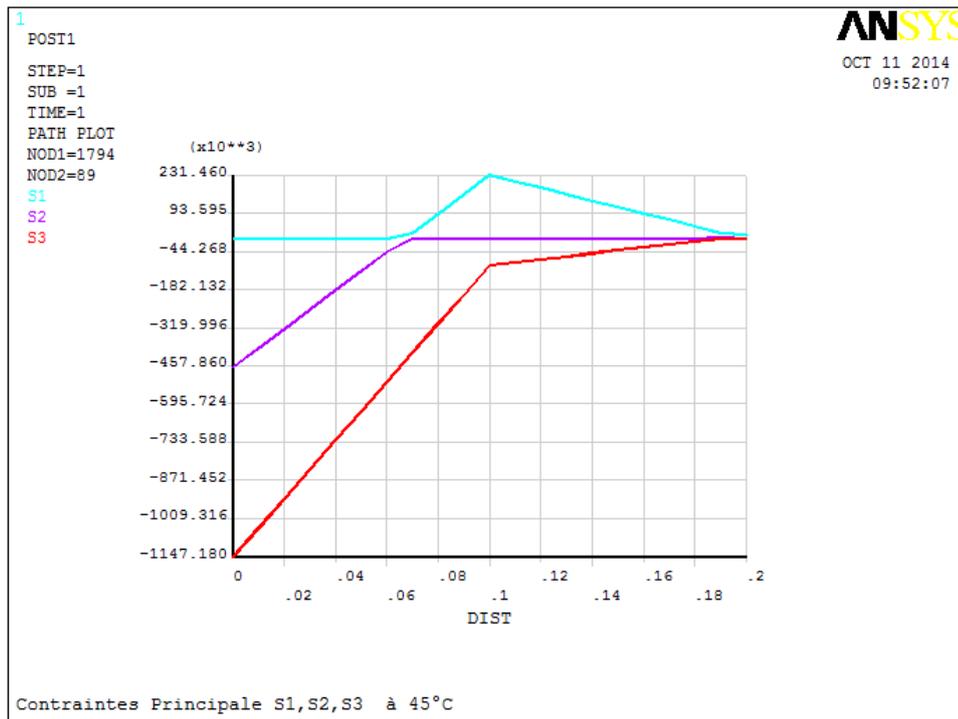


Figure 4.64 : variations des contraintes principales S1, S2, S3 à 45°C

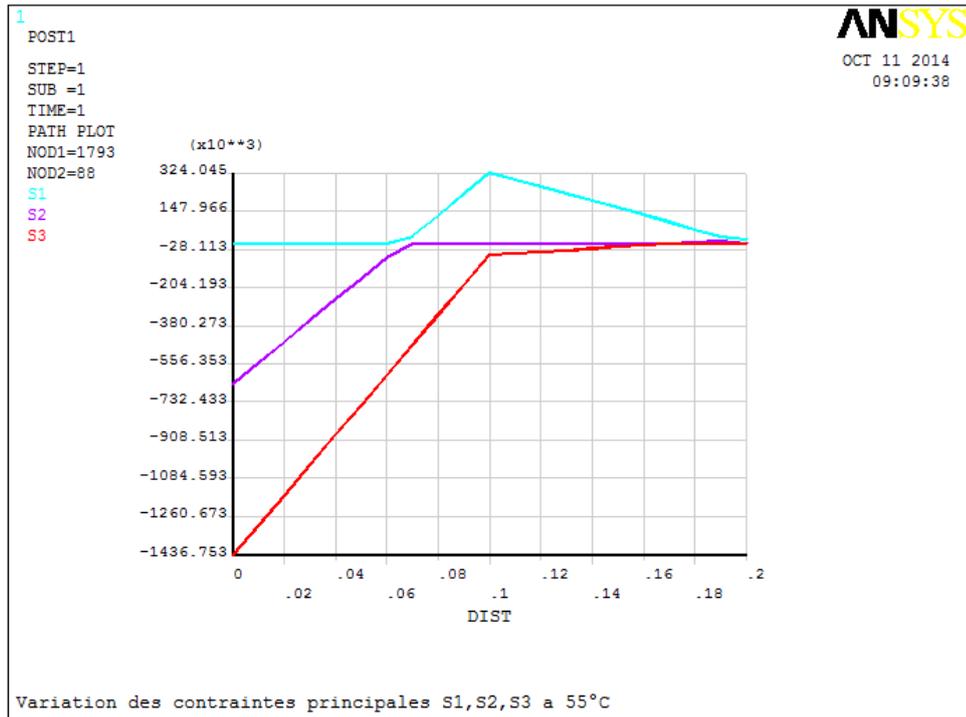


Figure4.65 : Variation de contraintes principales S1, S2, S3, à 55°C

Les figures (4.63-4.64-4.65) nous montrent les variations des contraintes principales (S1.S2.S3) à T= 35°C, 45°C, 55°C.

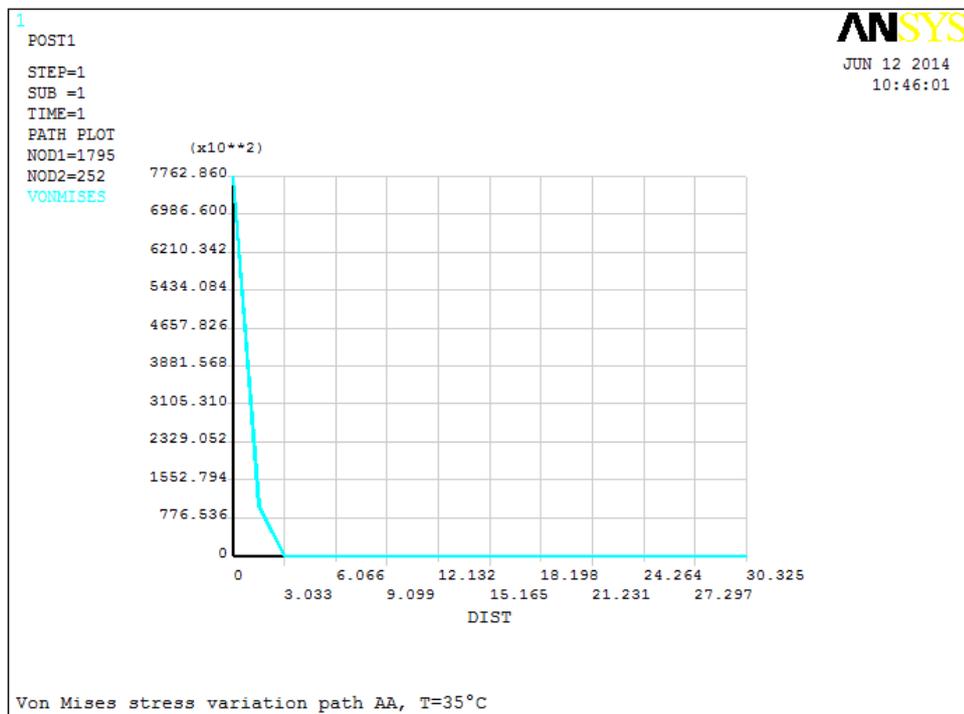


Figure 4.66 : Variation des contraintes de Von Mises SEQV à 35°C

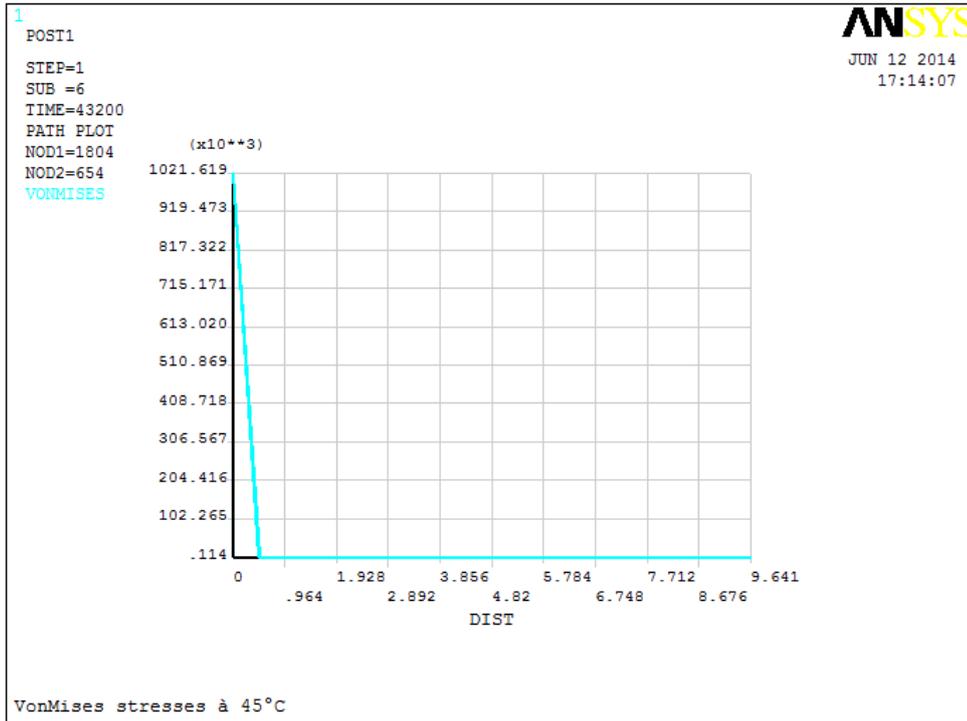


Figure 4.67 : Variations des contraintes de Von Mises SEQV à 45°C

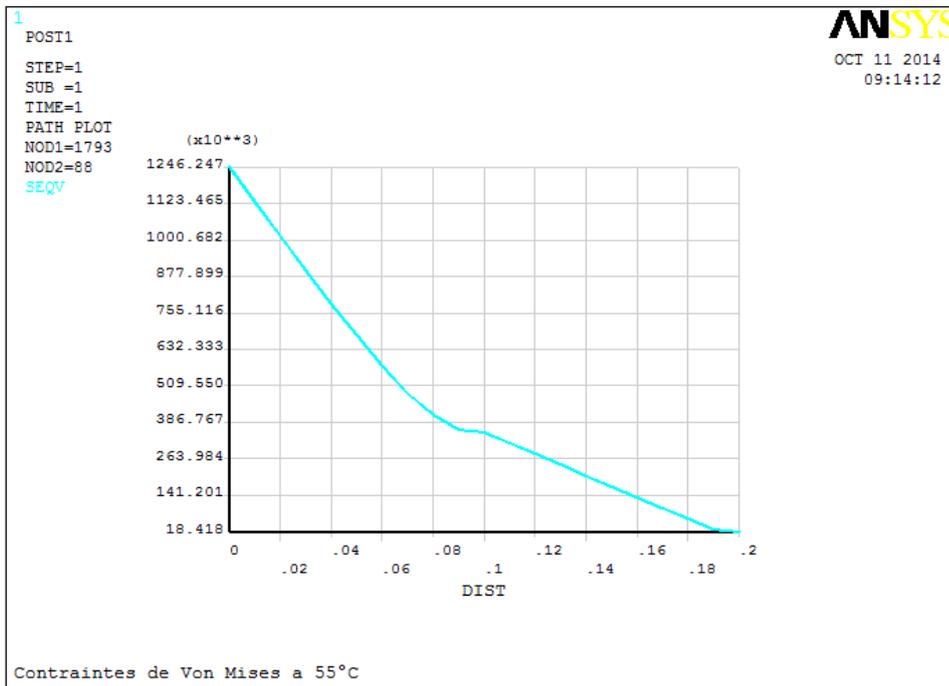


Figure 4.68 : Variation des Contrainte de Von Mises SEQV à 55°C

Les figures (4.66-4.67-4.68) les variations des contraintes de Von Mises. On constate que ses contraintes sont des contraintes de traction de l'ordre de :

$$A \begin{cases} T = 35^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{SEQV} = 0,77\text{Mpa} \\ T = 45^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{SEQV} = 1,02\text{Mpa} \\ T = 55^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{SEQV} = 1,24\text{Mpa} \end{cases}$$

Ses contraintes diminuent linéairement (dilatation empêchées), qui est due au phénomène de relaxation (qualité viscoélastique linéaire du bitume).

4.6 Analyse des résultats

D'après les résultats obtenus, on constaté l'existence de contraintes thermiques générées à l'intérieur de la couche bitumineuse ;

- Les contraintes de compression qui sont relaxées (apparaissent quand les températures sont constante, pour les plages de températures chaude le phénomène de relaxation est total) (retrait thermique empêchées)
- Les contraintes de traction induite sont minimales, (dilatation du matériau) qui empêchées, d'où la linéarité des courbes obtenues, (le phénomène est relaxer).

Quand la plage thermique est chaude, les déformations peuvent exister, mais les contraintes développées sont relativement faible.

En pratique, dans le cas des contraintes de traction, le calcul est arrêté quand la résistance calculé atteint la résistance du matériau, dans le cas du bitume il n'existe pas de résistance maximale de rupture, pour cela nous a nous baserons sur les études expérimentales faites pour justifier nos résultats.

D'après les résultats de F.Olards (Olards, 2003), la rupture de l'éprouvette intervient dans le domaine fragile lorsque le niveau de la contrainte de traction-induite thermiquement atteint la résistance en traction obtenu à $300\mu\text{m/m/h}$. Ainsi, la résistance des enrobés semble être fonction de la température (Arand, 1990), et de la vitesse de déformation uniquement, et ne dépend pas du chemin de sollicitation thermomécanique suivi. Dans la mesure où la résistance en traction des enrobés dépend faiblement de la vitesse de déformation dans le domaine fragile, il semble possible de prédire la fissuration thermique dans le domaine connaissant la courbe de résistance en traction obtenue à une vitesse quelconque. La température correspondant à la rupture est notées T_{TSRST} correspond à l'intersection des deux courbes (TSRST et celle de la résistance). L'intervalle des températures supérieures à T_{TSRST} , ainsi que celui des contraintes correspondant compris entre deux courbes, représentent le domaine de résistance à la traction du matériau. La figure (4.69) illustre un exemple.

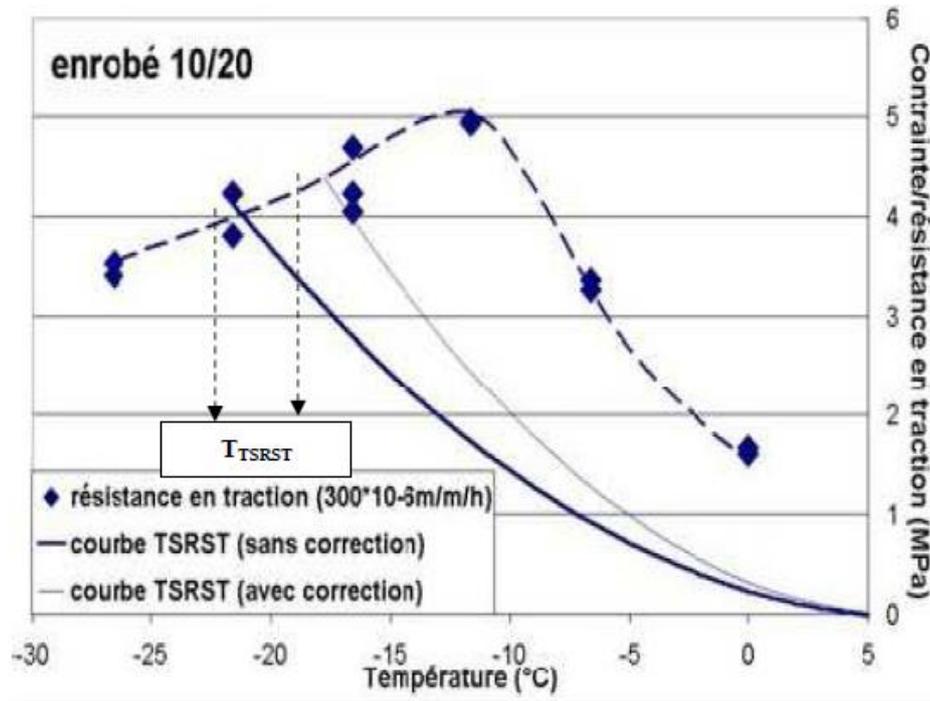


Figure 4.69 : Essai de traction à 300 μ m/m /h, TSRST (-10°C/h) (Olards, 2003).

