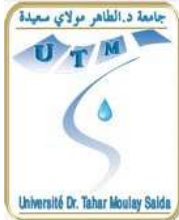


République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté des Sciences et Technologie
Département du Génie Civil et Hydraulique



Mémoire présenté par:

BOUGUENINA Otbi

en vue de l'obtention du diplôme de

Magister en Génie Civil

Option: Géotechnique et Géoenvironnement

Intitulé du mémoire:

**Détermination de la distribution des températures et des contraintes
thermiques dans un barrage en béton en construction.**

Pr. M. GHALI	Professeur	Université de Saïda	- Président
Dr. A. MEDJBER	Maître de conférence "A"	Université de Saïda	- Rapporteur
Dr. K. BELAKHDAR	Maître de conférence "B"	Université de Saïda	- Co-rapporteur
Dr. S. M. AISSA MAMOUN	Maître de conférence "A"	Université de Tlemcen	- Examineur
Dr. A. ZADJAOUI	Maître de conférence "A"	Université de Tlemcen	- Examineur
Dr. R. YEGHNEM	Maître de conférence "B"	Université de Saïda	- Invité

Soutenu le **03 / 07 / 2012.**

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté des Sciences et Technologie
Département du Génie Civil et Hydraulique



Mémoire présenté par:

BOUGUENINA Otbi

en vue de l'obtention du diplôme de

Magister en Génie Civil

Option: Géotechnique et Géoenvironnement

Intitulé du mémoire:

**Détermination de la distribution des températures et des contraintes
thermiques dans un barrage en béton en construction.**

Pr. M. GHALI	Professeur	Université de Saïda	- Président
Dr. A. MEDJBER	Maître de conférence "A"	Université de Saïda	- Rapporteur
Dr. K. BELAKHDAR	Maître de conférence "B"	Université de Saïda	- Co-rapporteur
Dr. S. M. AISSA MAMOUN	Maître de conférence "A"	Université de Tlemcen	- Examineur
Dr. A. ZADJAOUI	Maître de conférence "A"	Université de Tlemcen	- Examineur
Dr. R. YEGHNEM	Maître de conférence "B"	Université de Saïda	- Invité

Soutenu le **03 / 07 / 2012.**

Remerciements

Je souhaite remercier ici tous ceux qui, par leur aide, leurs encouragements et leurs conseils, m'ont permis de réaliser ce mémoire.

Ce travail a été mené au sein du Département de Génie Civil et Hydraulique de l'Université DR Moulay Tahar Saïda.

Je tiens à remercier, en premier lieu, les personnes qui m'ont suivi de près durant ces deux années. Il faut, tout d'abord, citer mes deux responsables de thèse, M^R Medjber Abdellah, Maître de Conférences "A" et M^R Khalil Belakhdar, Maître de Conférences, qui ont su toujours se rendre disponibles et ont tout mis en œuvre pour que ce travail puisse se réaliser dans les meilleures conditions. Leur soutien assidu et permanent m'a permis de donner le meilleur de moi-même au cours de ces années de thèse.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues du département de Génie Civil et Hydraulique de l'Université de Saïda, qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de ce travail. Ils ont, tous, contribué, directement ou indirectement, à mon travail, en apportant aide et conseils.

J'aimerais remercier du fond du cœur mes parents et toute ma famille pour leur soutien moral sans lequel ce travail n'aurait pas été possible.

Mes remerciements vont également aux membres du jury, M^R Ghali Merzoug, M^R Aissa Mamoun Sidi Mohamed et M^R Zadjou Abdeldjalil.

Résumé

Ce travail de recherche porte sur l'étude de la distribution des températures et des contraintes thermiques dans un barrage en construction. Le barrage choisi est celui de Brezina qui est un barrage voûte en béton situé dans la région d'El-Bayadh. La simulation est effectuée en utilisant le programme en élément finis ANSYS, l'étude se fait en deux dimensions sous l'excitation du poids propre du barrage et de la chaleur d'hydratation du béton.

Certains facteurs intervenants lors de la construction du barrage sont pris en compte dans l'étude tels-que : les propriétés des matériaux utilisés, le programme de bétonnage, le développement de la chaleur d'hydratation..... Il en est de même pour certains paramètres climatiques tels-que : la température ambiante de l'air et la vitesse de vent qui interviennent dans les échanges convectifs.

L'objectif de l'étude vise la détermination et l'optimisation des systèmes de refroidissement artificiel du béton et le calcul des contraintes d'origines thermiques afin de déterminer le nombre de joints et leurs espacements. L'analyse permettra un choix adéquat des matériaux de construction et de fixer la température initiale du gâché pour éviter ou au moins minimiser le risque de fissuration précoce. La température maximale atteinte au centre du barrage est de 67°C.

L'effet important de la température de l'air a été constaté à proximité des parements amont et aval du barrage, avec des températures de béton réagissant fortement aux conditions environnantes. Les contraintes thermiques dans le béton engendrées par le dégagement de chaleur du béton lors de sa prise ont été calculées. La valeur maximale de la contrainte de traction relevée à proximité des parements varie de 1.1 MPa à 4.36 MPa.

Mots clés: Analyse thermique, température, chaleur d'hydratation, contrainte thermique, méthode des éléments finis, barrage.

Abstract

This research involves the study of the temperature distribution and thermal stresses in a dam under construction. The dam chosen is Brezina dam. It is a concrete arch dam located in the region of El Bayadh. The simulation is performed using the ANSYS finite element program, the study is done in two dimensions under the excitation of its dead weight and the heat of hydration of concrete.

Some factors involved in the construction of the dam are included in the study-such as: the properties of materials used, the concrete program, the development of hydration heat... . It is the same for some parameters-such as climate: the temperature of the air and the wind speed involved in the convective exchanges.

The objective of the study is the determination and optimization of cooling systems of artificial concrete and stress analysis of thermal origins to determine the number of joints and their spacing. The analysis will allow an appropriate choice of building materials and to set the initial temperature of placement to avoid or at least minimize the risk of early cracking. The maximum temperature reached in the center of the dam was found to be about 67 ° C.

The significant effect of the air temperature was found near the upstream and downstream faces of the dam, with temperatures of concrete reacts strongly to environmental conditions. Thermal stresses in the concrete generated by the heat of concrete during plug have been calculated. The maximum value of the tensile stress relieved cladding varies in the vicinity of 1.1 MPa to 4.36 MPa.

Keywords: Thermal analysis, Temperature, heat of hydration, heat stress, finite element method, dam.

ملخص

هذا البحث يتضمن دراسة توزيع الحرارة والضغوط الحرارية في سد قيد الإنشاء. السد المختار لدراسة هو سد بريزينة، هو عبارة عن سد على شكل قوس يقع في ولاية البيض. يتم تنفيذ المحاكاة باستخدام العناصر المحدودة بواسطة برنامج أونسيس (ANSYS)، تتم الدراسة في بعدين، تحت تأثير قوى ثقل السد و حرارة تفاعل الاسمنت الموجود بالخرسانة مع الماء.

نأخذ بعين الاعتبار بعض العوامل التي قد ترد أثناء بناء السد مثل: خصائص المواد المستخدمة، وبرنامج صب الخرسانة، تطوير درجة حرارة التفاعل بين الاسمنت و الماء نفس الشيء بالنسبة للعوامل الخارجية كالمناخ، درجة حرارة الجو وسرعة الرياح المشاركة في تبادل الحمل الحراري.

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد و الإنقاص من استعمال أنظمة التبريد الاصطناعي للخرسانة مع تحليل اجهادات الشد المنبعثة من الحرارة لتحديد عدد المفاصل وتباعدها. سوف يسمح هذا التحليل من الاختيار المناسب لمواد البناء وضبط درجة الحرارة الأولية لصب الخرسانة لتجنب أو على الأقل التقليل من خطر الانشقاق في وقت مبكر. أقصى درجة حرارة سجلت في وسط السد كانت 67 درجة مئوية.

تم العثور على تأثير كبير لدرجة حرارة الهواء بالقرب من وجوه المنبع والمصب من السد، مع تفاعل درجات الحرارة بقوة مع الظروف البيئية. وقد تم حساب الإجهادات الحرارية في الخرسانة التي تولدها حرارة تفاعل المكونات كالاسمنت مع الماء. الحد الأقصى من إجهاد الشد يختلف في محيط السد من 1.1 ميغا باسكال إلى 4.36 ميغا باسكال.

كلمات البحث : التحليل الحراري، درجة الحرارة، حرارة الماء من الإجهاد الحراري، طريقة العناصر المحدودة، السد.

SOMMAIRE

Remerciements.....	3
Résumé.....	4
Abstract.....	5
ملخص.....	6
Sommaire.....	7
Liste des Figures	10
Liste des Tableaux.....	13
Principales Abréviations et Notations.....	14
Introduction Générale.....	16
INTRODUCTION GENERALE.....	17
Chapitre I - Analyse bibliographique	20
I.1 INTRODUCTION.....	21
I.2 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE.....	21
I.3 EQUATION DE TRANSFERT DE LA CHALEUR A TRAVERS UN CORPS..	22
I.4 PARAMETRES DETERMINANTS	23
I.4.1 Les techniques de construction.....	23
I.4.1.1 <i>Béton compacté au rouleau (BCR)</i>	23
I.4.1.2 <i>Béton conventionnel vibré (BCV)</i>	24
I.4.2 Composition des bétons conventionnels vibrés (BCV)	24
I.4.2.1 <i>Ciment portland</i>	24
I.4.2.2 <i>Matériaux pouzzolaniques</i>	24
I.4.2.3 <i>la Cendres volantes</i>	25
I.4.3 Les propriétés structural du BCV	25
I.4.3.1 <i>la Densité (ρ)</i>	25
I.4.3.2 <i>Résistance à la compression et à la traction (F_c, F_t)</i>	26
I.4.3.3 <i>Module d'élasticité (E)</i>	26
I.4.3.4 <i>Coefficient de poisson (ν)</i>	26
I.4.4 Les propriétés thermique du BCV	27
I.4.4.1 <i>la Conductivité thermique (λ)</i>	27

I.4.4.2	<i>la Convection thermique (h)</i>	27
I.4.4.3	<i>Coefficient de dilatation thermique (α)</i>	27
I.4.4.4	<i>Chaleur spécifique (C)</i>	27
I.4.4.5	<i>la Chaleur d'hydratation (Q)</i>	28
I.4.4.6	<i>Capacité de déformation a la traction (ϵ_{te})</i>	28
I.4.4.7	<i>Température adiabatique</i>	28
I.5	CONCLUSION	30
	Chapitre II - Eléments de barrages et calcul de stabilité	31
II.1	INTRODUCTION	32
II.2	LES BARRAGES	32
II.3	TYPES DES BARRAGES	33
II.3.1	Barrage poids	33
II.3.2	Barrage voûte	33
II.3.3	Barrage contreforts	34
II.3.4	Barrage en remblais	34
II.4	ELEMENT DE CALCUL DE STABILITE DES BARRAGES	34
II.5	ANALYSE THERMIQUE	36
II.5.1	Concept de l'analyse thermique	36
II.5.2	Objectif de l'analyse thermique	38
II.5.3	Exigences de contrôle de température	39
II.6	CONCLUSION	39
	Chapitre III - Expérimentation numérique et résultats	40
III.1	INTRODUCTION	41
III.2	CAS ETUDIE	41
III.2.1	Description du barrage	41
III.2.2	Caractéristiques géométriques	42
III.3	METHODOLOGIE DE MODELISATION	44
III.4	HYPOTHESES PRINCIPALES DE MODELISATION	45
III.5	PROPRIETES ET PARAMETRES DU MODELE	45
III.5.1	Composition du béton	45
III.5.2	La température initiale de coulage	46
III.5.3	Température initiale de la fondation rocheuse	46
III.5.4	Propriétés et conditions environnementales	47

III.5.5	La chaleur d'hydratation	49
III.5.6	Conditions initiales et aux limites	51
III.6	LOGICIEL ANSYS	52
III.6.1	La commande d'activation et d'extinction (<i>Birth, Death</i>)	53
III.6.2	Modèle ANSYS utilise avec deux dimensions	54
III.7	RESULTATS D'ANALYSE THERMIQUE	56
III.7.1	Distribution des températures	56
III.7.2	Evolution de la température en fonction du temps	59
III.7.3	Variation de la température selon la position	63
III.8	RESULTATS DES CONTRAINTES THERMIQUES	69
III.8.1	Distribution des contraintes au corps du barrage	69
III.8.2	Variation des contraintes en fonction du temps	72
III.8.3	Variation des contraintes au sein du corps	78
III.9	ANALYSE DE LA FISSURATION	82
III.9.1	Gradient de fissuration en blocs	83
III.9.2	Gradient de fissuration de peau	84
III.10	CONCLUSION	87
	Chapitre 4 - Etude paramétrique	88
IV.1	INTRODUCTION	89
IV.2	RESULTATS D'ANALYSE THERMIQUE	89
IV.2.1	Variation de la température en fonction de temps	91
IV.2.2	Evolution de la température selon la position	93
IV.3	ANALYSE DE LA FISSURATION	96
IV.4	CONCLUSION	97
	Conclusion Générale Et Perspectives	98
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	99
	Références bibliographiques	102
	Annexe A - Température mensuelle de la région de Brezina	105
	Annexe B - caractéristiques des granulats et de la roche de fondation	107