- ✓ Les contraintes de traction sont plus élevées, quand la plage thermique est plus froide, plus la température est élevée plus la relaxation augmente.
- ✓ Les contraintes induites en traction sont généralement supérieures à celles induites en compression, les contraintes de traction qui sont développées pour les plages chaudes sont d'amplitudes faibles (phénomène de relaxation est plus marqué).
- ✓ Les contraintes de compression sont aussi développées au cours de cycle refroidissement/échauffement, le taux de relaxation créée à des températures chaudes sont totalement relaxées.
- ✓ L'évolution de la contrainte thermique en fonction de la température garde la même allure pour chaque cycle échauffement/refroidissement.

Les contraintes σ_{xx} , σ_{yy} , sont des contraintes de compression et des contraintes de traction minimales. Elles ne présentent pas de danger de fissuration.

$\sigma_I > 0$. $\sigma_{II} < 0$. $\sigma_{III} < 0$ (*traction – compression – compression*) . Pour toutes les plages de températures, la déformation se fait suivant (xx) dans la profondeur

Ces contraintes sont totalement relaxées suivant les deux directions (2,3), mais dans la direction (1), les contraintes de tractions sont minimales (dilatation) se fait suivant (xx) en profondeur.

4.7 Conclusion

Le but de ce chapitre est de donner la procédure de modélisation de la température dans l'analyse structurale, mettre en évidence les étapes de base de la modélisation, ensuite l'introduction et formulation des valeurs initiales des conditions aux limites.

Nous avons illustrés à travers les différentes figures la distribution des températures ; ainsi que le phénomène contraintes-déformations engendrées par les températures imposées à la surface du masque du barrage. Dont l'objectif principale été d'évaluer la stabilité du masque en béton bitumineux des barrages en enrochement et de déterminer s'il était possible de continuer la construction ce type d'ouvrage.

On a pu constater que :

➤ Les déformations obtenues sont de l'ordre de 10^{-5} (m/m) pour les températures de (35°C et 45°C) et de l'ordre de 10^{-4} (m/m), qui correspondent aux domaines linéaire selon (Charif, 1990 obtient un comportement linéaire des enrobés pour des déformations inférieures à 10^{-4} m/m.) Quant à Doubbaneh en 1995, il trouve que le domaine linéaire des enrobés est limité à des déformations n'excédant pas quelques 10^{-5} m/m (Doubbaneh, 1995).

➤ L'existence de contraintes de compression et de traction, pour les plages de températures chaudes (+35°C, 45°C, 55°C), on a obtenue des pics de contraintes de traction et de compression de faibles amplitudes. Le risque de fissuration thermique est très faibles, les contraintes thermiques sont largement relaxées, cette plage est moins dangereuse vis-à-vis des risques de fissurations, mais elle peut entraîner des déformations relatives qui restent important, un durcissement et un vieillissement sur un site suivi d'une perte de qualité viscoélastique du matériau.

5.1 Introduction

Le comportement thermique reste un sujet vaste très discuté dans les matériaux bitumineux, qui pose encore beaucoup de questions, ceci en partie est dus au fait que les variations des températures interviennent sur les différentes caractéristiques du matériau ; les propriétés rhéologiques et mécaniques sont en fonction de la température, la résistance à la fissuration varie aussi avec la température.

Les études dans ce domaine sont peu nombreuses et peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Etude traitant le comportement thermique dus a des sollicitations à basse température ou bien par fatigue thermique.
- Etude traitant les mouvements cumulés dus à des hautes températures ; donc il s'agit pour le bitume de déformation permanentes.

La dilatation ou la contraction qui résultent de cette variation de température engendrent alors une déformation mécanique de même amplitude et de signe contraire (la déformation totale est nulle) qui s'accompagne d'une contrainte que l'on nomme « contrainte thermique ». Donc il existe des couplages de phénomènes thermiques et mécaniques.

5.1.1 Aperçu historique

L'histoire de l'étude des problèmes relatifs au phénomène de déformation et de fissuration des bitumes et enrobés, sous l'effet des basses températures, a vu le jour quelques années avant 1960.

Vaughn Marker a cité que durant cette année 1960 s'est tenu un symposium consacré au phénomène de fissuration en l'absence de chargement mécanique, un article discutant le phénomène de fissuration sans l'effet du trafic. Parmi les références de cet article, ils existaient des références traitant ce problème qui dépend des variations de la température (EPPS Amy 1999).

Monismith et al. (Monosmith et Al, 1965) ont réalisé des investigations sur les contraintes et déformations d'origine thermique développées dans des enrobés bitumineux sous des conditions contrôlées en laboratoire. Cet étude a permis de montrer l'existence du phénomène de fissuration sous ce type de sollicitation, en dessous de -17°C . La conclusion est que l'apparition de fissures d'origine thermique dans les chaussées est possible. De plus, ils montrent que pour une gamme

de température comprise entre -1 et $+10^{\circ}\text{C}$, les contraintes mises en jeu restent faibles, et qu'elles sont nulles au-delà de 10°C .

Goacolou et al. (Goacolou, H, et AL, 1983), Vergne et Petit (Vergne, A, C, petit, 1989) et de Bondt (Bondt, AH, 1999) ont étudié les effets combinés du trafic et de la basse température. Ils ont montré théoriquement que les effets des charges roulantes sur le développement de la fissure sont faibles au début du processus et s'accroissent durant la fin de la propagation. Les fissures sont induites par les variations de température et suivent deux phases d'évolution complètement différentes : le processus de propagation des fissures est rapide au début et plus lent par la suite.

Certains chercheurs ont effectué des tests au laboratoire pour simuler le retrait thermique de l'enrobé. Les tests peuvent être menés sur des barreaux d'enrobé maintenus à une longueur définie et auxquels est imposée une variation thermique (Arand, 1990). Ils donnent des informations intéressantes sur la contrainte limite de résistance thermique de la couche de surface.

Di Benedetto et Neifar (Di Benedetto, 1997), ont travaillé sur le coefficient de contraction thermique et ont mis en évidence un comportement thermique anisotrope notable des enrobés bitumineux, en mesurant sur des éprouvettes cylindriques à la fois les coefficients de contraction thermique radial et axial. Une différence de 30 à 50% a été trouvée entre ces deux coefficients (Di Benedetto, 1997). Puis en 2001, ils ont simulés l'évolution des contraintes thermiques dans le temps, sous une variation monotone et cyclique de la température (Neifar, 2001).

Olard et al. Ont effectués des essais de retrait thermique sur cinq enrobés de liants différents et ils ont trouvés que, lors des essais TSRST, la rupture est obtenue lorsque la contrainte de traction (induite thermiquement) devient égale à la résistance en traction de l'enrobé, cette dernière pouvant être indépendante de la vitesse de déformation dans le domaine fragile. En outre les différents paramètres sur enrobés introduits en grandes déformations se corrélaient très bien avec les paramètres sur liants tirés des essais rationnels de caractérisation viscoélastiques linéaires ($T(S(t=60s))=300\text{MPa}$), $T(m(t=60s))=0,3$), $TgG^*(7,8\text{Hz})$ et $TgE^*(7,8\text{Hz})$). Chacun de ces paramètres semble donc pouvoir être utilisé de manière à classer les liants ou les enrobés bitumineux à basses températures. En revanche, ces paramètres rationnels se corrélaient mal avec les paramètres traditionnels (Pénétrabilité à 25°C , TBA, Frass) (Olards2003).

Les approches concernant la température, pour le dimensionnement ou l'évaluation de la durée de vie d'une structure sont le plus souvent intuitives ou empiriques et les résultats expérimentaux trouvés en laboratoire ne sont pas pris en compte dans des applications à grandeurs réelles.

5.1.2 Les principaux domaines du comportement des enrobés bitumineux

Les principaux domaines du comportement des enrobés bitumineux lors des essais des caractéristiques mécaniques. On distingue trois catégories principales d'essais en fonction des nombres de cycles de déformations imposées ε (Di Benedetto 1990) :

- pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pour cents, le comportement observé est fortement non linéaire ;

- lors de chargement de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations "faibles" les phénomènes d'endommagements apparaissent, le matériau se "fatigue".

- Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations "faibles" ($< 10^{-4}$) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.

Comme le montre la figure (5.1) Les frontières considérées correspondent bien évidemment à des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et le chemin de sollicitation (compression, cisaillement...).

Les quatre propriétés mécaniques importantes pour les matériaux traités aux liants utilisées sont :

- La rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire) ;
- Le comportement à la fatigue ;
- Le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformation permanente ;
- La fissuration et la propagation des fissures .En particulier les phénomènes de fissuration par apparition de contraintes liées aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) sont un aspect important qui introduit un couplage thermomécanique.

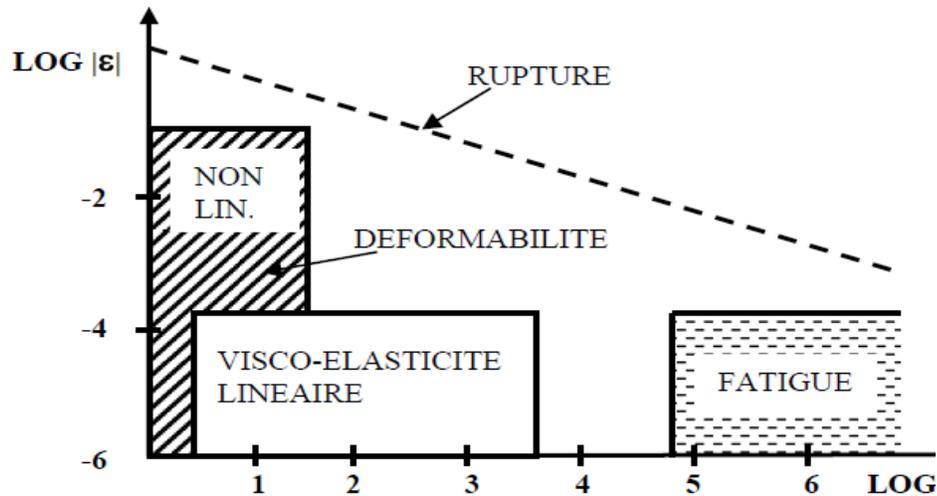


Figure 5.1 : Comportement des enrobés en fonction de la déformation [Di Benedetto 1990] (ε déformation, $\text{Log } N$ nombre de cycle)

Les études sur les bétons bitumineux privilégient les essais de détermination des caractéristiques linéaires et de fatigue. Ces deux informations entrent directement en ligne de compte dans le processus de dimensionnement (exemple de dimensionnement des chaussées) (guide technique, 1994).

5.1.2.2 Hypothèse

Les mélanges bitumineux sont considérés comme des matériaux homogènes isotrope, viscoélastique linéaire, thermosusceptible ;

Ces mélanges se comportent donc comme des matériaux viscoélastiques dont leur rigidité est due à leurs squelettes minérales et dont le caractère visqueux est dû au bitume.

Ce comportement varie en fonction des conditions des chargements : un temps de sollicitation très court, provoque une réponse élastique du matériau et à l'opposé, un chargement appliqué longtemps, se rapproche d'un comportement purement visqueux.

Dans certains cas, on se contente de l'hypothèse d'élasticité linéaire pour décrire le comportement du matériau. Cette hypothèse est utilisée pour le calcul des contraintes et déformations dans les couches bitumineuses, Il faut cependant préciser que le caractère viscoélastique du matériau est pris en compte à travers le choix des valeurs de module pour un couple (fréquence, température) représentatif des conditions moyennes (Guide Technique, 1994).

5.1.3 Les types d'essais utilisés

La détermination des propriétés des matériaux à caractères visqueux nécessite de connaître le type d'essai pratiqué ainsi que l'historique du chargement appliqué en fonction du temps, il existe deux type d'essais utilisés :

- Essai homogène : donne accès directe au contrainte/déformation, il est pertinent pour décrire un comportement viscoélastique linéaire, et la limite du comportement linéaire.
- Les essais non homogènes : demande à postuler une loi de comportement, a priori dont les paramètres sont calculés à partir des résultats expérimentaux qui peut introduire une erreur dans l'interprétation des résultats.

5.2 Comportement thermomécanique au cours d'un cycle thermique

Le comportement mécanique d'un matériau est caractérisé en lui appliquant un niveau de déformation prédéfinis, dans le cas d'une déformation imposée, par un chargement thermique (gradient thermique).

Dans le cas des enrobés, les déformations enregistrées regroupes plusieurs phénomènes physiques (Corté, Dibendetto2005) :

- Une contraction thermique lors d'un refroidissement ;
- Une dilatation thermique lors d'un réchauffement.

Dans le cas du liant (film bitumineux), le matériau est considéré continu parfaitement homogène.

5.2-1. Modélisation numérique de l'évolution de la température au cours d'un cycle thermique

Les propriétés du béton bitumineux sont en partie issues de celle du bitume qui le compose, il a de ce fait un comportement qu'il est possible de qualifier complexe, par le terme viscoélastique.

Les conséquences défavorables de l'apparition de dégradations (fissures-déformation) en surface, sont dues a la perte d'étanchéité (hiver aggravé par l'eau et le gel, été chaud). Une augmentation des contraintes et déformations dans la structure, une détérioration de la couche bitumineuse implique l'apparition des fissures en surface. Il faut donc arriver à une certaine maîtrise des contraintes thermiques, afin d'éviter leur développement en surface (Di Bendetto 1990).

Les origines des contraintes thermiques qui se traduisent par l'existence de fissures transversales en surface peuvent être classées en deux groupes (Vinson, 1992), (Shahin, 1987):

- Les contraintes de traction dans le matériau à des basses températures ;
- Les contraintes causées par les variations de la température journalières (phénomène de fatigue thermique).

Dans les climats du nord africain et le sud de l'Europe, la fissuration thermique est due parfois à la combinaison des deux cas, (c'est-à-dire une rupture par contrainte thermique, développé à basse température supérieur à la contrainte de traction et suite un phénomène de fatigue thermique).

Le problème thermomécanique couplé entre la température et les fonctions mécaniques exprimant les grandeurs $\varepsilon(t)$ de la déformation $\sigma(t)$ et la contrainte.

L'équation qui gouverne les échanges thermiques entre deux points différents d'un échantillon, selon une profondeur de l'enrobé :

$$C \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho_{EB}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = 0 \quad (5.1)$$

θ : Température à la cote z et au temps t [°C] ;

ρ_{EB} : La densité volumique de l'enrobés [kg/m³] ;

Z : la profondeur [m].

5.3 Analyse thermomécanique au cours d'un cycle thermique

Les déformations et contraintes qui sont dues uniquement aux effets thermiques sont calculées en laboratoire à partir de l'essai du retrait thermique empêché.