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1 Calorimètre semi-adiabatique utilisé aux éprouvettes de béton, Boulay. C et al (2010)	29
Fig. 1.2 Valeur des coefficients K et α de la température adiabatiques selon Radovanović (1998)	30
Fig. 2.1 Illustration de la fissuration par déformation structurellement empêchée Buffo-Lacarriere. L (2006)	37
Fig. 2.2 développement du gradient des contraintes thermiques	38
Fig. 3.1 implantation du barrage de Brezina, Google Mappe	42
Fig. 3.2 photo au-dessus du barrage du Brezina	42
Fig. 3.3 coupe transversale et paramètre dimensionnel du barrage	43
Fig. 3.4 coupe longitudinale du barrage	44
Fig. 3.5 Abaque de détermination des coefficients K et α selon Radovanović (1998)	50
Fig. 3.6 Chaleur cumulée d'hydratation pour le ciment	50
Fig. 3.7 Chaleur d'hydratation du béton (180kg/m^3 de ciment) pour l'analyse en éléments finis	51
Fig. 3.8 Conditions aux limites thermique et structurales	52
Fig. 3.9 Principe d'Activation-Extinction de modélisation	53
Fig. 3.10 Types des éléments de maillage utilisé à l'analyse	54
Fig. 3.11 Modèle de maillage en deux dimensions de la Section 1 et 2	55
Fig. 3.12.a Distribution des températures à la section 1 durant la construction	57
Fig. 3.12.b Distribution des températures à la section 2 dans des différents temps	58
Fig. 3.13 Localisation des points de résultat de température en fonction de temps aux sections 1 et 2	60
Fig. 3.14 Evolution de la température au centre du barrage en fonction de temps respectivement à la section 1 et 2 à différentes hauteurs	61
Fig. 3.15 Evolution de la température à la hauteur 20.40m aux différents points amont, aval et centre (section 1)	62
Fig. 3.16 Evolution de la température à la hauteur 9.27m aux différents points amont, aval et centre (section 2)	62
Fig. 3.17 Chemins choisies pour présenter la variation de température selon la position aux sections 1 et 2	64

Fig. 3.18 Variation de la température sur le chemin A (la base) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 1	65
Fig. 3.19 Variation de la température sur le chemin 0 (la base) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 2	65
Fig. 3.20 Variation de la température sur le chemin B (à 17.40m) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 1	66
Fig. 3.21 Variation de la température sur le chemin 1 (à 9.27m) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 2	67
Fig. 3.22 Variation de la température sur le chemin C (à 40.00m) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 1	67
Fig. 3.23 Variation de la température sur le chemin 2 (à 19.00m) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 2	68
Fig. 3.24 Variation de la température au chemin vertical à la fin d'hydratation dans la section 1	68
Fig. 3.25 Variation de la température au chemin vertical à la fin d'hydratation dans la section 2	69
Fig. 3.26.a Distribution des contraintes thermiques à la section 1(en Pa).....	70
Fig. 3.26.b Distribution des contraintes thermiques à la section 2 (en Pa)	71
Fig. 3.27 Variation des contraintes suivant l'axe X à différentes élévations dans le centre de la section 1	72
Fig. 3.28 Variation des contraintes suivant l'axe X à différentes élévations dans le centre de la section 2	73
Fig. 3.29 Variation des contraintes suivant l'axe Z à différentes élévations dans le centre de la section 1	73
Fig. 3.30 Variation des contraintes suivant l'axe Z à différentes élévations dans le centre de la section 2	74
Fig. 3.31 Variation des contraintes suivant l'axe X à 20.40m au-dessus de la base de la section 1	75
Fig. 3.32 Variation des contraintes suivant l'axe X à 9.27m au-dessus de la base de la section 2	75
Fig. 3.33 Variation des contraintes suivant l'axe Z à 20.40m au-dessus de la base de la section 1	76
Fig. 3.34 Variation des contraintes suivant l'axe Z à 9.27m au-dessus de la base de la section 2	76

Fig. 3.35 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à la galerie inférieure de la section 1	77
Fig. 3.36 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à la galerie supérieure de la section 1.....	77
Fig. 3.37 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à la galerie inférieure de la section 2	78
Fig. 3.38 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à la galerie supérieure de la section 2	78
Fig. 3.39 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à 17.40m au-dessus de la base (chemin B) de la section 1	79
Fig. 3.40 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à 9.27m au-dessus de la base (chemin 1) de la section 2	80
Fig. 3.41 Variation des contraintes suivant la direction verticale (chemin D et chemin 3) respectivement à la section 1 et la section 2 dans les deux sens X et Z	81
Fig. 3.42 effet d'âge de béton sur le module d'élasticité selon Radovanovic (1998)	85
Fig. 3.43 Variation du module d'élasticité en fonction du temps	86
Fig. 4.1 évolution de la température en fin d'hydratation (320j) pour des températures de coulage différentes	90
Fig. 4.2 Variation de température en fonction de la température initiale de coulage	90
Fig. 4.3 Variation de la température au centre de la base de la section 1 (point A) pour différentes températures de coulage	91
Fig. 4.4 Variation de la température à 20.40m au dessus de la base de la section 1 (point B2) pour différentes températures de coulage	91
Fig. 4.5 Variation de la température à 47.67m au dessus de la base de la section 1 (point D2) pour différentes températures de coulage	92
Fig. 4.6 Variation de la température sur la base (chemin A) de la section 1 en fin d'hydratation	93
Fig. 4.7 Variation de la température à 17.40m au-dessus de la base (chemin B) de la section 1 en fin d'hydratation	93
Fig. 4.8 Variation de la température à 40.00m au-dessus de la base (chemin C) de la section 1 en fin d'hydratation	94
Fig. 4.9 Variation de la température dans le sens vertical (chemin D) de la section 1 en fin d'hydratation	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Composition du béton	45
Tableau 3.2 Température initial du béton en temps de coulage	46
Tableau 3.3 Valeur de la capacité thermique des différents constituants (Zreiki 2009) ..	48
Tableau 3.4 Propriétés adopté à l'analyse thermique	49
Tableau 3.5 températures atteignent en fin de construction et fin d'hydratation dans les deux sections	59
Tableau 3.6 valeurs max et min des contraintes obtenues dans le centre du barrage sens X et Z	74
Tableau 3.7 résultats de fissuration et espacement des joints du barrage de Brezina ...	84
Tableau 3.8 dimension des sections (Plots) du barrage	84
Tableau 3.9 Analyse de fissuration de la surface du barrage	86
Tableau 3.10 présentation de nombre des blocs et la longueur nécessaire pour éviter la fissuration de peau	87
Tableau 4.1 Température à différente temps pour différentes températures de coulage .	89
Tableau 4.2 résultats de fissuration et espacement des joints pour différentes températures initiale de coulage	96

NOTATION

A_f	Superficie brute de la section transversale du béton au niveau du plan de fondation
A_g	Superficie de la fondation ou la zone de béton retenue à la contraction, la valeur
B	la largeur de la base du barrage
C	chaleur spécifique ou la capacité thermique
E	module d'élasticité
E_b	le module d'élasticité du béton
E_f	le module d'élasticité de la fondation
F_c	résistance du béton à la compression
F_t	résistance du béton à la traction
h	coefficient d'échange thermique par convection
K et α	Des coefficients dépend de la composition du béton, selon Radovanovic (1998)
K_R	Facteur de rétention par la structure
K_f	Facteur de rétention par la fondation
Q	chaleur d'hydratation
T	la température [°C].
t	le temps.
T_{adi} ou $T(t)$	température adiabatique
V	la vitesse de vent
X, Y, Z	coordonnées
z	la hauteur du niveau d'eau
α	coefficient de dilatation thermique
β_e	coefficient dépend de l'âge du béton
Q	dégagement de chaleur instantané, supposé uniforme dans toute la masse (en J/m ³ s).
λ	coefficient de conductivité thermique de la matière (en J/m s °C);

γ	le poids volumique (en N/m^3);
γ_w	le poids volumique de l'eau
ρ	la densité
ν	coefficient de Poisson
ε_{te}	Capacité de déformation à la traction
σ_t	contrainte de traction
ΔT	Différence de température
φ	l'angle de contact entre le barrage et sa fondation

ABREVIATION

2D, 3D	respectivement deux et trois dimension
ACI	American Concrete Institute
ANB	Agence Nationale des Barrages
ASCE	American Society of Civil Engineers
BCR	Béton Compacté au Rouleau
BCV	Béton Conventionnel Vibré
ENSC	Ecole Normale Supérieure de Cachan
INSA	Institut National des Sciences Appliquées
RCC	Roller Compacted Concrete

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

17

INTRODUCTION GENERALE

Les questions posées dans le domaine de la conception et de la construction d'un ouvrage en béton sont multiples, en particulier l'étude de la durabilité des ouvrages constitue aujourd'hui un élément essentiel. Cette durabilité peut être largement affectée par une fissuration précoce, liée à des déformations empêchées d'origine thermique, ou par les sollicitations thermiques subies au cours de l'hydratation. Dans ce contexte, ce mémoire est consacré plus particulièrement à l'étude de la distribution des températures et des contraintes thermiques dans un barrage en béton en construction.

Les déformations de retrait peuvent créer des fissurations et ainsi favoriser les conditions d'une pénétration des agressifs externes favorisant, entre autres pathologie, corrosion des armatures et la dégradation de béton. La maîtrise du risque de fissuration devient donc une préoccupation majeure des industriels du bâtiment et travaux publics qui mettent en œuvre des moyens plus importants en phase d'études afin de privilégier les matériaux et les procédés de construction minimisant un tel risque.

Du point de vue matériau, une attention particulière doit être portée au choix du liant puisqu'il est responsable, en s'hydratant, des dégagements de chaleur conduisant aux déformations thermiques, mais aussi de l'augmentation des résistances. On note dans ce domaine l'utilisation importante des liants composés. En effet ces liants sont moins exothermiques à court terme que le ciment CEM I.

Du point de vue des techniques de construction, les déformations d'origine thermiques peuvent être limitées par exemple par une température de gâchage plus faible, par l'utilisation de système de refroidissement, ou encore par un phasage particulier des travaux.

Selon Haouas (2007) le retrait thermique dû aux gradients de température se manifeste dans le béton lors d'un déséquilibre calorifique. Ces variations de température interne sont induites soit par une source de chaleur externe, d'origine naturelle, climatique ou

industrielle, soit par une source interne issue de la nature exothermique des réactions d'hydratation, la quantité de la chaleur interne produite par l'hydratation peut être assez importante surtout dans les ouvrages massifs, tels que les barrages, blocs de fondations..., où la capacité de conduction thermique du béton est faible comparée aux cinétiques d'hydratation. Ceci conduit à un fort gradient entre l'extérieur, qui a commencé à se refroidir, et le cœur du béton, où la température est assez élevée. La température due à la chaleur d'hydratation peut atteindre les 80°C dans le cas d'ouvrage massif (Divet (2001) cité par Haouas). Cette compétition entre la dilatation thermique à l'intérieur et la contraction à l'extérieur, à un moment où le béton est déjà rigide, entraîne la création de contraintes supplémentaires en traction. Si ces contraintes dépassent la résistance limite du matériau, une fissuration se produit. Selon la nature de la structure mise en jeu, deux types de fissurations thermiques peuvent être ainsi distingués:

❖ *La fissuration de peau:* Elle est due aux gradients locaux de température. Ces fissures sont toutefois peu ouvertes vu que la distance séparant deux fissures principales consécutives est de l'ordre de grandeur de la profondeur de la zone de traction, qui ne peut excéder le quart de l'épaisseur de la structure.

❖ *La fissuration localisée:* Dans le cas des joints de bétonnage (plaque minces coulées sur plusieurs couches) ou des structures à extrémité(s) fixée(s) (barrages, plaques fixées au bloc de fondation, chape sur support rigide ou sol...), des fissures localisées peuvent avoir lieu. Elles sont largement espacées et beaucoup plus ouvertes que les précédentes (Haouas (2007)).

Depuis longtemps des recherches consacrées à la simulation de chargement thermique provoqué par la réaction d'hydratation exothermique dans les structures massives, telles que les barrages, le but de ces recherches est de prédire la distribution des températures et des contraintes thermiques dans les barrages pour éviter ou au moins minimiser le risque de fissuration, minimiser le nombre des joints (éliminer les joints inutile), choisir les matériaux convenables à la construction et proposer la procédure ou la démarche de construction.

Dans notre travail, nous effectuons la simulation d'un barrage voûte en béton en construction sous l'effet de la chaleur d'hydratation, on propose que l'ouvrage soit sollicité par son poids, la chaleur due à l'hydratation et les conditions environnementales telles que la température ambiante, le vent...etc.

Dans cette perspective, le premier chapitre I de ce mémoire est consacré à une revue bibliographique des phénomènes mis en jeu lors de la construction du barrage, ainsi les propriétés du béton que ce soit thermique ou mécanique afin de guider nos choix de modélisation. Les deux chapitres suivants sont ensuite consacrés à la présentation de l'outil de simulation choisi.

Cet outil de simulation s'organise en deux phases de modélisation: un modèle déterminant l'évolution des températures et les états thermiques au cœur du barrage et un second modèle, mécanique, utilisant les résultats du premier pour estimer les contraintes thermiques afin de minimiser le risque de fissuration précoce. Le chapitre quatre IV est consacré à une étude paramétrique concerne la température initiale de coulage. Cette étude nous a permis d'avoir une idée sur le choix des installations de confection du béton et le choix des matériaux de construction.

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1	INTRODUCTION.....	21
I.2	APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE.....	21
I.3	EQUATION DE TRANSFERT DE LA CHALEUR A TRAVERS UN CORPS.....	22
I.4	PARAMETRES DETERMINANTS	23
I.5	CONCLUSION	30

I.1 INTRODUCTION

Le ciment, lorsqu'il fait prise et durcit, dégage de la chaleur. Ce phénomène, qui passe inaperçu dans la fabrication des petits objets en ciment ou en béton, reste sans conséquences dans les constructions usuelles, telles que les bâtiments, parce que les éléments de ces ouvrages sont d'une épaisseur assez faible pour permettre à la chaleur d'hydratation de se dissiper au fur et à mesure de son développement. Il n'en est plus de même pour les grosses masses de béton. Il a été constaté qu'à l'intérieur des grands barrages, la température peut monter de plusieurs dizaines de degrés et ne redescend que très lentement, pour osciller autour de la température moyenne de la région. La différence de température entre le centre de la masse et la surface est la cause de certaines fissures du béton. Dans ce contexte des recherches sont menées pour l'étude de la distribution des températures, des contraintes thermiques qui en résultent et les paramètres ayant une influence sur le phénomène.

I.2 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

Malkawi A.H., et al (2003), utilisaient le code d'éléments finis ANSYS pour la simulation du barrage Tannur en Jordan à deux et trois dimension, cette étude donnait la distribution des températures, issue de la chaleur d'hydratation, dans le corps du barrage et son évolution en fonction de temps, elle déterminait la distribution spatiale des contraintes thermique pendant la construction du barrage et durant le remplissage du réservoir, identifiait l'espacement entre les joints de tel sorte à minimiser le développement des fissurations d'origine thermique (dû au gradient thermique) et déterminer la température de gâchage du béton. Les résultats obtenus par simulation sont comparés aux résultats donnés par les thermomètres d'auscultation du barrage, cette comparaison donne des valeurs acceptables.