5.3.1- Retrait thermique empêché

L'expérience de retrait thermique empêché unidimensionnel consiste à bloquer les déformations longitudinales d'une éprouvette cylindrique et à soumettre celle-ci à une variation de température. La dilatation ou la contraction qui résultent de cette variation de température engendre une déformation mécanique de même amplitude et de signe contraire (la déformation totale est nulle), elle s'accompagne d'une contrainte que l'on nomme « contrainte thermique ». Donc il existe des couplages de phénomènes thermiques et mécaniques.

5.3.2 Les contraintes thermiques

C'est la contrainte qui résulte suite au phénomène du retrait thermique. Cette contrainte n'est significative qu'à partir des faibles températures généralement $< 5^\circ\text{C}$ (Olard2003).

La difficulté de prédiction des sollicitations thermiques provient du fait du nombre important de paramètres en jeu : la nature des matériaux (le coefficient de dilation thermique notamment), la formulation (la rigidité et la granulométrie du mélange qui peut jouer sur la qualité d'engrènement), l'épaisseur des couches (le dimensionnement), ainsi que l'histoire thermique et mécanique du matériau (fatigue thermique)

Pour identifier la part des contraintes dues à la variation de température, lors de sollicitation thermiques, les variables principales sont la température, la contrainte et la déformation qui sont fonction du temps.

5.3.3 Procédure du calcul de la contrainte thermique

De nos jours Les modélisations numériques sont de plus en plus adoptées pour connaître les relations qui gouvernent le phénomène "température-déformation-contrainte" dans les problèmes des comportements thermiques. Le phénomène étant particulièrement complexe la tendance est nécessairement à le simplifier.

Le but de ses simulations est de décrire l'évolution des contraintes induites par le phénomène de «retrait/dilatation » empêché, due à des variations d'amplitudes thermiques élevées.

Ce genre de procédure permet de prédire le comportement thermique de l'enrobé en relation avec les grandeurs de ses caractéristiques viscoélastiques actuelles qui sont des fonctions de l'évolution de la température.

* Notion sur la résistance de traction

L'essai du retrait empêché le plus couramment utilisé pour étudier le comportement thermique de l'enrobé est TSRST (thermal stress restrained specimen test), il peut être utilisé pour étudier la fissuration en fonction d'une évolution connue de la température. Cet essai permet de réaliser des essais de relaxation et étudier la contrainte en fonction d'une évolution connue de la température, il permet de répondre à l'exigence de connaître cette limite.

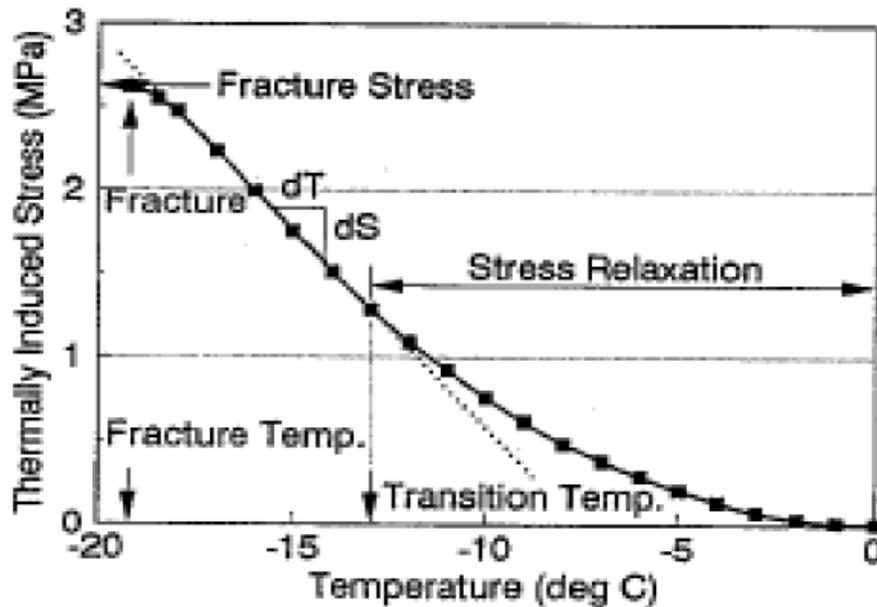


Figure 5.2 : essai TSRST. Evolution de la contrainte en fonction de la température, θ 0°C et -20°C avec une vitesse de -10°C/h (Olards, 2003)

Pour cet exemple deux zones distinctes apparaissent sur le graphique ci-dessus :

- La pente $\ll ds/dT \gg$, augmente graduellement jusqu'à une température de transition de -13°C , cette zone est caractériser par la présence du phénomène de relaxation (le comportement est linéaire donc on est dans le domaine élastique), la diminution de la pente près de la rupture est interpréter par la croissance de microfissure). La température de transition de la pente $\ll ds/dT \gg$ a un rôle important dans la caractérisation rhéologique du béton bitumineux à basses températures.

5.3.3.1 En élasticité

Le cas du domaine élastique peut simuler le comportement thermomécanique de l'enrobé à température normales, mais quand le matériau perd une importante de comportement viscoélastique (durcissement par vieillissement).

Cette approche du développement de contraintes thermiques au sein du matériau est principalement due à l'évolution de son élasticité avec la température.

a) cas d'une chute brutale de température $t_0=0^{\circ}\text{C}$

Dans le cas d'un gel rapide :

A $t=t_0$, $\theta(t)=\theta_0$;

Après t_0 , $\theta(t)=\theta_f$ jusqu'à t_f

t_f : temps de fin de refroidissement

θ_0 : température initiale constante

θ_f : température finale constante

Les caractéristiques viscoélastiques (du matériau se réduisent à une seule composante élastique) ;

La composante visqueuse devient négligeable, pour le bitume le module d'élasticité varie de 0,6 à 2G Pa (Beghin Alain, 2003). Il varie selon la température (2G Pa à 40°C) à 20Gpa pour des températures inférieure au point de congélation (Saucier, 1995).

La relation donnant la déformation thermique sera de la forme :

$$\varepsilon_{th}(t) = -\alpha(\theta_0 - \theta_f) \quad (5.2)$$

La relation donnant la déformation mécanique avec E : module d'élasticité

$$\varepsilon_{mec}(t) = \frac{\sigma(t)}{E} \quad (5.3)$$

ε_{th} et ε_{mec} sont des fonctions constantes, ainsi le retrait est empêchée

$$\varepsilon_{th}(t) + \varepsilon_{mec}(t) = 0 \quad (5.4)$$

La relation donnant la contrainte est de la forme :

$$\sigma(t) = \alpha(\theta_0 - \theta_f)E \quad (5.5)$$

La contrainte thermique ne dépend pas du temps, elle dépend que de paramètres constants (α , E, écart thermique) qui ne permettent pas sa relaxation dans le temps. Dans ce cas, le risque de fissuration fragile est plus grand.

La figure ci dessous montre un exemple de l'évolution la déformation thermique et la contrainte en fonction du temps, quand la température chute brusquement et cela dans différentes plages thermique.

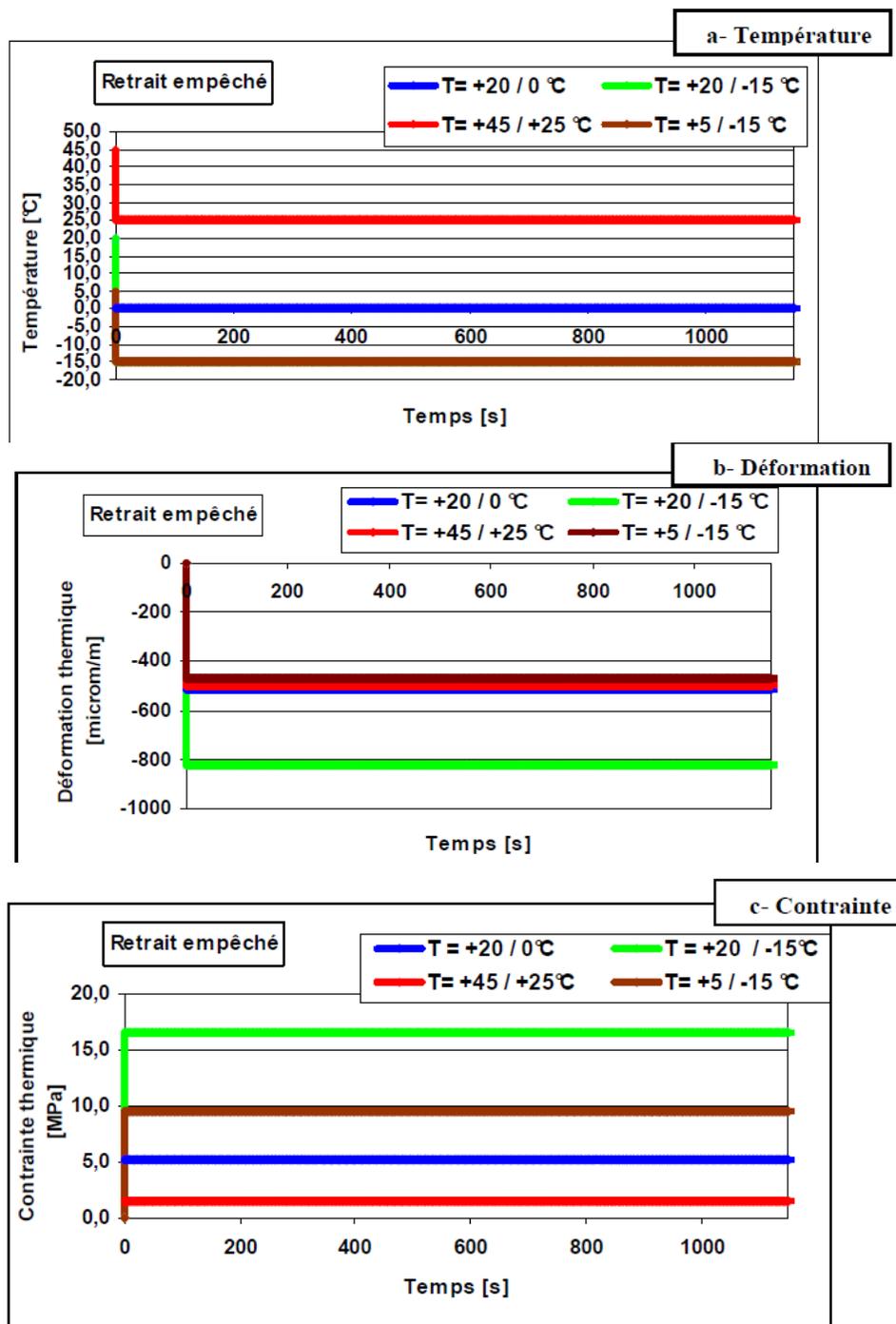


Figure 5.3 : courbes de variation de température, la déformation et la contrainte thermique (élasticité brusque ($\theta(t)$) du TSRST (Merbouh, 2010)

Les figures montrent que les déformations dépendent que des écarts thermiques, les retraits relatifs aux plages thermiques (+20°C/0°C, +45°C/25°C) ainsi de même grandeur.

Par contre, les niveaux de contraintes thermiques obtenues sont différents, et dépendent plus particulièrement de la valeur du produit « *Module élastique X écarts thermiques* », aux basses températures la raideur du matériau augmentent, le comportement élastique ne permet pas la relaxation des contraintes.

Quand la plage thermique est chaude des déformations peuvent exister, mais les contraintes développées seront relativement faible.

Le risque de fissuration augmente avec la baisse des températures et quand l'écart thermique est important.

b) cas d'une variation monotone de température

Le refroidissement progressif s'effectue de θ_0 à θ_f , pendant un temps t_1 relativement long, l'évolution de la température est de la forme :

$$\theta(t) = \frac{(\theta_f - \theta_0)}{t_1} t + \theta_0 \quad \text{Pour } t \leq t_1 \quad (5.6)$$

t_0 au début du refroidissement

$$\text{On aura} \quad \partial \varepsilon_{th}(\theta) = \alpha(\theta) \cdot \partial \theta \quad (5.7)$$

$\alpha(\theta)$ Est variable suivant le chargement imposé selon la loi proposé précédemment :

La déformation thermique est une fonction polynomiale de t qui a la forme :

$$\varepsilon_{th}(t) = \alpha(t) \left(\frac{\theta_f - \theta_0}{t_1} \right) \cdot t \quad (5.8)$$

Mais dans ce cas l'élasticité évolue avec la température ou le temps

$$\sigma(t) = \alpha(t) (\theta_f - \theta_0) \cdot E(t) \quad (5.9)$$

Les figures ci-dessus montrent les différentes évolutions.

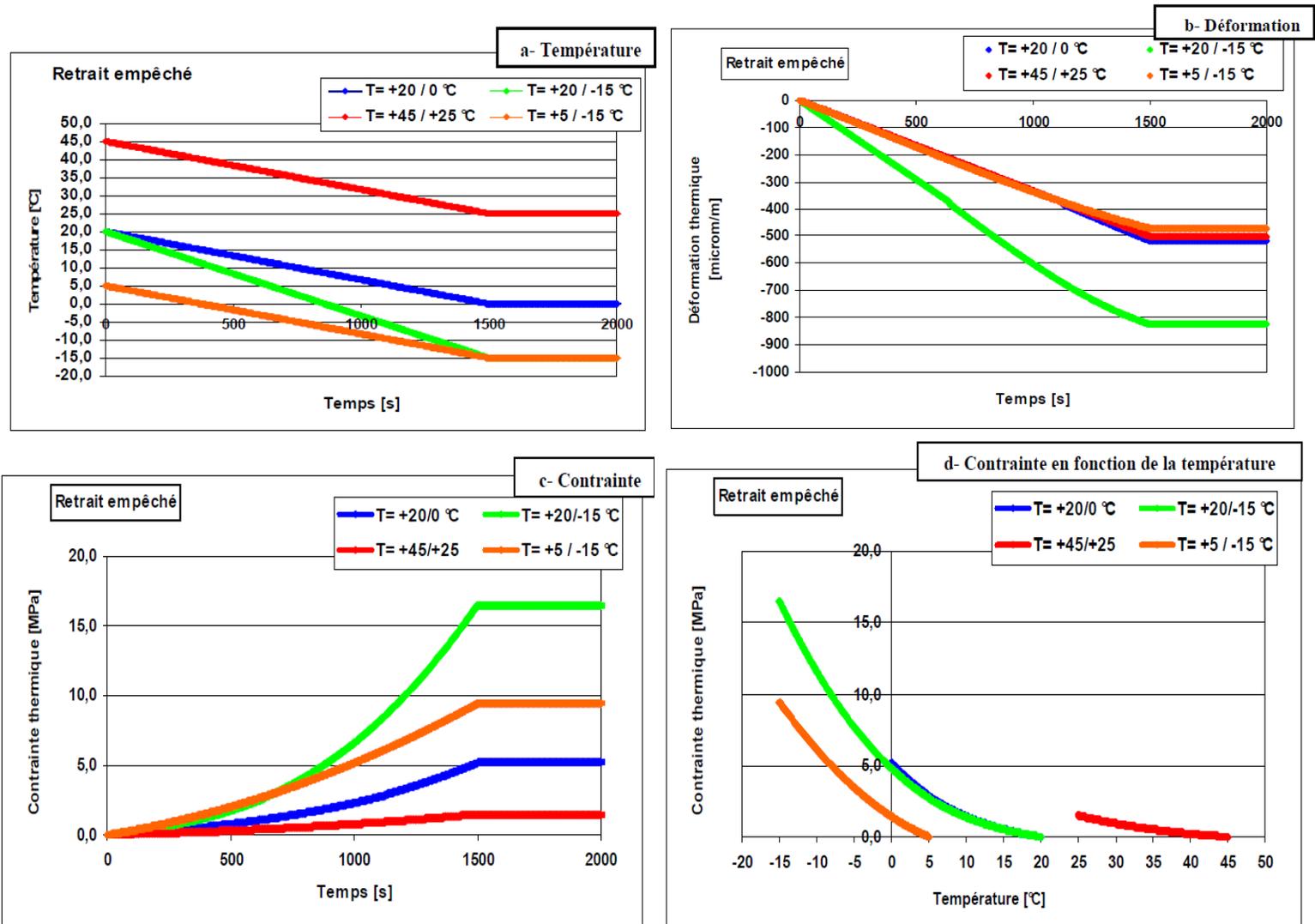


Figure 5.4 : Evolution de la température, la déformation et la contrainte thermique (Elasticité $\theta(t)$ linéaire) (Merbouh, 2010).