Crichton A.J., et al (1999), ont étudiés le barrage Kinta en Malaysia à l'aide du logiciel ANSYS, ils ont pris en considération le phénomène de fluage, la variation du module d'Young en fonction du temps et la procédure de construction, le but de cette étude est la détermination de la distribution spatiale de la température due à l'hydratation et son évolution à travers le temps, la distribution des contraintes durant la construction et après le remplissage du réservoir et optimisait la températures du gâché (température du béton pendant le coulage).

Saetta A., et al (1995), ont mis au point un algorithme en éléments finis pour simuler la variation de la température due à la chaleur d'hydratation du ciment et les conditions environnementale durant la construction du barrage Sa Stria en Italie, ils ont pris en

considération la température due à la réflexion des rayons solaire, l'ensoleillement direct, la variation mensuelle de la température de l'air (ambiante) et la vitesse de vent. L'étude donne des résultats acceptables que ce soit pour l'évolution des températures, des contraintes ou des déformations.

Malkawi A.H., et al (2004), ont effectués une analyse thermique et structurale du barrage Al-Wehdah, construit en béton compacté au rouleau, en Jordanie. La modélisation se fait en deux et trois dimension, étudiait l'influence de la température sur le barrage, les conditions de placement et la distribution des contraintes thermique. Une étude paramétrique des différents types de ciment est faite, (ciment plus cendre volante d'Afrique du Sud, ciment plus cendre volante de Turquie, ciment plus pouzzolane de Jordanie et ciment plus une poussière de roche), une étude de comparaison entre logiciel ANSYS et COSMOS à une température de placement de 28°C et un ciment (Jordanien pouzzolane). En dernier une analyse structurale pour une température de placement de 28°C et un matériau pouzzolane Jordanien conduit à déterminer la localisation des contraintes de traction et la fissuration.

Noorzaei J., et al (2006), ont utilisés un code d'éléments fini en deux dimensions pour simuler l'effet de la chaleur d'hydratation dans le barrage Kinta en Malaysia. Ils ont pris en considération la chaleur d'hydratation, la température de la fondation, la température du gâché, la radiation solaire et la vitesse de vent (influe sur le transfert par convection), avec l'utilisation de la technique d'activation et d'extinction pour simuler la construction du barrage par couches (*the birth and death technique*).

D'autres recherches consacrées à ce type de phénomène ont été menées. Stucky, A. et al (1957) évaluent les problèmes thermiques posés par la construction des barrages, Luna, R. et al (2000), Jaafar, M.S. et al (2007) faisaient l'analyse thermique de barrage en béton durant la construction, Bouzoubaâ, N. et al (1996) étudiaient le comportement thermique et mécanique du béton de masse...etc.

I.3 EQUATION DE TRANSFERT DE LA CHALEUR A TRAVERS UN CORPS

Selon Alfred, S. et Maurice-H.D. (1957) La transmission de la chaleur au sein d'un massif sans émission de chaleur interne obéit à l'équation générale de Fourier.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{eq. (1-1)}$$

Si le massif subit à la fois l'effet d'une température imposée à la surface et un dégagement de chaleur interne (cas de la chaleur d'hydratation), l'équation doit être complétée et devient

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \pm \frac{Q}{c\gamma} \quad \text{eq. (1-2)}$$

Où: T: température, en °C, en un point donné, à un instant donné;

t: temps, en seconde;

x, y, z : coordonnées du point considéré, en mètres;

λ : coefficient de conductivité thermique de la matière (en j/m s °C);

C: chaleur spécifique ou la capacité thermique (en j/kg °C);

γ : le poids spécifique (en kg/m³);

Q: dégagement de chaleur instantané, supposé uniforme dans toute la masse (en J/m³ s).

I.4 PARAMETRES DETERMINANTS

L'analyse de la distribution des températures et des contraintes thermiques dans les structures massives durant la construction dépend de plusieurs paramètres, tels que la chaleur d'hydratation de ciment, la capacité thermique, le coefficient de dilatation thermique, la conductivité thermique, le module d'élasticité (module d'Young), le coefficient de Poisson, la composition du béton, la résistance à la traction...etc.

I.4.1 Les techniques de construction

On distingue deux techniques de construction, lors de la construction des barrages en béton, le béton conventionnel vibré (BCV) et le béton compacté au rouleau (BCR).

I.4.1.1 Béton compacté au rouleau (BCR)

Depuis 1978, une nouvelle technique s'est substituée au béton conventionnel, il s'agit du béton compacté au rouleau. C'est un béton (granulats, sable, ciment, eau) avec peu d'eau, qui a une consistance granulaire et pas liquide. Il se met en place comme un remblai, avec des engins de terrassement. Il présente le principal avantage d'être beaucoup moins cher que le béton classique (béton conventionnel vibré).

I.4.1.2 Béton conventionnel vibré (BCV)

La technologie des barrages poids en BCV met en œuvre des bétons de granulométrie importante (jusqu'à 80 mm) et des dosages en ciment de l'ordre de 200 à 250 kg/m³. L'exotherme de la réaction d'hydratation du béton (ciment) conduit pendant la prise à une forte augmentation de température du béton et à un risque de fissuration lors du refroidissement. Les barrages en BCV sont pour cette raison construits par plots de dimensions horizontales courantes 15 x 15 mètre nécessitant la mise en œuvre de nombreux joints de contraction, transversaux et longitudinaux (au moins pour les barrages de grande hauteur). (Comité Français Des Grands Barrages 2002).

I.4.2 Composition des bétons conventionnels vibrés (BCV)

La composition et le dosage du BCV est de produire une masse dense qui assure la résistance, la durabilité et l'imperméabilité selon l'exigence d'application, le BCV comme tous les bétons, inclus les matériaux cimentaires, les graviers, sable, et l'eau.

Le choix des ciments dans la construction des barrages assure la résistance aux attaques chimiques de sulfate et le potentiel d'alcali-réaction pour certains agrégats et en particulier, une basse température d'hydratation, pour éviter ou au moins minimiser le retrait thermique.

I.4.2.1 Ciment portland

Les ciments portland sont utilisés à la confection des BCV, pour les bétons de masse les ciments utiles sont: ciment type CEM II (à basse chaleur d'hydratation), CEM III (ciment de haut fourneaux), CEM IV (ciment pouzzolanique) et CEM V (ciment de laitier et aux cendres), les ciments blancs peuvent aussi être utilisés.

I.4.2.2 Matériaux pouzzolaniques

Selon l'ACI 116R-00 (2005) (*American concrete institute*), la pouzzolane est définie comme un matériau siliceux ou siliceux et alumineux, qui possède en lui-même peu ou pas de valeur cimentaire, mais sera, sous une forme habilement divisée à partir de la présence d'humidité, chimiquement réagir avec l'hydroxyde de calcium à la température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés cimentaires.

Il existe deux types, pouzzolanes naturelles et artificielles.

Pouzzolane artificielle : matériaux comme les cendres volantes et les fumées de silice.

Pouzzolane naturelle: une matière première ou calciné qui a des propriétés pouzzolaniques (par exemple, les éruptions volcaniques).