Quand le coefficient $\alpha(\theta)$ est constant ($\alpha > 5,0$ °C) les déformations sont linéaires et identiques, pour les trois plages thermiques de mêmes écarts (+45/+25 °C, +20/0 °C, +5/-15°C) et ne dépendent que de l'écart thermique. Les déformations augmentent quand l'écart thermique est important.

Dans ce cas les contraintes thermiques évoluent selon l'évolution de l'élasticité en fonction de la chute de température, dont la valeur maximale dépend aussi de l'écart thermique. Là encore, l'élasticité ne permet pas la relaxation des contraintes, quand la température reste constante. D'où les risques de fissuration, qui augmentent quand la température est basse et l'écart thermique est important.

5.3.3.2 En viscoélasticité linéaire

Le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux, est représenté selon le modèle analogique de Burger.

Le couplage entre la viscoélasticité et les effets thermique, qui induisent un retrait ou une dilatation, influe fortement sur les caractéristiques viscoélastiques.

La technique de modélisation mécanique est employée pour adapter les données rhéologiques rassemblées à ce matériau viscoélastique, où une combinaison des composants mécaniques (c.-à-d. des ressorts et des amortisseurs) qui peuvent décrire respectivement les aspects élastiques (Hookien) et visqueux (dashpot) du comportement. Ces modèles analogiques permettent de représenter le comportement mécanique d'un matériau viscoélastique sous une forme condensée et imagée, et permettent à ce titre de visualiser plus facilement le comportement du matériau du point de vue phénoménologique (Tshoel,N, W, 1989).

Le modèle de Burger (Fig.5.5), composé d'un modèle de Kelvin-Voigt « E_1, η_1 » associé en série avec un modèle de Maxwell « E_2, η_2 ». Ce modèle est plus général et peut mieux convenir au phénomène de relaxation de contrainte, avec :

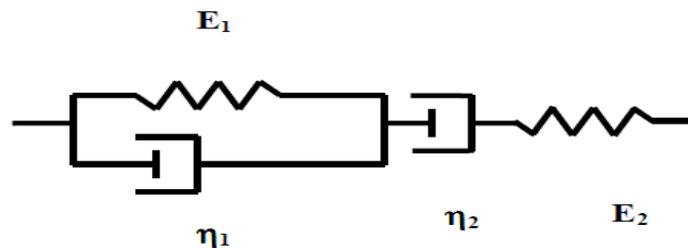


Figure 5.5 : Modèle analogique de Burger

η_1 : viscosité

E_1 : Rigidité

η_2 : viscosité

E_2 : Rigidité

Le modèle de burger constitue un outil simple et efficace pour prédire le comportement thermomécanique des enrobes bitumineux. D'après les résultats obtenu l'intérêt réside en tout particulier dans le fait qu'il est possible de simuler la réponse viscoélastique du matériau à tous types de sollicitations thermomécaniques (monotone, plage thermique....).

Le comportement décrit contrainte-déformation, dans le modèle est décrit en utilisant un modèle d'analyse (intégration-dérivation) qui peut être adapté aux conditions aux limites.

La variation de température de θ_0 à $\theta(t)$ est imposé, tel que :

θ_0 : température initiale et $\theta(t) = f(t)$ température finale.

La température imposée induit une déformation thermique $\varepsilon_{th}(t)$ fonction de θ_0 et $\theta(t)$

Le phénomène à étudier est la relaxation des contraintes sous une déformation thermique imposée ε_{th} , il consiste à appliquer au matériau une déformation et observer son évolution dans le temps.

Les lois de comportement viscoélastique des matériaux donnent le système d'équations différentielles suivant :

$$\varepsilon_2'(t) = \frac{\sigma'(t)}{E_2(t)} + \frac{\sigma(t)}{\eta_2(t)} \quad (5.10)$$

$$\eta_1(t) \cdot \varepsilon_1'(t) + E_1(t) \cdot \varepsilon_1(t) = \sigma(t) \quad (5.11)$$

Sachant qu'à $t=0$, on a : $\sigma(t) = 0$

$$\varepsilon_{méc}(t) = 0$$

$$\varepsilon_{th}(t) = 0$$

La déformation mécanique : $\varepsilon_{méc}(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$

Avec $\varepsilon_1(t)$: la déformation due à $E_1(t)$ et $\eta_1(t)$

Et $\varepsilon_2(t)$: la déformation due à $E_2(t)$ et $\eta_2(t)$

On a aussi la condition aux limites du retrait empêché :

$$\varepsilon_{tot}(t) = \varepsilon_{méc}(t) + \varepsilon_{th}(t) = 0 \quad (5.12)$$

L'équation différentielle générale à résoudre pour chaque cas de sollicitation thermique est :

$$\frac{E_1}{\eta_2} \sigma + \left(1 + \frac{E_1}{E_2} + \frac{\eta_1}{\eta_2}\right) \sigma' + \frac{\eta_1}{E_2} \sigma'' = E_1 \varepsilon'_{th} - \eta_1 \varepsilon''_{th} \quad (5.13)$$

La difficulté de la résolution numérique de cette équation vient de ce que dans les expressions précitées les paramètres du modèle proposé ($E_1(t), \eta_1(t), E_2(t), \eta_2(t)$) sont tous dépendant de la température.

Afin de déterminer les caractéristiques thermo-viscoélastiques du mélange. Des algorithmes numériques permettent de fixer ces caractéristiques à partir d'essais expérimentaux.

Pour bénéficier de ces résultats, une expression qui postule que le logarithme est utilisé dans chacun des paramètres viscoélastiques du modèle varie linéairement avec la température, sachant ses grandeurs pour deux températures différentes (θ_1 et θ_2) Soit par exemple pour la fonction $E_1(\theta)$:

Un algorithme de calcul est établi pour les quatre paramètres, donnant leurs valeurs de $E_1(\theta)$, $\eta_1(\theta)$, $E_2(\theta)$, $\eta_2(\theta)$ à chaque pas de température, en discrétisant le chargement thermique en pas de temps Δt suffisamment petits pour assurer une bonne représentation de la réponse mécanique.

$$E_1(\theta) = \exp [a\theta + b]$$

$$\text{Ou} \quad \ln E_1(\theta) = a\theta + b \quad (5.14)$$

Avec a et b : des constantes à déterminer selon les valeurs $E_1(\theta_1)$ et $E_1(\theta_2)$

Ce qui donnent les expressions a,b au paramètre E_1 .

Tel que

$$a = \frac{\ln E_1(\theta_1) - \ln E_1(\theta_2)}{\theta_1 - \theta_2}$$

$$b = [\ln t_1(\theta_1) + \ln t_1(\theta_2) - (\theta_1 - \theta_2)a]$$

a) chute brutale de température

D'une manière générale, dans ce type de modèle, les contraintes (déformations) déterminées à un temps de référence donné dépendent de toute l'histoire des contraintes (déformations) subies par le matériau auparavant. L'effet de ces contraintes (déformations) s'estompe progressivement. Ce comportement se manifeste également dans les bitumes et enrobés lorsque ceux-ci sont soumis à des températures ambiantes situées entre leur température de transition vitreuse (Merbouh, 1999)

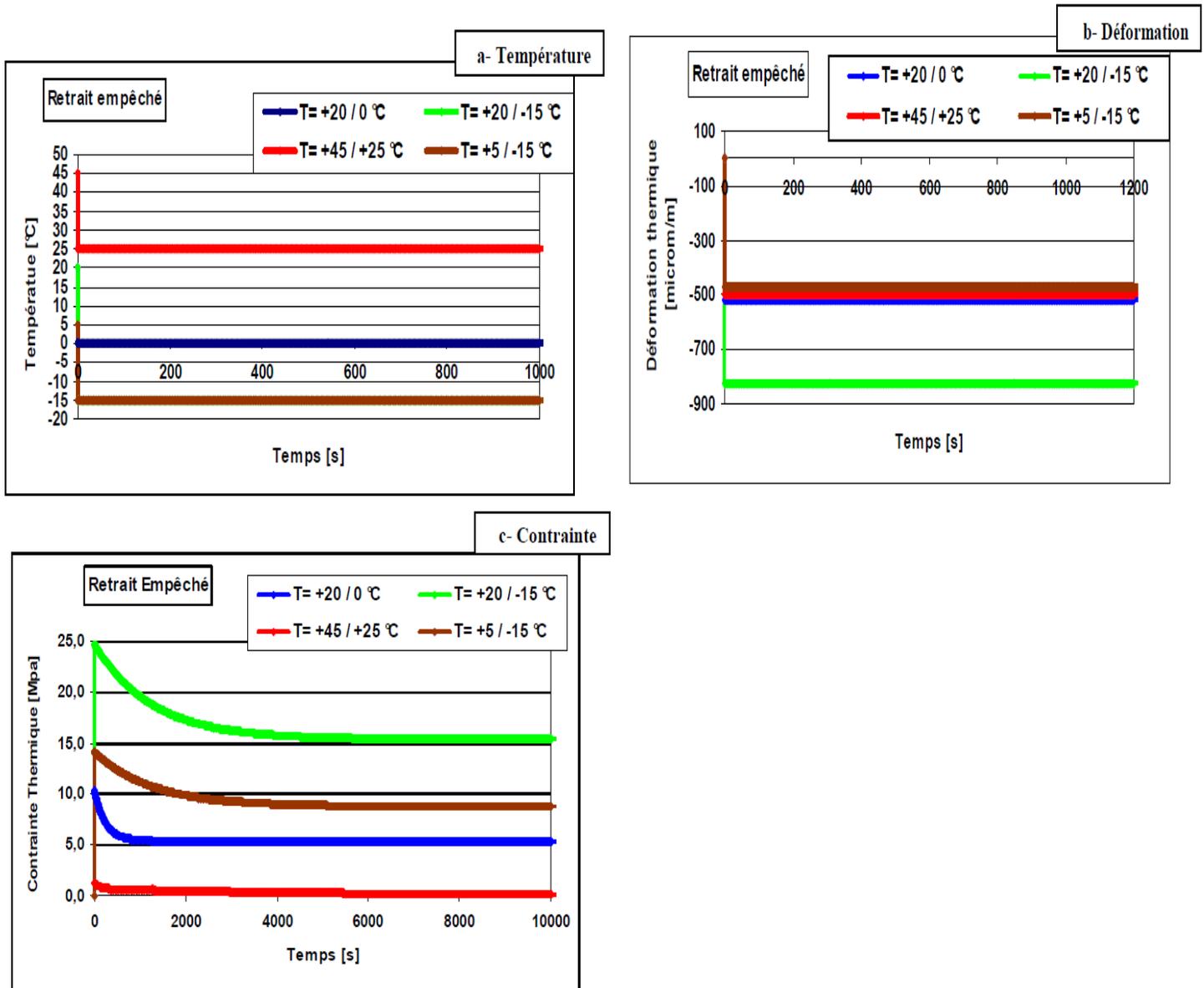


Figure 5.6 : évolution de la température, déformation, contrainte, en fonction du temps (Merbouh, 2010).

Plus la plage thermique est froide (cas de $\theta = +5/-15$ °C, $\theta = +20/-15$ °C), le taux de relaxation est relativement faible et on s'approche du comportement élastique. Quand la plage thermique est chaude, les contraintes développées sont plus faibles (cas de $\theta = +20/+0$ °C) voire minimales quand les températures sont plus élevées, la relaxation est plus rapide, où elle est totale pour la plage ($\theta = +45/+25$ °C).

La dissipation d'énergie aura lieu, puisque toutes les dérivées successives sont de signes alternées (Kaush, 2001). En effet lorsqu'on impose une déformation constante à l'ensemble, l'élément visqueux se déforme peu à peu, et la contrainte décroît.

5.3.4 Analyse de la déformation

Lors d'une baisse de température, il y a prédominance du caractère élastique (retrait important, légèrement diminué du coefficient $\alpha(\theta)$, qui conduit à un pic de traction.

Quand la température augmente le comportement visqueux est plus marqué (déformation importante, légèrement augmentée par la dilatation thermique, le passage à la contrainte de compression marquant un pic quand la température et la déformation sont au voisinage maximum (phase de relaxation).

5.3.4.1. Evolution des déformations et des contraintes en fonction du temps

Pour des plages thermiques de (45°C/25°C) les contraintes s'annulent par l'effet de relaxation du matériau (résultats obtenus par Bertaux, (Bertaux, 1996). Les contraintes sont totalement relaxées pour des températures qui sont très élevées.

5.3.4.2 Evolution des contraintes en fonction de la température

L'évolution des contraintes en fonction de la température garde la même allure pour chaque cycle (réchauffement/refroidissement).

L'augmentation des contraintes dans l'intervalle des basses températures, le comportement obtenu est quasi linéaire du matériau, où les pics de contrainte de traction les plus élevées peuvent augmenter les risques de fissuration thermique.

Pour des températures de (+45/+25 °C), les pics de contrainte de traction et de compression les plus faibles sont obtenus. Le risque de fissuration thermique est très faible.

Les contraintes thermiques sont largement relaxées. Cette plage est moins dangereuse vis-à-vis des risques de fissuration, mais elle entraîne des déformations relatives qui restent

importantes, un durcissement et un vieillissement sur site suivi d'une perte de qualité viscoélastique (fatigue thermique).

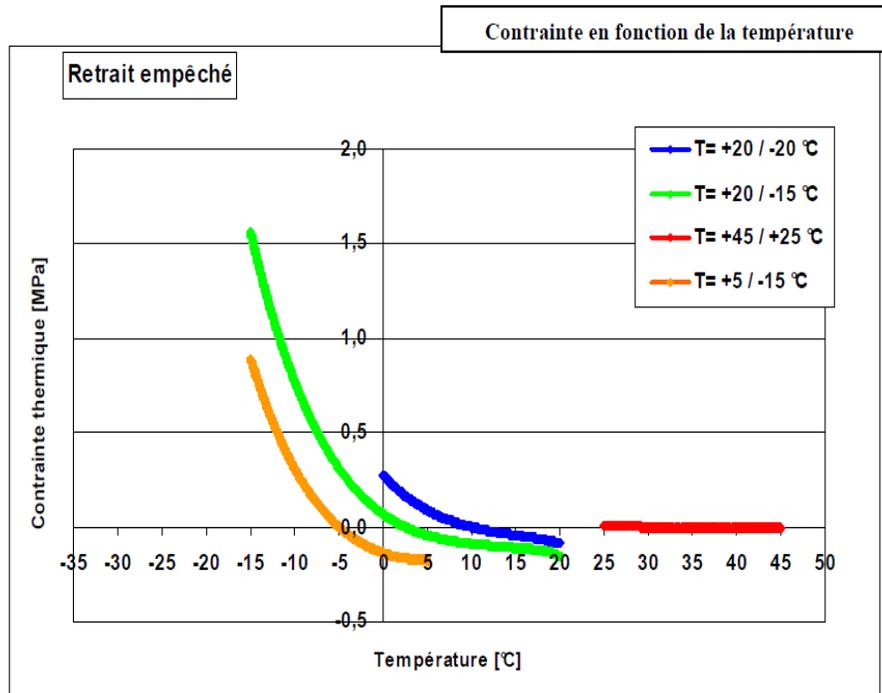


Figure 5.7 : exemple, évolution de la contrainte thermique en fonction de la température (Merbouh, 2010).

La marge de variation de la contrainte maximale (traction/compression) peut atteindre 2,0MPa, pour des cycles en climat hivernal rigoureux, comme elle peut atteindre 1,25MPa, pour des cycles hivernaux ordinaires (+20/-0°C).

Les contraintes sont nulle pour des températures (+45°C/+25°C), (les contraintes sont minimales et faibles la relaxation est totale).

Plus la plage thermique est froide (cas +5°C/-15°C), (+20°C/-15°C) le taux de relaxation est faible, le comportement est élastique.

Le phénomène de relaxation des contraintes apparaît quand la température devient constante, il dépend alors des caractéristiques viscoélastiques, c.-à-d. la contrainte de la température finale.

Le risque de fissuration augmente quand l'écart thermique est grand, et quand la température est basse.

5.4 Estimation du risque de fissuration

Les fissures se produisent à basse températures, suite à une dégradation des propriétés du matériau par le phénomène de la fatigue thermique.

Il n'existe pas de contraintes de traction pour laquelle le bitume se fissure, mais des températures de fissurations et les niveaux de contraintes qui leurs correspondent, se sont des points d'intersections des courbes de TSTRST avec les courbes de résistance à la traction.

Cette fissuration, se produit généralement à basses températures (inférieure à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Si on prend en considération les différences qui peuvent exister entre les résultats expérimentaux et de la littérature, ainsi que les différences de nature et de composition entre le matériau simulé et les matériaux testés expérimentalement (Heck, 2001), (Olards, 2004), le risque de fissuration thermique est probable, en particulier pour les cycles ($+20/-15\text{ }^{\circ}\text{C}$).

5.5 Conclusion

L'augmentation de contraintes pour les différents cycles de températures, mettent en avant des contraintes de tractions et des contraintes de compression.

Pour les plages de température ($+45^{\circ}\text{C}$ à 25°C) développent moins de contraintes que les autres plages. Pour les plages de ($+20^{\circ}\text{C}/-15^{\circ}\text{C}$ et $+5^{\circ}\text{C}/-15^{\circ}\text{C}$) développent des contraintes de tractions plus élevées. Ainsi il est à noter que des contraintes de compression peuvent exister lors des sollicitations cycliques, elles sont moins importantes que celles de tractions. On peut enfin observer que les températures élevées participent d'une façon considérable dans la relaxation des contraintes (Merbouh Mhamed, 2010).

Les résultats obtenus par notre simulation (voir chapitre4) :

- L'existence de contraintes de compression elles sont relaxer totalement (linéarité des courbes dans la couche bitumineuse) ;
- Les contraintes de traction d'amplitude faible ;
- Les courbes des contraintes déformation, ont la même allure pour les deux cas (réchauffement /refroidissement), (d'ou la linéarité des courbes)
- Les courbes de déplacement suivant les axes (xx) et (yy) augmentent avec l'augmentation des températures (courbe linéaire) ;
- Les courbes de contraintes croient en fonction de l'augmentation de températures imposées ;

La phase traction et compression est due aux variations des propriétés visqueuses et élastiques en fonction de la température.

Pour les plages thermiques les plus chaudes il existe des contraintes de compression et de tractions, ces contraintes sont largement relaxées, cette plages est moins dangereuse vis-à-vis de fissuration.

Le phénomène à souligner est la fatigue thermique en cycles (échauffement /refroidissement) qui provoque un durcissement du bitume (perte de qualité viscoélastique) ; le comportement viscoélastique du bitume neuf lui confère un caractère de résistance et de souplesses quand le matériau perd ce caractère il devient non déformable

«*rigide/Fragile* », d'ou l'importance de la considération de l'histoire thermique, afin d'évaluer leur durabilité dans le temps.

Enfin, on peut dire que les déformations engendrées par les contraintes thermiques jouent un rôle important dans le dimensionnement des structures, dans leurs comportements à long terme, car des désordres peuvent apparaitre sous forme de propagation de fissures, qui peuvent mettre en péril la durabilité de cette structure.

Ainsi il faut prendre en considération :

- La mesure de la variation des propriétés mécanique du matériau sur une longue période dans le temps ;
- La connaissance de l'histoire thermique et son influence sur la rhéologie des matériaux (vieillessement du matériau perte d'une certaine rigidité globale) ;
- La conception des matériaux durables à haute performance.

Conclusion

Les barrages sont des ouvrages de grande importance, destinés au stockage de l'eau, pour assurer cette fonction, ils doivent être étanche, pour se faire ils sont dotés d'organes de lutte contre les infiltrations. Avec l'avancement de l'âge du barrage, et en prenant compte des effets de changement climatique en termes de réchauffement, on constate que ces organes d'étanchéité subissent les effets néfastes de la température.

Le bitume est un matériau sensible à la température, ces caractéristiques sont en fonction de la température, (à basse températures et hautes températures). L'étude bibliographique nous a permis de mieux comprendre les comportements du béton bitumineux sous les effets thermiques engendrés par le climat extérieur.

Ce travail de recherche traite les aspects particuliers, liés à la modélisation numérique des contraintes thermiques induites dans la couche bitumineuse.

Le code ANSYS par éléments finis a été utilisé pour exécuter une analyse thermomécanique transitoire par la méthode couplée, en supposons que les propriétés thermiques du bitume sont dépendante de la température telle que la conductivité thermique.

D'après l'analyse des résultats obtenus :

- Les déformations obtenues sont de l'ordre de 10^{-5} (m/m) pour les températures de (35°C et 45°C) et de l'ordre de 10^{-4} (m/m) pour une température de (55°C) qui correspondent aux domaines linéaires.
- Les contraintes thermiques engendrées par les effets de la température (contrainte de traction et contrainte de compression) qui se relaxent grâce aux qualités viscoélastiques du matériau d'où linéarité des courbes.
- Les contraintes dépendent de la température imposée et de la profondeur de la couche du bitume.
- Pour les plages thermiques les plus chaudes il existe des contraintes de compression et de tractions, ces contraintes sont largement relaxées, cette plage est moins dangereuse vis-à-vis de fissuration.

Conclusion générale

Les contraintes thermiques sont largement relaxées pour les plages de températures simulées, elles sont considérées moins dangereuses vis-à-vis des risques de la fissuration mais elles peuvent entraîner des déformations relatives qui restent importante dans le temps, un durcissement et vieillissement sur site suivi d'une perte de qualités viscoélastiques.

Nous pouvons dire que le masque en béton bitumineux est certainement la solution la plus facile à réaliser et la plus économique pour les barrages en remblai.

Références bibliographiques

- ADDALA, F., Etude du comportement rhéologique des bitumes à moyenne et basse température. Mise au point d'un nouvel essai de torsion-compression d'éprouvette creuse (T.E.C.). Thèse présentée à l'Institut National des Sciences Appliquées, 1989.
- ADDACI BADRA, comportement mécanique des enrobés renforcés par la fibre de verre Mémoire de magister université de Batna 2008
- A.H. De Bondt: Anti-reflective cracking design of reinforced asphaltic overlays, PhD-Thesis, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology – 1999.
- AIRY.G,D , DUNHILL ST COLLOP,A,C,SCARPAS,A,J, "Determination of constitutive models parameters to stimulate ,asphalts mixture response" 6th RILEM, symposium of performance testing and evaluation o bituminous materials, Zurich avril 2003
- AIREY, G.D., RAHIMZADEH, B., COLLOP, A.C. "Viscoelastic linearity limits for bituminous materials". 6th international RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich. avril 2003.
- AMAR KHENNANE, Méthodes des éléments finis, Enoncé de principes de bases, office des publications universitaires, 1, place centrale de Ben-Aknoun (Alger) 1997
- ANDERSON, D,A, CHRISTENSEN D,W,BAHIA H, H, DONGRE, R, SHARMA, M,G,ANTELE,CE and Button,J Binder," characterization and evaluation volume,3,physical, characterization ,SHRP, final Report, strateg way,Research ,program, National, Research Concil, Wachington, DC,1994.
- ANSYS.ANSYS USER'S MANUAL REVISION, 10,1ST, ANSYS, INC, USA, 2004.
- ARAND W.: Behavior of asphalt aggregate mixes at low temperatures, proceeding of the 4th RILEM, Symposium on mechanical test of bituminous mixes, Budapest, pp. 68-84, 1990.
- ARMELLE LINDA, Nzumotcha Tchoumkam détection de fuite dans les barrages en remblai par la méthode de polarisation spontanée et par tomographie électrique : cas de la jonction de deux barrages en remblai, Département des génies civil, géologique et des mines École polytechnique de Montréal 2010,

Références bibliographiques

- BARGACH, M, MN, BOUKALOUCHE, cours de transferts thermique,(université Mohamed V (Rabat , Maroc),(2005,2006).
- BARENBLATT. G.I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Adv. Appl. Mech.*, 7:55–129, 1962.
- Asbek WFV, " Le bitume dans les travaux hydrauliques ", Vol II, Dunod, Paris, 1969
- BEGHIN ALAIN "Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux", Thèse de doctorat de l'université de paris 6-Pierre & mari curie, spécialité : physique et physico-chimie des polymères, pp.21, pp. 97 - Juin 2003.
- BELBACHIR K., MONTEL B, CHEVRIER L., "comportement des masques d'étanchéité en béton bitumineux des barrages du secrétariat d'état à l'hydraulique, Algérien" XI^{Emme}, ICOLD, Madrid, 1973.
- BONNIER, P. G, Testing, modeling and numerical analysis of the mechanical behaviour, of bituminous concrete, these de doctorat, Delf univesity 1993.
- BONNOT, J., "La détermination des propriétés des matériaux en vue du dimensionnement des chaussées". Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, janvier-février 1973, n°63, pp.73-82.
- BONNOT, J., "Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux rapport général". Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, juillet-août 1984, n°132, pp.79-90
- BOUNANDJ ZOULIKHA comportement mécanique du masque du barrage Bouhanifia (Algérie) en absence d'une protection thermique, université de BATNA, 2009.
- BRITICH PETROLIUM, site : www.bp.com : Propriétés des bitumes routiers, 2006.
- CALGARY, ALBERTA, Canada May Szostak-Chrzanowski¹ Michel Massiéra¹, Janelle Vautour¹, Yaya Coulibaly¹, Yousef Hammamji² et Anna comportement des barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment fondés sur des alluvions granulaires 1. Faculté d'ingénierie (génie civil), Université de Moncton, Moncton, NB, E1A 3E9, Canada23-26, 2006 / 23-26 Mai 2006

Références bibliographiques

- CHARIF, K Contribution à l'étude du comportement mécanique du béton bitumineux en petites et grandes déformations. Thèse de doctorat : Ecole Centrale Paris., janvier 1991.
- CONSEIL NATIONAL ECONOMIQUE ET SOCIAL, Rapport de la 4^o session « Avant projet de rapport ' L'eau en Algérie : le grand défi ',2000.
- CORDEL, S., DI BENEDETTO, H., MALOT, M., CHAVEROT, P., PERRATON, "Fissuration à basse température des enrobés bitumineux – essai de retrait thermique empêché et émission acoustique". 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, avril 2003.
- CORTE JEAN FRANÇOIS, HERVE DI BENEDETTO : "Matériaux routiers bitumineux 2, constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges", Edit. Hermes-Lavoisier, Paris, 2005.
- DAHMANI LAHLOU, Etude du comportement des enceintes des stockages sous des températures cryogéniques Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri, Tizi ousou. 2007
- DJEMILI LAKHDAR, mourad behim*, mohamed mansour chiblak, université badji-mokhtar, annaba, algérie comportement du masque d'étanchéité du barrage ghrib (Algérie) en absence de la protection thermique université de Damas, Damas, Syrie avril 2012.
- DI BENEDETTO, H, Modélisation du comportement du géomatériaux, application aux enrobés bitumineux et aux bitumes, thèse de doctorat d'état institut national technique Grenoble, septembre 1987.
- DI BENEDETTO, H., "Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique", *Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control, Proceedings of the Fourth Rilem Symposium*, Budapest, 1990.
- Di Bendetto, H.Descroit p. Binder-mix rheology: limits of linear domain, non-linear behavior -proc, 1st Eurasphalt and Eurobitume congress Strasbourg, 1996
- DI BENEDETTO, H., NEIFAR, M., "Coefficients de dilatation et de contraction thermiques d'un enrobé bitumineux avec et sans chargement mécanique",

Références bibliographiques

Mechanical Tests for Bituminous Materials, Proceeding of the 5th International RILEM Symposium, Lyon Mai 1997.

- DAVID DUREISSEIX, Méthode numérique appliquées a la conception par éléments finis, ENS de Cachan, puis université de Montpellier2 juillet 2000-Septembre 2003.
- DAVID DUREISSEIX, ENS de cachan "Méthode numérique appliquées à la conception par éléments finis, ENS de cahen, Université Montpellier, 2juillet 2000, Sepetembre 2003.
- DOMINIQUE MARCHIO ET PAUL REBOU, introduction aux transferts thermique, école des mines Paris (France), 2008.
- DOUBBANAH, E, "Comportement mécanique des enrobés bitumineux, des petites déformations", thèse de doctorat, institut, National, des sciences appliquées de Lyon, 1996.
- DUGDALE. D.S. Yielding of sheets containing slits. *J. Mech. Phys. Solids*, 8:100–104, (1960).J. Duriez et Arambide. *Nouveaux Trait´e de Matériaux de Construction*, volume 3. 1962.
- ERODOGAN MADENCI ,IBRAHIM GUVEN, ,The finite Element Method and application in Engineering using ANSYS, the university of Arizona2006.
- EPPS AMY: An approach to Examine Thermal Fatigue in Asphalt Concrete. (Vaughn Marker: Discussion with the Author). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 68, pp. 319-348, 1999.
- FERRY, J, D, "Viscoélastic, proprieties of polymers", 3rdEdn, JHON WILEYS, SONS, 1980.
- GERRITSEN, A.H C.A.P.M. VAN GURP, J.P.J. VAN DER HEIDE, A.A.A. MOLENAR, C. PRONK: Prediction and prevention of surface cracking in asphalt pavements, *Proceeding 6th Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor - vol 1– 1987.
- Griffith. A.A. "The theory of rupture". Pages 55–63, Delft, 1924. D.A. Grosch. "Relation between frcistion and viscoelastic properties of rubber". *Proc. Roy. Soc*, 1963.