Les matériaux pouzzolaniques servent à:

- ❖ l'ajout partiel de la pouzzolane au ciment réduit la chaleur d'hydratation.
- ❖ augmenter la résistance au long terme à la compression si le matériau à une grande activité entre le ciment et la pouzzolane.
- ❖ augmenter la durabilité.
- ❖ réduire le coût.
- ❖ ajout minéral pour améliorer la maniabilité.

I.4.2.3 *les Cendres volantes*

Les cendres volantes sont des particules fines recueillies lors du dépoussiérage des gaz résultant de la combustion du charbon pulvérisé, utilisé dans les centrales thermiques. Sa composition est en relation avec les différents types de matières incombustibles présentes dans le charbon. D'une façon générale, les éléments présents sont : le silicium, l'aluminium, le fer, le calcium et le magnésium.

La cendre volante donne au béton les caractéristiques suivantes:

- ❖ une basse chaleur d'hydratation.
- ❖ une surface lisse, qui a pour effet une bonne imperméabilité.

I.4.3 Les propriétés structural du BCV

La contrainte admissible et le module d'élasticité du BCV sont fonction de la composition, du mode de malaxage, les qualités des agrégats et le rapport eau-ciment (E/C) ont une influence importante dans la résistance et l'élasticité, dans le béton et le béton de masse.

I.4.3.1 *la Densité (ρ)*

A partir de l'ACI 116R-00 (2005) la densité est définie comme le rapport de masse par unité de volume, généralement la valeur de la densité du béton de masse est comprise entre 2240 et 2560Kg/m³.

I.4.3.2 Résistance à la compression et à la traction (F_c , F_t)

La résistance du béton dépend de plusieurs paramètres, tels que la qualité et les grandeurs des agrégats, la composition, le rapport E/C...etc.

La détermination de la résistance à la compression se fait par l'essai de compression directe, selon l'ACI 207.1R-96 la valeur de F_c varie de 8,3 à 33MPa à 28j, 14 à 35,6MPa à 90j, 16,7 à 45,2MPa à 180j et de 18,8 à 47MPa à un an, mais pour la traction on utilise soit l'essai de traction par flexion ou par la traction directe, parfois on peut déduire la résistance à la traction directement à partir de la résistance à la compression.

À partir de la formule donnée par l'ACI 207.1R-96

$$f_t = 0,32 f_c^{2/3} \quad (\text{MPa}) \quad \text{eq. (1-3)}$$

Et selon l'Eurocode2 (1992)

$$f_t = 0,30 f_c^{2/3} \quad (\text{MPa}) \quad \text{eq. (1-4)}$$

I.4.3.3 Module d'élasticité (E)

Le module d'élasticité est défini comme étant le rapport de la contrainte normale à la déformation correspondante de traction ou de compression en dessous de la limite de proportionnalité de la matière; aussi appelé module d'élasticité, le module de Young, et le module d'élasticité de Young, la variation de module d'élasticité selon l'ACI 207.1R-96 est de 1,9 à 3,8 x 10⁴MPa à 28j et de 2,6 à 4,7 x 10⁴MPa à un an (365j).

Les principaux facteurs qui affectent le module d'élasticité sont :

- ❖ l'âge de test, le module d'élasticité augmente avec le temps jusqu'à sa valeur maximale.
- ❖ Le type des agrégats.
- ❖ Le rapport E/C, quant le rapport diminue le module augmente.

I.4.3.4 Coefficient de poisson (ν)

Selon l'ACI 116R-00 le coefficient de Poisson (ν) est la valeur absolue du rapport de déformation transversale à l'axiale correspondante (longitudinale), résultant de la contrainte axiale répartie uniformément en dessous de la limite de proportionnalité de la matière, l'ACI

207.1R-96 donnait la moyenne de la valeur du coefficient à environ de 0,11 et 0,27 car elle varie en fonction de l'âge, des propriétés des granulats et du ciment.

I.4.4 Les propriétés thermique du BCV

L'analyse thermique est influencée par plusieurs paramètres, tels que le coefficient de conductivité, la température ambiante de l'aire, la chaleur spécifique, l'épaisseur de la couche coulée et le coefficient de dilatation thermique, par la suite on donnera quelque définitions de ces paramètres.

I.4.4.1 la Conductivité thermique (λ)

Selon *U.S. Army Corps of Engineers* la conductivité thermique d'un matériau est la vitesse à laquelle il transmet la chaleur, il est défini comme le rapport entre le flux de chaleur et le gradient de température. La teneur en eau, la densité et la température influent significativement sur la conductivité thermique d'un béton spécifique.

Les valeurs typiques données par l'ACI 207.1R-96 sont de 1.83 à 3.86 J/m s °C.

I.4.4.2 la Convection thermique (h)

La convection est le transfert de chaleur par déplacement d'ensemble des molécules d'un corps, ce mode de transfert ne peut se produire que dans les fluides (liquide ou gaz).

I.4.4.3 Coefficient de dilatation thermique (α)

Le coefficient de dilatation thermique peut être défini comme le changement de dimension linéaire par unité de longueur divisée par la variation de température, exprimée en 10^{-6} par °C. Le basalte et bétons calcaires ont des valeurs de 3 à 5 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; bétons de quartzite peuvent atteindre jusqu'à 8 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. (*U.S. Army Corps of Engineers*).

Il est considéré constant pour une variation de température comprise entre 10°C et 66°C (ACI 207.1R-96).

I.4.4.4 Chaleur spécifique (C)

La chaleur spécifique ou la capacité thermique est la chaleur nécessaire pour élever la température d'un poids unitaire de matériau de 1 degré Celsius. Les valeurs pour les différents types de béton sont environ les mêmes et varient de 920 à 1046 j/Kg °C. (*U.S. Army Corps of Engineers*).

I.4.4.5 la Chaleur d'hydratation (Q)

La réaction de l'eau avec le ciment est exothermique et génère une quantité considérable de chaleur sur une longue période de temps. La chaleur de l'hydratation des divers ciments varie de 60 à 95 cal/g à 7 jours et de 70 à 110 cal/g à 28 jours. (*U.S. Army Corps of Engineers*)

I.4.4.6 Capacité de déformation a la traction (ϵ_{te})

A partir de *U.S. Army Corps of Engineers*, la conception est basée sur la déformation de traction maximale. Le module de test de rupture (CRD-C 16) se fait sur des poutres en béton testées à la flexion en trois points. La capacité de déformation à la traction est déterminée en divisant le module de rupture par le module d'élasticité. Les valeurs typiques vont de 50×10^{-6} à 200×10^{-6} (micromètre) selon le taux de chargement et le type de béton.

I.4.4.7 Température adiabatique

Un système adiabatique est un système dans lequel la chaleur n'est pas autorisé à entrer ni sortir (pas d'échange de température avec l'extérieur). Par conséquent, l'élévation de la température adiabatique est le changement dans la température du béton due à la chaleur d'hydratation du ciment dans des conditions adiabatiques. C'est la mesure de l'évolution thermique du mélange de béton dans une analyse thermique.

Dans une très grande masse de béton, la température près du centre de la masse sera approximativement égale à la somme de la température de coulage et la température adiabatique. Cependant, près de la surface, la température sera proche de la température d'air ambiante, la valeur de la température et la forme de la courbe adiabatique peuvent varier de manière significative pour des mélanges de bétons différents.