Références bibliographiques

- GHOUILEM KAMEL, "impacte de fluage et de la temprature sur les organes de lutte contre les infiltrations dans les barrages, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ozou, 2014.
- H. Goacolou, J-P. Marchand, A. Mouraditis: Analysis of cracking in Pavement and the computation of the time of reflection, Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussées, n° 125, 1983
- Gurtin. M.E "On the energy release rate in quasi-static elastic crack propagation". *Journal of Elasticity*, 1979.
- HECK J. V, "Modélisation des déformations réversibles et permanentes des enrobés bitumineux – Application à l’orniérage des chaussées", Thèse de doctorat, Université de Nantes. 2001.
- HOOKS C.C. & W.H. GOETZ: Laboratory thermal expansion measuring techniques applied to bituminous concrete, Lafayette, School of civil engineering, Purde University, Indiana, Report AD-757419, 1964.
- HUET, C., *Rupture fragile des matériaux*, « Mécanique de la Rupture », Séminaire organisé avec le Laboratoire de Mécanique des Solides de l’Ecole Polytechnique par le Collège international des sciences de la construction, juin 1982, pp 3-34.
- IRWIN. G.R *Fracture. Encyclopedia of Physics*, volume 4. Springer-Verlag, Berlin, 1958.
- JOHNSON. K. L., *Contact Mechanics*, "ANSYS BOOK" Cambridge University Press (1985).
- KAOUANE MALIKA, Analyse des contraintes mécaniques et de fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique, mémoire de magister université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou 2011.
- KAUSCH Hans Henning Nicole HEYMAN, Christopher-John Plummer, Pierre Decroly : *Matériaux polymères : Propriétés mécaniques et physiques, principes de mise en œuvre*, N°14-Série traités des matériaux, pp.211-239, PPUR, Lausanne 2001.
- LEE, HJ. *Uniaxial constitutive modeling of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage Theory*. North Carolina state university 1996.

Références bibliographiques

- MARCIANO Y., BERTAUX J.M.: Low-temperature behaviour of asphalt mixes-thermostress model: a computer program for calculating thermal stresses in asphalt mixes”. *MTBM, Mechanical Tests for Bituminous Materials*”, Lyon, France, 1997.
- MERBOUH .M'HAMMED, contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux, influence des conditions extrême de température et trafic Thèse de doctorat. université de bordeaux, 21/12/2010.
- Michel Massiéra¹, Janelle Vautour¹, Yaya Coulibaly , Yousef Hammamji² et Anna Szostak-Chrzanowski¹ Faculté d'ingénierie (génie civil), Université de Moncton, Moncton, NB, E1A 3E9, Canada,26 Mai2006/
- MONDHER NEIFAR, H. DI BENEDITTO: Thermo-viscoplastic law for bituminous mixes, JRMPD, pp.89-91, Vol2-N°.01, 2001.
- MONISMITH, C.L., SECOR, G.A., SECOR, K.E., “Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete”, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 34, 1965.
- MORGAN MOZAS.G, ALEXIS GHOSN, IPEMED (institut de prospective économique du monde Méditerranée). octobre 2013.
- MUTIN G, « La Mitidja, décolonisation et espace géographique » O.P.U., Alger et CNRS, Paris, 1977.
- MUTIN G, « L'eau dans le monde arabe, enjeux et conflits. » Collection : carrefours degéographie, Ellipses, Paris. 156 p. 2000.
- NEIFAR, M., DI BENEDETTO, H., “Thermo-Viscoplastic Law for Bituminous Mixes”, international Journal of Road Materials and Pavement Design, Volume 2, Issue 1, 2001.
- OLARD, F., Etude et modélisation de comportement thermomécanique des enrobés bitumineux, Mémoire de recherche pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies de Génie Civil de l'Ecole Doctorale MEGA de Lyon, juillet 2000.
- OLARDS, F, comportement thermomécanique des enrobés bitumineux a basse température, relation entre les propriétés du liant de l'enrobé, institut national des sciences appliquées de Lyon Thèse de doctorat. 2003

Références bibliographiques

- OLARDS, F; DI BENDETTO H.DONY, A, VANISCOTE, J, C, "properties of bituminous mixture at low temperature and relation with binders characteristics", 6th RILEM, symposium of performance testing and evaluation of bituminous materials, Zurich avril 2003.
- PERENNES JJ. « L'eau et les hommes au Maghreb. Contribution à une politique de l'eau en Méditerranée ». Publié avec le concours du CNRS, Edition Khartala, Paris. 646 p, 1993.
- P. PLIYA, M.G DE MORAIS, A. Noumowe, "Comportement mécaniques d'origine Thermo-hydrigue développée dans un élément en béton exposé à une température élevée", Rencontre AUGC Bordeaux mai 2007.
- PUCCI, T. "Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux", Thèse de Doctorat EPFL Lausanne, 2000.
- RAMOND, G., SUCH, C., "Bitumes et bitumes modifiés. Relations structures, propriétés, composition". Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées – 168 - juillet-août 1990, pp 23-44.
- Rapport Régional sur la gestion des sédiments dans les barrages méditerranée, 13-1, IME (institut Méditerranée de l'eau), Marseille (France). Décembre 2010.
- REMINI BOUALEM * et j. m. Avenard ** la technique du barrage de chasse en Algérie the technical of the évacuation dam Algerian, Chargé de cours, Université de Blida, Lot 253 Baraki, Alger, Algérie Professeur, Université de Louis Pasteur, UFR de géographie, Strasbourg, France. 2001.
- REMINI B La problématique de l'eau en Algérie du nord, Larhyss Journal, ISSN 1112-3. Juin 2010.
- RICE J.R. ET G.F. ROSENGREN. Plane strain deformation near a crack tip in a power law creeping material. *Journal of mechanics and physics of solids*, 16:1, 1968.
- SALENÇON, J., *Viscoélasticité*. Cours de calcul des structures anélastiques. Paris : Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1983.

Références bibliographiques

- SAUCIER., F., CORMIER, B., DUCHESNE C.:" Introduction au dimensionnement et à la construction des chaussées en béton de ciment", Formation continue, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, pagination multiple, Université Laval, 1995.
- SAYEGH, G. "Viscoelastic properties of bituminous mixtures". In Proceedings of 2nd International, Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, pages 743–755, Ann Arbor.1967.
- SCHAPERLY. R.A On some path independent integrals and their use in the fracture of non linear viscoelastic media. *International journal of fracture*, 42:189–207, 1990.
- SHAHIN, M.Y, R. KIRCHNER, E. Blackmon: Analysis of Asphalt Concrete Layer Slippage and its Effect on Pavement Performance and Rehabilitation Design, Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan - Ann Arbor, July 1987.
- SCHIFFLER M « Pénurie mondiale d'eau et de nourriture – Faut-il se fier aux prévisions pessimistes ? in agriculture + développement rural, volume 9 n° 2, Frankfurt, Allemagne. SCHNETZLER J. 2002.
- SOHM, J. "Etude de la propagation des ondes dans les enrobés bitumineux". Mémoire de D.E.A., ENTPE. 2007.
- SOHM, J., HORNYCH, P., GABET, T. et DI BENEDETTO, H Cyclic, triaxial apparatus for the study of permanent deformations of bituminous mixes. In Proceedings of 12th, International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Nagoya, Japon 2010.
- STOFFELS S.M. & F.D. KWANDA: Determination of the coefficient of thermal contraction of asphalt concrete using the resistance strain gage technique, Annual meeting of the Association of Asphalt Paving Technologist, Baltimore, mars 1996.
- TOUATI B. « La dégradation quantitative de la ressource en eau : une sérieuse menace (cas de l'Algérie) ». Revue des Sciences Humaines n°24, décembre 2005, université de Constantine, pp 67-73. 2005.

Références bibliographiques

- TOUATI B « les potentialités hydriques et la phoeniciculture dans la vallée de l'Oued Righ (Bas Sahara algérien), Thèse de doctorat 3^o cycle, Université de Nancy II (France), 1986.
- TOUATI B," les Barrages, Politique hydraulique en Algérie, état, Diagnostic, et perspective d'un aménagement durable", université Mentouri, Constantine 2010.
- TRINTH, J ; MENEZES, N.C, FAIBAIRN, E,M "Effects of thermal gradients in cylindrical tanks", in 3rd, int. Stmposieum on off- shore ; Eng, BRAZIL 83, Pentech press.London,1984.
- TRUCHOT C., 2006 « La politique de l'eau en France et ses perspectives d'évolution », Rencontre internationale sur la gestion intégrée des ressources en eau, ABHCSM Constantine, 1 8-19 mars 2006.
- Vergne A., C. Petit, X. Zhang, S. Caperaa & B. Faure : Simulation numérique de la remontée d'une fissure dans une structure routière– Proceeding of the 1st RILEM conférence on the réflective cracking in pavement – Liège – 1989.
- VINSON, N. T.S. JACKSON: Analysis of thermal fatigue distress of asphalt concrete pavements, Proceeding 75th annual meeting of the T.R.B. in Washington, 1997.
- VINSON, T.S. N.M. JACKSON, & D.H. JUNG: Thermal Cracking resistance of asphalt concrete an experimental approach, 7th International conference on asphalt pavements – pp; 395-409 – 1992.
- WILSON, E, L;BATHE,K-J PETERSON ,FE "Finite element analysis of linear and non linear heat transfer" .J, Nucl,eng,Des,Vol29,P110-124. 1974.
- YANN LEFFEUVRE, Contribution du comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestations de l'endommagement, Ecole nationale des ponts et chaussées28Mars 2001
- YAN, X.L, Comportement mécanique des enrobées aux bitumes polymères, (styrelf). Utilisation de l'essai triaxiale de révolution, thèse doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, Avril 1992.
- ZIENKIEWICZ, O, C.; OWEN, DRJ, al," Finite element method in the analysis of reactor vessels "J, NUCL, ENG. DES, VOL20, 1972.

ANNEXE1

Suite des tableaux de répartition des barrages en Algérie :

MINISTERE DES RESSOURCES EN EAU
AGENCE NATIONALE DES BARRAGES ET TRANSFERTS

Perte=évaporation+fuite+déversement+lacher vidange de fond

REGION	N°	Barrages	WILAYA	Capacité dernier levé (Millions m ³)	Volume 31/05/2009 (Millions m ³)	Volume 31/05/2010 (Millions m ³)	AFFLUENT (m ³) 31/05/2010	DEFFLUENT (m ³) 31/05/2010			Taux de Remplissage
							Apport	AEP	IRR	PERTE	%
OUEST	1	Beni-Bahdel	Tlemcen	54,63	52,97	47,45	42 000	38 000	45 000	25 000	86,85
	2	Meffrouch	Tlemcen	14,99	13,94	10,94	6 000	15 000	0	6 000	72,96
	3	H-Boughrara	Tlemcen	175,45	159,14	142,01	181 000	40 000	0	219 000	80,94
	4	Sikkak	Tlemcen	25,50	25,35	25,50	31 000	19 000	0	12 000	100,00
	5	Sidi-Abdelli	Tlemcen	106,61	78,42	82,54	11 000	45 000	0	27 000	77,42
	6	Sarno	Sidi Bel Abbes	21,25	6,74	5,29	6 000	0	0	6 000	24,88
	7	Cheurfas II	Mascara	70,21	46,94	30,45	33 000	50 000	0	17 000	43,37
	8	Ouizert	Mascara	93,91	56,02	38,05	50 000	0	0	87 000	40,51
	9	Bou-Hanifia	Mascara	38,11	36,93	28,64	17 000	12 000	0	5 000	75,16
	10	Fergoug	Mascara	0,40	0,21	0,15	19 000	29 000	0	2 000	37,25
	11	Kramis	Mostaganem	45,38	24,13	25,72	22 000	9 000	0	13 000	56,68
	12	Djorf-Torba	Béchar	260,25	229,57	148,19	145 000	40 000	259 000	256 000	56,94
	13	Brezina	El Bayad	108,47	62,15	65,88	0	0	2 000	46 000	60,74

ANNEXE1

S/Total				1015,16	792,51	650,80	563 000	297 000	306 000	721 000	64,11	
CHELIFF	14	S.M.B.A	Relizane	153,71	135,55	131,06	0	26 000	69 000	32 000	85,26	
	15	Bakhadda	Tiaret	39,94	39,94	39,94	75 000	33 000	0	42 000	100,00	
	16	Dahmouni	Tiaret	39,52	39,46	39,52	0	0	0	22 000	100,00	
	17	Gargar	Relizane	358,28	184,52	245,77	94 000	100 000	84 000	90 000	68,60	
	18	Merdja-S-Abed	Relizane	47,97	16,94	20,67	0	0	0	54 000	43,10	
		B-Boukadir	Chlef	Remplissage par pompage du barrage Merdja Sidi Abed : 0 hm ³								
	19	Sidi - Yacoub	Chlef	252,85	133,48	192,06	62 000	54 000	104 000	58 000	75,96	
	20	Koudiat Rosfa	Tissemsilt	75,00	38,00	55,31	14 000	5 000	0	9 000	73,75	
	21	Oued-Fodda	Chlef	102,85	42,68	47,25	59 000	4 000	184 000	24 000	45,94	
	22	Oueld Mellouk	Ain-Defla	127,00	49,65	50,44	0	0	99 000	40 000	39,72	
	23	Harreza	Ain-Defla	76,65	12,39	18,33	0	0	74 000	3 000	23,92	
		T-Khmis	Chlef	Transfert vers Harreza : 0 hm ³								
	24	S M Bentaiba	Ain-Defla	75,00	72,86	74,15	36 000	0	115 000	21 000	98,87	
	25	Ghrib	Ain-Defla	116,32	116,32	115,21	82 000	28 000	138 000	23 000	99,05	
	26	Boughzoul	Médéa	20,27	14,39	13,87	75 000	0	0	75 000	68,42	
	27	Deurdeur	Tissemsilt	105,12	34,97	32,39	0	4 000	81 000	17 000	30,81	
	28	C ^{ol} Bougara	Tissemsilt	11,32	11,32	11,32	17 000	0	0	17 000	100,00	
	29	Prise chélif (MAO)		50,00	-	23,44	0	0	0	0	46,88	
	30	Kerrada	Mostaganem	65,00	-	4,04	0	0	0	0	6,21	
	S/Total				1601,80	942,47	1087,30	514 000	254 000	948 000	527 000	67,88

REGION	N°	Barrages	WILAYA	Capacité dernier levé (Millions m ³)	Volume 31/05/2009 (Millions m ³)	Volume 31/05/2010 (Millions m ³)	AFFLUENT (m ³) 31/05/2010	DEFFLUENT (m ³) 31/05/2010			Taux de Remplissage
							Apport	AEP	IRR	PERTE	%
CENTRE	31	Bouroumi	Ain - Defla	181,86	69,99	74,25	69 000	92 000	89 000	1 000	40,83

ANNEXE1

	T-Chiffa	Médea	Transfert vers Bouroumi : 0,038 hm³								
	T-Harbil	Médea	Transfert vers Bouroumi : 0,023 hm³								
32	Meurad	Tipaza	0,20	0,20	0,20	3 000	0	2 000	1 000	97,50	
33	Ladrat	Médea	8,47	8,46	8,38	0	0	7 000	0	98,88	
34	Boukourdane	Tipaza	105,00	33,19	40,99	22 000	37 000	0	17 000	39,04	
	Nador	Tipaza	Transfert vers Boukourdane : 0,007 hm³								
35	Keddara	Boumerdes	142,39	141,33	130,74	19 000	252 000	0	19 000	91,81	
36	Beni-Amrane	Boumerdes	11,85	4,30	3,53	243 000	Transfert : 0 hm³		2 000	29,81	
37	Hamiz	Boumerdes	15,53	14,88	14,46	13 000	0	17 000	8 000	93,12	
38	Lekhal	Bouira	27,16	17,43	14,95	18 000	12 000	39 000	0	55,06	
39	Tilesdit	Bouira	164,55	164,47	163,45	0	33 000	0	1 000	99,33	
40	Taksebt	Tizi-Ouzou	181,02	180,91	170,61	494 000	360 000	0	31 000	94,25	
41	Tichy-Haf	Bejaia	81,80	81,80	81,80	133 000	38 000	0	95 000	100,00	
42	K-accerdoune	Bouira	640,00	109,67	210,57	0	0	0	0	32,90	
S/Total			919,83	716,96	703,34	1 014 000	824 000	154 000	175 000	76,46	
EST	43	K'Sob	M'sila	12,34	12,34	12,34	530 000	0	56 000	404 000	100,00
	44	Ain Zada	Bourj-Bou-Arreidj	121,40	119,92	97,37	212 000	80 000	0	34 000	80,21
	45	El Agrem	Jijel	33,04	32,71	32,02	5 000	18 000	0	5 000	96,91
	46	Kissir	Jijel	68,00	-	68,00	125 000	0	0	416 000	100,00
	47	Boussiaba	Jijel	120,00	-	45,68	165 000	0	0	0	38,06
	48	Beni Haroun	Mila	960,00	576,76	611,31	1 142 000	Transfert : 0,364 hm³		139 000	63,68
	49	Oued Athmania	Mila	33,25	32,57	32,65	373 000	264 000	0	0	98,19
	50	H Grouz	Mila	40,15	12,08	14,44	8 000	0	0	8 000	35,97
	51	Beni-Zid	Skikda	39,39	39,39	39,39	49 000	19 000	0	30 000	100,00
	52	Guenitra	Skikda	117,82	108,50	115,34	83 000	61 000	0	22 000	97,89
	53	Zardezas	Skikda	18,68	13,54	11,70	34 000	18 000	0	16 000	62,63
	54	Zit El Emba	Skikda	116,59	116,59	114,96	73 000	30 000	8 000	35 000	98,60
	55	H Debagh	Guelma	184,35	155,36	143,17	0	47 000	148 000	15 000	77,66

ANNEXE1

56	Oued Cherf	Souk-Ahras	152,65	137,13	134,03	130 000	0	0	17 000	87,80
57	Ain Dalia	Souk-Ahras	76,08	53,37	30,76	0	68 000	0	7 000	40,44
58	F D Gazelles	Biskra	54,74	54,74	44,45	17 000	0	37 000	31 000	81,21
59	F E Gherza	Biskra	14,89	14,89	11,78	0	0	0	29 000	79,09
60	Koudiat Medouar	Batna	74,32	74,32	57,37	0	46 000	0	20 000	77,19
61	F E Gueiss	Khenchla	0,43	0,43	0,43	103 000	0	0	109 000	100,00
62	Babar	Khenchla	38,01	37,85	34,94	44 000	0	0	8 000	91,93
63	Cheffia	El Tarf	158,83	146,82	121,15	272 000	141 000	30 000	13 000	76,28
64	Mexa	El Tarf	30,27	30,27	30,27	2 542 000	85 000	0	1 156 000	100,00
65	Bougous	El Tarf	120,00	-	5,66	0	0	0	0	4,72
S/Total			2277,23	1769,57	1689,86	5907000	877 000	279 000	2 514 000	74,21
TOTAL GENERAL			5814,02	4221,51	4131,31	7 998 000	2 252 000	1 687 000	3 937 000	71,06

NB Les données des Barrages Bougous , Kissir,Boussiaba ,K,Acerdoune , Kerrada et la prise de chelif (MAO) ne sont pas comptabilisées en volume mobilisé et en capacité

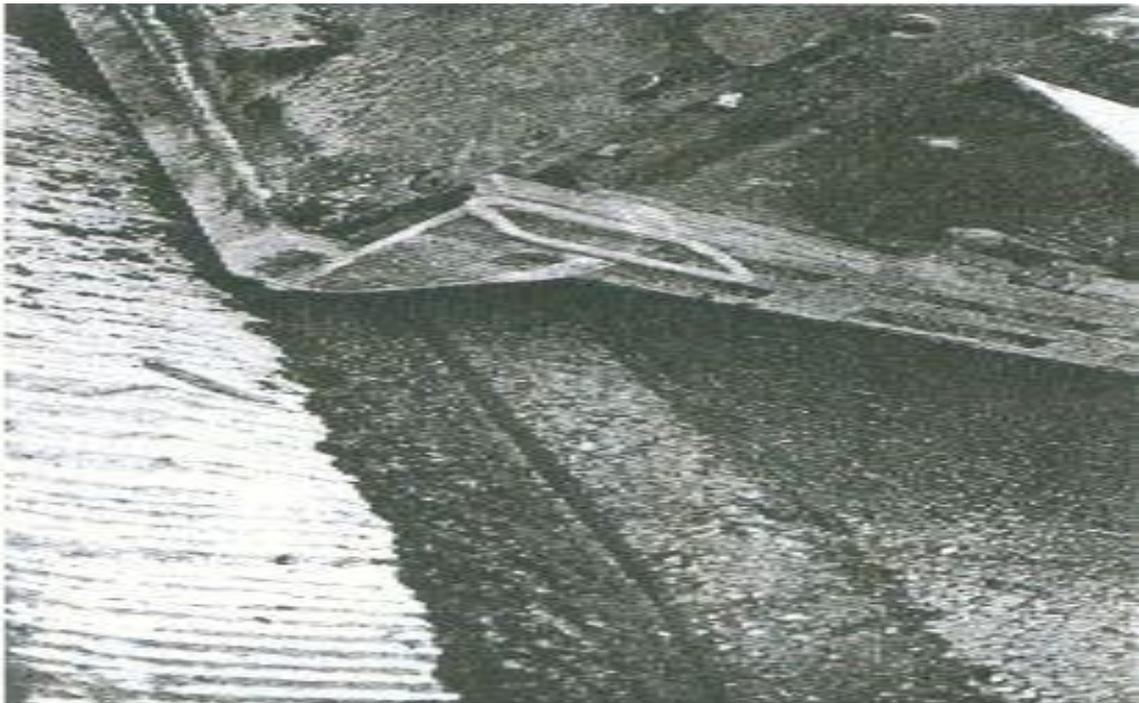
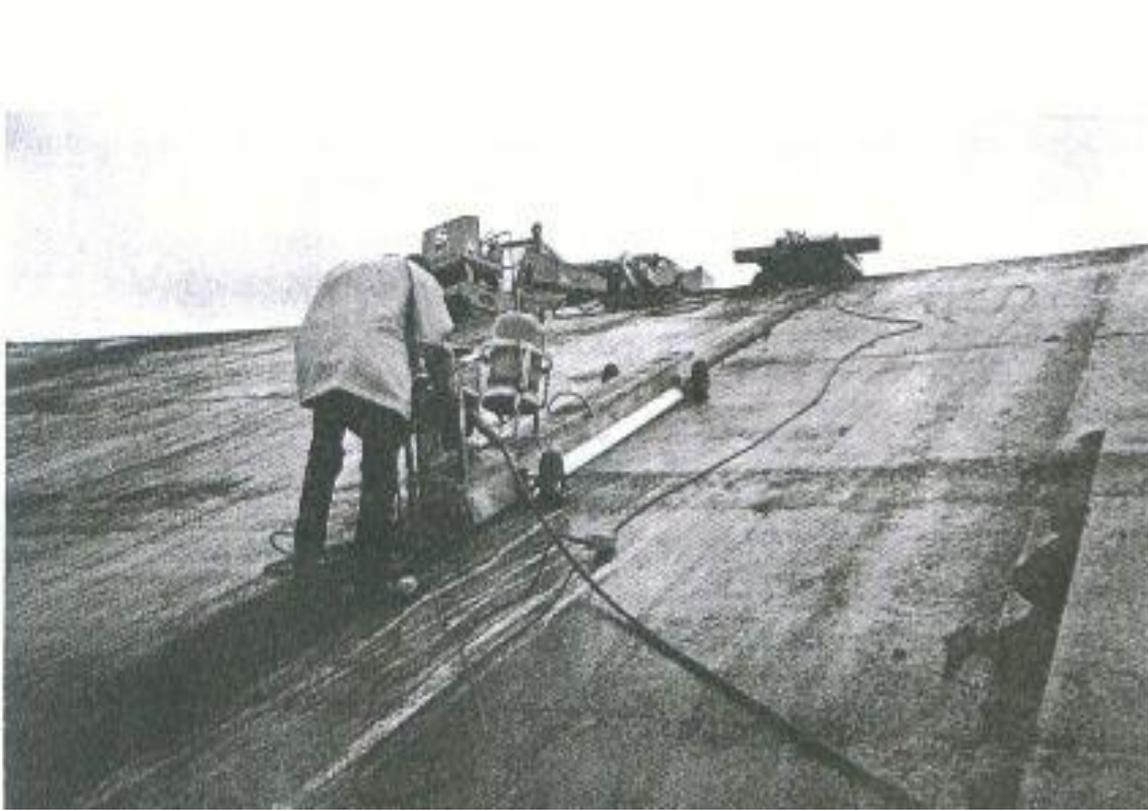
OUED	TYPE	ANNEE MISE EAU	CAPACITE INITIALE Hm ³	Capacité dernier levé (Millions m3)	VOLUME REGUL, Hm ³ /AN	ENVAS. ANNUEL Hm ³ /AN	DESTINATION
TAFNA	VOUTES	1946	63,00	54,63	48	0,2	AEP - Oran AIN-TEMOUCHENT et TLEMCEN IRR. Périmètre Maghnia
MEFFROUCH	VOUTES	1963	15,00	14,99	17	0,12	AEP - Tlemcen
TAFNA	TERRE	1999	177,00	175,45	59	0,43	A.E.P Oran et Maghnia IRR. Tafna
SIKKAK	TERRE	2004	27,00	25,50	25		AEP de TLEMCEN et IRR plaine deNENNAYA
ISSER	TERRE	1988	110,00	106,61	50	0,18	A.E.P Oran et Ain - Temouchent
SARNO	TERRE	1954	22,00	21,25	10	0,12	AEP -SIDI- Hamadouche (S.BEL-ABBES)
MEBTOUH	BETON	1992	82,00	70,21	45	0,36	IRR. Sig
TARIA	TERRE	1986	100,00	93,91	TRANSF.	0,3	Transfert Bou-Hanifia
EL-HAMMAM	ENR.	1948	73,00	38,11	TRANSF.	0,78	Transfert Fergoug AEP - Sfisef et Bouhanifia - IRR. Hacine

ANNEXE1

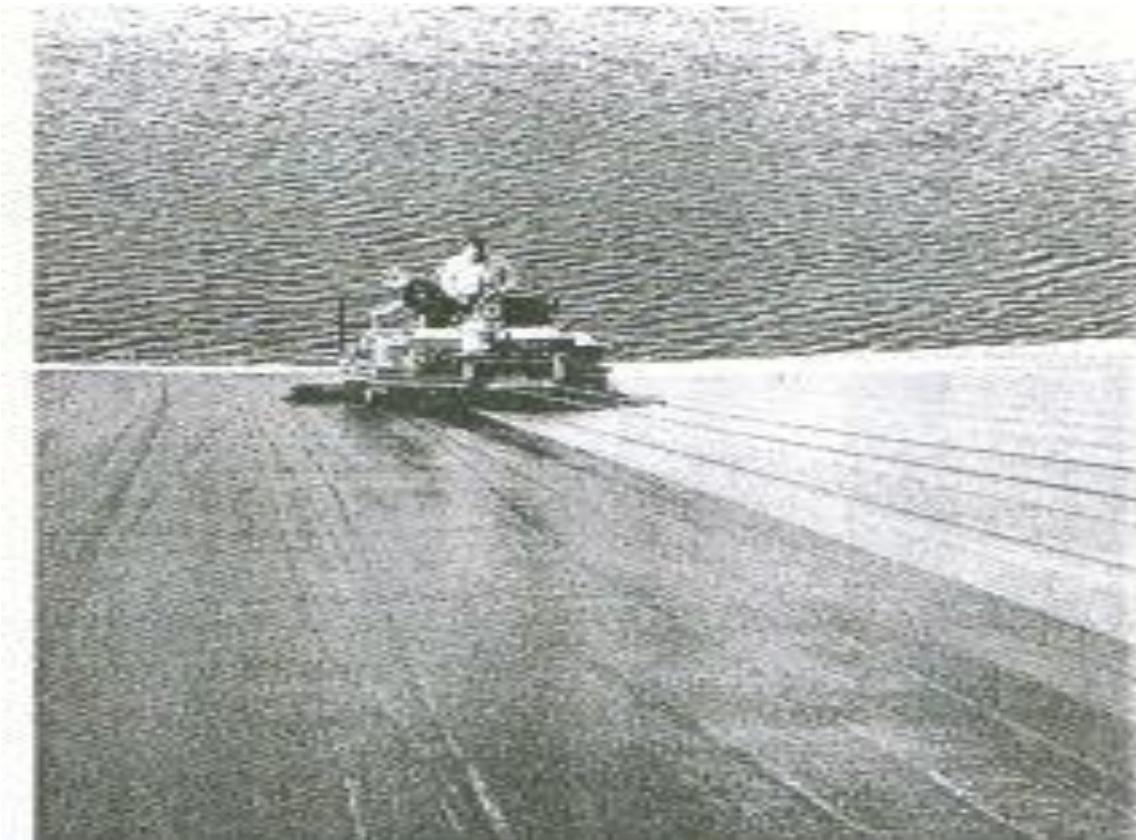
EL-HAMMAM	TERRE	1970	18,00	0,40	93	1,5	AEP Oran, Mohamadia et localités avoisinantes ; A.E.I - Arzew IRR. Périmètre Habra
OUED KRAMIS	TERRE	2005	45,38	45,38	25,37		AEP localités de Achaacha, Boughanem, Nekmaria, Khadra, Sidi Lakhdar IRR périmetre de 4 300 HA
GUIR	POIDS	1969	350,00	260,25	100	1,3	A.E.P Béchar et Kenadsa IRR. Périmètre Abadla
MOUILEH	POIDS	2000	122,50	108,47	11,5	1,2	IRR. Brezina
MINA	TERRE	1978	235,00	153,71	100	1	A.E.P Relizane IRR. Périmètre Mina
MINA	ENR.	1936/S 1959	56,00	39,94	44	0,27	A.E.P Tiaret IRR. Tiaret
NAHR-OUSSAL	TERRE	1987	41,00	39,52	9	0,4	IRR. Tiaret
OUED-RHIOU	TERRE	1988	450,00	358,28	120	4,5	A.E.P Oran IRR. Relizane
CHLEF	TERRE	1984	54,90	47,97	40	0,59	IRR. Périmètre Bas Cheliff
ARDJEN	TERRE	1985	280,00	252,85	98	0,17	A.E.P CHLEF IRR. Périmètre Moyen et Bas Cheliff
OUED FODDA	TERRE	2004	75,00	75,00	21		AEP de TISSEMSILT
FODDA	POIDS	1932	228,00	102,85	69	2,66	IRR. Périmètre Moyen Cheliff
ROUINA	TERRE	2003	127,00	127,00	38		AEP Rouina, Bourached, Zeddine, EL-Mayenne IRR. Périmètre Del-Amra, Abadia, et Rouina
HARREZA	TERRE	1984	70,00	76,65	23	0,28	IRR. Périmètre Haut Cheliff
Oued Abda	TERRE	2005	75,00	75,00			
CHLEF	ENR.	1939	280,00	116,32	105	3,2	A.E.P Médea, Berrouaghia et Alger IRR. Périmètre Haut Cheliff
NAHR-OUSSAL	TERRE	1934	55,00	20,27	TRANSF.	0,66	Transfert Ghrib
M.TIGHZIR	TERRE	1984	115,00	105,12	40	0,83	A.E.P Tissemsilt IRR. Périmètre Haut Cheliff
NAHR-OUSSAL	TERRE	1989	13,00	11,32	5,5	0,3	IRR. Par Pompage Tiaret et Tissemsilt

Source ANBT

Photo A.3 Exemples de la mise en place de la couche bitumineuse (Asbek, wFw, 1969).