Des valeurs typiques pour la grandeur de la température adiabatique de béton de masse varient de 11 à 19 °C à 5 jours et entre 17 et 25 °C à 28 jours. (Malkawi A.H., et al (2003))

La détermination de la température adiabatique d'un béton ou d'un mortier (matériaux cimentaires) se fait par un essai adiabatique ou semi-adiabatique, l'essai consiste à isoler une éprouvette de béton, immédiatement après confection, dans un calorimètre, figure 1.1, pour éviter tout échange de température avec l'extérieur et on note la variation de la température issue de la réaction d'hydratation du ciment en fonction du temps à l'aide d'un thermomètre.



Fig. 1.1 Calorimètre semi-adiabatique utilisé aux éprouvettes de béton, Boulay. C et al (2010).

Noorzaei. J et al (2006), Jaafar. M.S et al (2007), Luna. R et Wu. Y (2000), Lawrence. A.M (2009) et Tia. M (2010) utilisaient une formule développée et présentée par Tanabe. T et al (1985), publiée par l'American Society of Civil Engineers (1986), pour estimer la température adiabatique des ciments et de la chaleur d'hydratation.

$$T(t) = K \times (1 - e^{-\alpha t}) \quad \text{eq. (1-5)}$$

Où:

$T(t)$: La température adiabatique en fonction du temps [$^{\circ}\text{C}$].

t : Le temps en jour.

K et α : Des coefficients dépend de la composition du béton, donnés par la figure 1.2.

La quantité totale de la chaleur dégagée par unité de volume est:

$$Q(t) = C \times \rho \times T(t) \quad \text{eq. (1-6)}$$

Où:

$Q(t)$: Quantité de la chaleur dégagée par unité de volume [J/m^3].

C : Capacité thermique [$\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$]

ρ : La densité [kg/m^3]

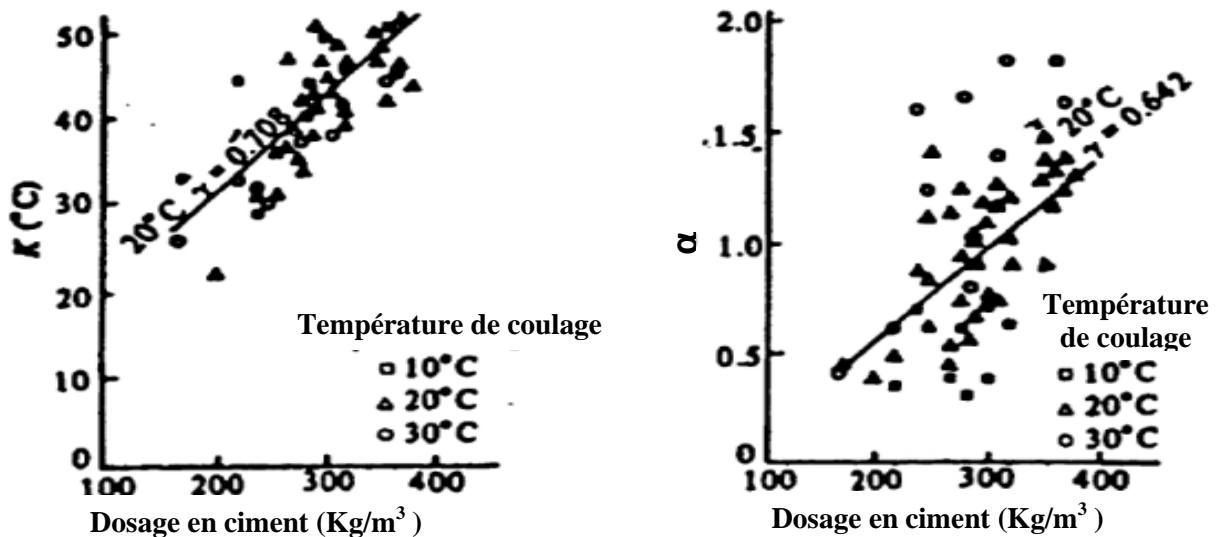


Fig. 1.2 Valeur des coefficients K et α de la température adiabatiques selon Radovanović (1998).

I.5 CONCLUSION

La revue bibliographique faite dans ce chapitre nous a permis de mettre en évidence que la variation de la température dans les structures massives au cours de la construction était la conséquence de la chaleur d'hydratation des liants. Le développement de l'hydratation du liant joue donc un rôle fondamental vis-à-vis d'évolution de la température. En effet, celui-ci contribue à la création de déformations (d'origines thermique, "dilatation si ΔT est positif et contraction au contraire") et en parallèle au développement des résistances, si ces déformations sont bloquées à l'intérieur (par des parties de la structure déjà durcie) ou à l'extérieur (par la fondation) des contraintes se produisent, dans le cas où ces contraintes dépassent la résistance du béton, un risque de fissuration précoce est prévu.

Le premier objectif de ce travail de thèse sera donc de déterminer la distribution des températures durant la construction d'un barrage en béton, en prenant en considération la procédure de construction, les propriétés des matériaux utilisés et les conditions environnemental et aux limites.

Le second objectif sera la détermination de la distribution des contraintes thermiques pendant la construction du barrage et la prédiction d'apparition des fissures en se basant sur les résultats de l'étude thermique, la procédure de construction et la variation des propriétés structurales. Enfin, on effectuera une étude paramétrique sur la température initiale de coulage (température du gâché).

Chapitre 2

ELEMENTS DE BARRAGES ET CALCUL DE STABILITE

II.1	INTRODUCTION	32
II.2	LES BARRAGES	32
II.3	TYPES DES BARRAGES	33
II.4	ELEMENT DE CALCUL DE STABILITE DES BARRAGES	34
II.5	ANALYSE THERMIQUE	36
II.6	CONCLUSION	39

II.1 INTRODUCTION

La bibliographie nous a permis de mettre en évidence que l'un des phénomènes physiques centraux dans la prévision du risque de fissuration précoce était le développement de l'hydratation du liant. Cette hydratation est en effet à l'origine:

- Du dégagement de chaleur responsable des déformations thermiques.

Il apparaît ainsi essentiel d'effectuer une analyse thermique d'une structure massive telle que les barrages permettant de prédire la distribution de la température et des contraintes thermiques, en prenant en considération que les sollicitations thermiques (d'hydratation) et le poids propre de la structure.

Ce deuxième chapitre va présenter le concept de l'analyse thermique, nous présentons en premier lieu les différents types des barrages.

La première partie sera consacrée à la présentation des différents types de barrages, en citant les types des barrages les plus utilisés au monde avec une brève définition de chaque type, en ajoutant par la suite des éléments de calcul de la stabilité des barrages.

Nous verrons ensuite, dans la seconde partie de ce chapitre, comment la chaleur d'hydratation de ciment donne une influence importante sur les structures massives, le concept de l'analyse thermique et l'exigence de control des températures pour éviter la fissuration liée au gradient thermique.

II.2 LES BARRAGES

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à en retenir l'eau. Par extension, on appelle barrage tout obstacle placé sur un axe de communication et destiné à permettre un contrôle sur les personnes et/ou les biens qui circulent (barrage routier, barrage militaire).

Quand le barrage est submersible, on parle plutôt de chaussée ou de digue (ce dernier terme est également préféré à celui de barrage lorsqu'il s'agit de canaliser un flot et non de créer une étendue d'eau stagnante).