ANNEXE 2



Rappel de mécanique des milieux continus

1.1 Introduction

La rhéologie s'intéresse au comportement des matériaux sous contraintes mécanique.

La mécanique des milieux continus permet de relier les tenseurs de contraintes et des déformations dans le cas de faibles sollicitations. L'hypothèse de faibles déformations permet de considérer la réponse du matériau comme linéaire.

Dans le cas général, l'équation rhéologique d'état d'un solide élastique s'écrit sous la forme :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1.1)$$

Ce qui définit un tenseur des coefficients élastiques C , σ_{ij} , ε_{kl} sont respectivement les composantes des tenseurs de contraintes et déformation.

Dans le cas d'un matériau isotrope seules deux composantes sont indépendantes et la loi de Hooke s'écrit :

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \text{tr}(\varepsilon) + 2G \varepsilon_{ij} \quad (1.2)$$

λ et G sont les constantes de Lamé. G est le module de cisaillement.

Dans le cas d'une expérience de traction uniaxiale on définit le module de Young $E = \sigma_{11} / \varepsilon_{11}$ et le coefficient de poisson $\nu = -\sigma_{22} / \varepsilon_{11}$ que l'on peut relier aux coefficients de Lamé par les relations :

$$E = \frac{(2G+3\lambda)}{G+\lambda} \quad (1.3)$$

Et

$$E = \frac{\lambda}{2(G+\lambda)} \quad (1.4)$$

Le comportement d'un corps viscoélastique linéaire est intermédiaire entre le comportement du solide élastique et celui du liquide Newtonien.

La contrainte imposée ne dépend pas seulement de la déformation actuelle du corps mais aussi des déformations qu'ils subies dans le passé. Dans le domaine linéaire, l'additivité des déformations et des contraintes qui en résultent se traduit par la relation :

$$\sigma(t) = \varepsilon(0)r(t) + \int_0^t r(t-r) \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau \quad (1.5)$$

Ou :

σ est la contrainte

ε est la déformation

$\dot{\varepsilon}$ est la vitesse de déformation

τ est le temps de relaxation

et $r(t)$ est appelée fonction de relaxation .

1.2 Equation de cinématique

a) La relation déformation-déplacement

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (1.6)$$

Avec $\bar{\varepsilon}$, tenseur des déformations infinitésimales

Conditions de compatibilité

$$\nabla \cdot (\nabla \cdot \bar{\varepsilon})^T = 0$$

Conditions d'équilibre :

$$\nabla \cdot \sigma + \rho \vec{f} = 0$$

Avec :

ρ : Densité du matériau et \vec{f} : densité de force par unité de volume.

-conditions aux limites :

$$u = \vec{u} \quad q^i \in A_u ; \quad \sigma \cdot n = \vec{p} \quad q^i \in A_p .$$

Où \vec{u} est le vecteur déplacement, \vec{p} vecteur des forces surfacique et n est la normale à la surface A_p .

Les vecteurs \vec{f} , \vec{p} , \vec{u} sont en fonction du temps et de coordonnées. Le tenseur des déformations infinitésimales $\bar{\varepsilon}$ est décomposé en tenseur de déformation : élastique et thermique comme suit :

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^{el} + \bar{\varepsilon}^{th}$$

Le tenseur de contrainte est donné sous forme de loi de Hook généralisée comme suit :

$$\bar{\sigma} = c(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}^{th}).$$

C : tenseur d'élasticité isotopique donné sous la forme suivante :

$$C = \lambda l \otimes I + G(e_K \otimes I \otimes e^K + e_i \otimes e_K \otimes e_i \otimes e_K)$$

ANNEXES 2

Ou λ et μ sont des constantes de Lamé données comme suit :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \lambda = \nu E / ((1+\nu)(1-2\nu)) \quad (1.7)$$

E : Module de rigidité, G est le module de cisaillement, ν coefficient de poisson.

Si le solide est isotropique est soumis à une température de T_0 à T, les déformations thermiques deviennent :

$$\varepsilon^{th} = \alpha_T \Delta T l, \Delta T = T - T_0$$

Avec α_T est le coefficient d'extension thermique.

b) Représentation des vecteurs matrices

- Vecteur contrainte σ	$\sigma^T = [\sigma_{11} \sigma_{22} \sigma_{33} \sigma_{12} \sigma_{23} \sigma_{31}]$
-Vecteur de déformation ε	$\sigma^T = [\varepsilon_{11} \varepsilon_{22} \varepsilon_{33} \gamma_{12} \gamma_{23} \gamma_{31}]$
-Vecteur déplacement u	$u^T = [u_1 \ u_2 \ u_3]$
-Vecteur de déformation thermique ε^{th}	$\varepsilon^{th} = [\alpha_{\tau 1} \Delta T \ \alpha_{\tau 2} \Delta T \ \alpha_{\tau 3} \Delta T \ 0 \ 0 \ 0]$
-Vecteur force volumique \vec{f}	$\vec{f}^T = [f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]$
-Vecteur force volumique \vec{p}	$\vec{p}^T = [p_1^T \ p_2^T \ p_3^T]$

Matrice du vecteur unitaire I

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrice de transformation de contrainte

$$T^\sigma = \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & v_2 & 0 & v_3 \\ 0 & v_2 & 0 & v_1 & v_3 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & 0 & v_2 & v_1 \end{bmatrix}$$

En introduisant la

2.1 Comportement à la rupture

Toute structure est destinée à résister à un certain nombre de sollicitation (mécanique, thermique, environnementales,...). Mais ces structures présentent des géométries ou des défauts qui peuvent engendrer localement des contraintes suffisamment élevées pour provoquer une initiation puis la propagation d'une fissure. Ainsi, le dimensionnement d'une structure doit être effectué en prenant en compte les conditions d'apparition puis de développement éventuel des défauts au cours de sa durée de vie.

Des outils permettant de comprendre le mécanisme de création et de propagation de fissure a l'aide de la théorie de la mécanique élastique linéaire de la rupture et de son extension aux matériaux viscoélastique tels que le bitume.

2.2 Condition de propagation des fissures

La mécanique de rupture est apparue grâce aux travaux de Griffith 1920, qui traite la fissure comme une discontinuité des champs des contraintes et déformations à cet endroit .Ainsi, la mécanique de la rupture est considérée comme une application de la mécanique traditionnelle pour laquelle les conditions aux limites relatives à la présence géométrique d'une fissure sont particulières initialement dans le cadre de la mécanique élastique linéaire, ou bien des applications particulières dans le cadre des lois de comportement viscoélastique.

2.3 Mode de rupture

Lorsqu'un défaut croît dans un corps, la direction de la propagation est liée aux efforts extérieurs qu'il subit .En fonction des sollicitations prédominantes, trois modes de fissurations (figure 1.1) :

- Mode I : ouverture de la fissure ;
- Mode II : glissement ;
- Mode III : déchirement.

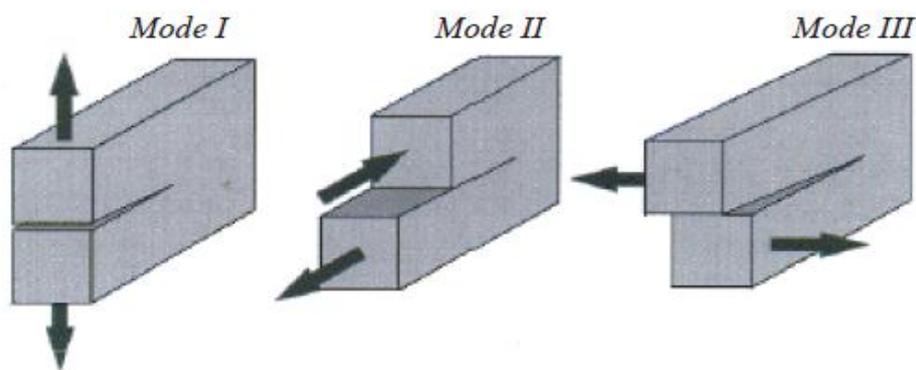


Figure 1.2 : Mode de sollicitation d'une fissure.

En pratique la propagation de fissure en Mode I est la plus fréquente.

2.3.1 Mode de sollicitation

On distingue :

Le mode de rupture fragile, sans déformation appréciable dans la phase de propagation de fissure, dans ce mode il n'ya pas de plasticité macroscopique observable

La rupture est qualifiée de ductile si elle fait intervenir une déformation plastique importante de la structure pendant la phase de propagation.

- La rupture a eu lieu sous une contrainte appliquée supérieur à la limite d'écoulement du matériau (zone plastique, viscoélastique), la rupture est ductile.
- La rupture a eu lieu sous contrainte appliqué inférieur à la limite d'écoulement du matériau (Zone élastique), la rupture est fragile.

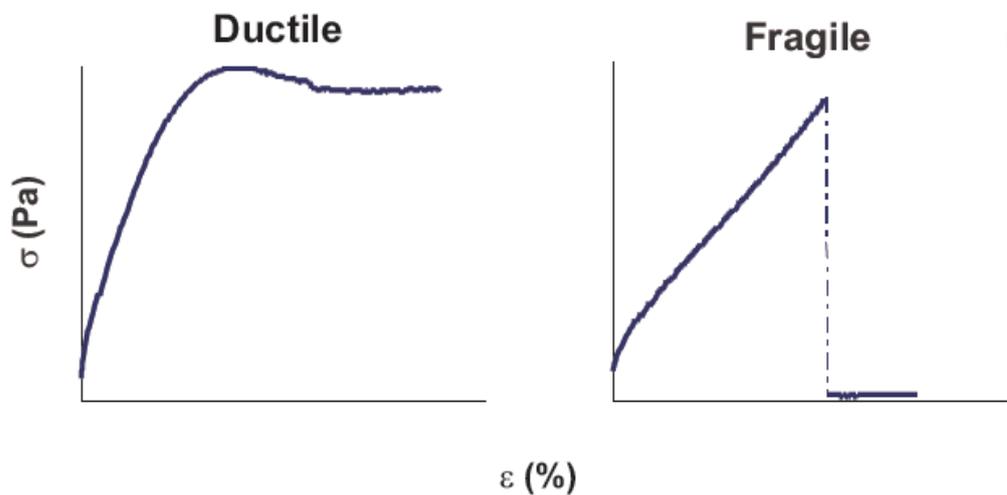


Figure 1.3 : Modes de rupture

2.3.2 Critère de rupture

a) Elasticité linéaire

La fissure est considérée comme une cavité infiniment aplatie dont les lèvres restent sans interaction entre elles, pour une fissuration du mode I on a simplement.

Les facteurs d'intensité des contraintes K_I, K_{II}, K_{III} caractérisant la force des singularités pour les trois composantes de déplacement en tête de la fissure [Irwin1958]

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$$

Irwin [1957] a montré l'équivalence, dans le cas de la mécanique de rupture élastique linéaire, entre l'aspect thermodynamique et l'aspect mécanique ou plus exactement entre G et K puisque la notion d'énergie superficielle n'apparaît pas dans l'aspect mécanique.

En déformation plane *et* $G = [(1 - \nu^2)/E]K_I^2$

En contrainte plane $G = K_I^2/E$

L'origine des ces contraintes infinies, physiquement inacceptables, provient de l'analyse purement élastique du problème.

b) Zone de cohésion

Afin de remédier au fait qu'une contrainte ne peut tendre vers l'infini, [Dugdale, 1960] et [Barenblatt, 1962] ont été les premiers à introduire les forces de cohésions en fond de fissure. Les contraintes d'adhésions ou de cohésion agissant entre les lèvres de la fissure peuvent être considérées comme un chargement intérieur conduisant à un facteur d'intensité des contraintes K_m compensent le facteur d'intensité des contraintes K_I dû au chargement extérieur.

La relation $K_I + K_m = 0$ assure la continuité des contraintes et fixe la longueur de la zone de cohésion ou d'adhésion. Il manque une relation pour calculer G_p puisque les relations 1.35 et 1.36 ne sont plus valables.

Cette équation a été donnée par Rice et Rosengren (1968); Rice (1968) qui introduit la relation suivante

$$J = \int_{\Gamma} \omega dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \quad (1.10)$$

Où le premier terme dans l'intégrale est l'énergie stockée et le second est le travail contre les forces de traction qui referment les lèvres de la fissure. W est la densité d'énergie de déformation élastique. Γ est un contour autour de la pointe de la fissure comme indique sur la figure (1.3).

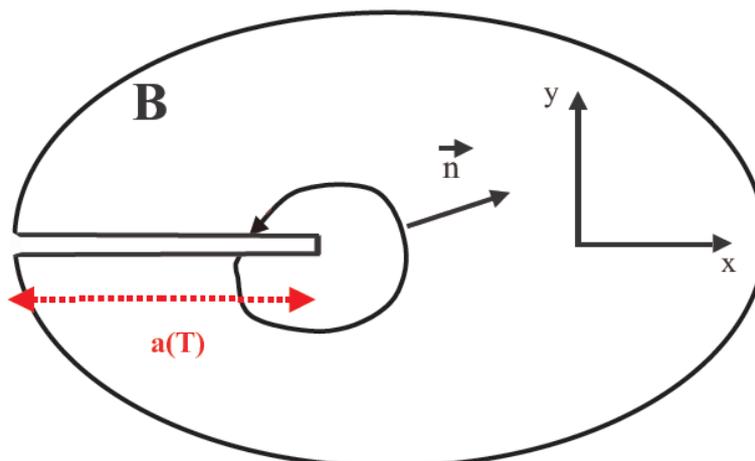


Figure 1.3 : Fissure de longueur a dans un solide. Définition d'un contour autour de la pointe de fissure selon [Rice, 1968]

T et u sont les vecteurs contraintes et déplacement sur le contour orientés selon la normale sortante. Cette intégrale est indépendante du contour. En prenant pour le contour extérieur au solide, Gurtin (1979) a montré que J_s s'identifie avec G et propose ainsi un moyen de calculer numériquement le taux de restitution d'énergie et par conséquent en déduire le facteur d'intensité de contrainte K_I .

c) Viscoélasticité

Plusieurs auteurs ont cherché d'une façon systématique la description de Griffith à des matériaux à comportement quelconque tels que les matériaux viscoélastique.

Schaperly(1984) présente un principe de correspondance qui permet le traitement d'un problème viscoélastique non linéaire comme un problème d'élasticité non linéaire.

Ainsi, il définit "une déformation élastique équivalente" :

$$\varepsilon^e(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} \quad (1.11)$$

Qu'il relie à la déformation dans le matériau viscoélastique sous un même chargement par la connaissance de l'historique des contraintes.

À cette fin, il utilise les intégrales héréditaires qui relient la déformation d'un solide viscoélastique à celle d'un corps élastique fictif de géométrie similaire.

$$\varepsilon(t) = E_0 \int_0^t D(t - \tau) \frac{d\varepsilon^e(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (1.12)$$

Où D complaisance.

Le critère de rupture dans un matériau viscoélastique l'intégrale J_v , dépendant du temps:

$$J_v = \int_{\Gamma} w^e dy - T \frac{\partial u^e}{\partial x} ds \quad (1.13)$$