Un barrage fluvial permet par exemple la régulation du débit d'une rivière ou d'un fleuve (favorisant ainsi le trafic fluvial), l'irrigation des cultures, une prévention relative des catastrophes naturelles (crues, inondations), par la création de lacs artificiels ou de réservoirs.

Un barrage autorise aussi, sous certaines conditions, la production de force motrice (moulin à eau) et d'électricité (barrage hydroélectrique), à un coût économique acceptable, le coût environnemental étant plus discuté.

Toutefois, plus un projet est ambitieux, plus ses conséquences sont lourdes : en noyant des vallées entières, la construction d'un barrage peut provoquer à la fois des bouleversements humains en forçant des populations entières à se déplacer, et avoir un impact écologique non négligeable en changeant fondamentalement l'écosystème local.

II.3 TYPES DES BARRAGES

Selon la technique de construction, les matériaux utilisés et le mode de résister à la pression exercée par l'eau, on distingue plusieurs types des barrages.

II.3.1 Barrage poids

Un barrage poids est un barrage dont sa propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple (leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangle). On compte deux grandes familles de barrages poids, les barrages poids-béton, et les barrages en remblais (ces derniers n'étant d'ailleurs généralement pas qualifiés de barrage-poids, mais de barrage en remblais).

II.3.2 Barrage voûte

La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à double courbure).

La technique de barrage voûte nécessite une vallée plutôt étroite (même si des barrages voûtes ont été parfois construits dans des vallées assez larges, poussant cette technologie à ses limites) et un bon rocher de fondation. Même lorsque ces conditions sont réunies, le barrage voûte est aujourd'hui souvent concurrencé par les barrages poids en béton ou le barrage en enrochements, dont la mise en œuvre peut être davantage mécanisée. Par le peu de matière utilisée, c'est évidemment une technique très satisfaisante économiquement.

On rencontre aussi des barrages avec plusieurs voûtes comme le barrage de l'Hongrin en Suisse.

II.3.3 Barrage contreforts

Lorsque les appuis sont trop distants, ou lorsque le matériau local est tellement compact qu'une extraction s'avère presque impossible, la technique du barrage à contreforts permet de réaliser un barrage à grande économie de matériaux. Le mur plat s'appuie sur des contreforts en béton armé encastrés dans la fondation, qui reportent la poussée de l'eau sur les fondations inférieures et sur les rives.

II.3.4 Barrage en remblais

On appelle barrages en remblais tous les barrages constitués d'un matériau meuble, qu'il soit très fin (argile) ou très grossier (enrochements). Cette famille regroupe plusieurs catégories, très différentes. Les différences proviennent des types de matériaux utilisés, et de la méthode employée pour assurer l'étanchéité.

Le barrage homogène est un barrage en remblai construit avec un matériau suffisamment étanche (argile, limon). C'est la technique la plus ancienne de barrages en remblai.

Le barrage à noyau argileux comporte un noyau central en argile (qui assure l'étanchéité), épaulé par des recharges constituées de matériaux plus perméables. Cette technique possède au moins deux avantages sur le barrage homogène: (1) les matériaux de recharge sont plus résistants que les matériaux argileux, on peut donc construire des talus plus raides et (2) on contrôle mieux les écoulements qui percolent dans le corps du barrage.

II.4 ELEMENT DE CALCUL DE STABILITE DES BARRAGES

Selon le comité Français des grands barrages (2002), le calcul des barrages poids est fait le plus souvent en deux dimensions. Un calcul tridimensionnel se justifie pour un barrage implanté dans une vallée relativement étroite et/ou pour un ouvrage courbe en plan. La contribution à la stabilité peut être dans certains cas significatif même si la difficulté reste grande pour l'évaluer avec précision.

Les méthodes utilisées pour étudier la stabilité des barrages consistent à considérer un plot de barrage comme un bloc indéformable soumis à des combinaisons des actions.

On analyse successivement la stabilité au glissement, la stabilité au renversement et la stabilité interne.

➤ **Stabilité au glissement**

Si N et T sont les composantes normales et tangentielles de la résultante des actions sur la fondation, le critère couramment retenu est :

$$\frac{N \cdot \tan \varphi}{T} \geq F \quad \text{eq. (2-1)}$$

Ceci revient à négliger la cohésion des fondations. L'angle de frottement φ entre le barrage et sa fondation est en général pris égal à 45° pour un rocher sain, mais peut prendre des valeurs beaucoup plus faibles dans certains cas (par exemple $\varphi = 25^\circ$ pour des fondations marneuses).

Le coefficient de sécurité F doit être supérieur ou égal à 1,5 pour les combinaisons fréquentes ou rares et à 1,3 pour les combinaisons accidentelles (séisme).

➤ **Contraintes normales**

Plutôt qu'une stabilité au renversement (qui serait précédée par une rupture locale par compression du pied aval de l'ouvrage), il s'agit de vérifier que le diagramme de contraintes à la base de la fondation reste dans le domaine admissible tant en traction en pied amont qu'en compression en pied aval.

On admet l'hypothèse de NAVIER d'une répartition trapézoïdale des contraintes à la base du barrage, hypothèse liée au comportement élastique du béton et des fondations, qui est valide pour les barrages de petite ou moyenne dimension.

Le critère couramment adopté de non traction en pied amont du barrage équivaut à la « règle du tiers-central », c'est-à-dire que l'excentricité e du point d'application de la résultante des actions doit être inférieure à $B/6$, B étant la largeur de la base du barrage.

Ce critère doit être strictement vérifié pour les combinaisons d'actions fréquentes ou quasi-permanentes (retenue normale).

On peut, par contre, admettre des tractions modérées en pied amont par les combinaisons d'actions rares ou accidentelles ($\sigma_t < 0,2$ MPa pour un BCV et $\sigma_t < 0,05$ MPa pour un BCR).

➤ *Stabilité interne*

On étudie la stabilité de la partie supérieure du barrage, le long d'un plan horizontal situé à une profondeur z sous le niveau de la retenue. Maurice LÉVY a proposé un critère pour lequel la contrainte normale σ_t à l'amont, calculée hors sous-pressions, reste toujours supérieure à la pression de l'eau au même niveau :

$$\sigma_t > \gamma_w z \quad \text{eq. (2-2)}$$

En fait, ce critère paraît très sévère et la qualité des bétons actuels permet de réduire cette exigence. Le critère habituellement retenu est donc :

$$\sigma_t > 0.75 \gamma_w z \quad \text{eq. (2-3)}$$

Critère de Maurice LÉVY satisfait à 75 %.

Ce critère est à vérifier pour les combinaisons d'actions rares (crue de projet).

On doit aussi vérifier la stabilité interne au glissement, notamment lorsqu'un problème se pose pour la résistance entre couches (cas du BCR).

En plus de ces vérifications de stabilité du barrage il y aura une autre étude très importante, il s'agit d'une analyse thermique du barrage en cours de construction.

II.5 ANALYSE THERMIQUE

Le béton de masse est défini selon l'ACI 116R-00 comme étant, tout volume de béton avec des dimensions suffisamment grandes pour exiger que des mesures soient prises pour faire face à la génération de la chaleur de l'hydratation du ciment et le changement de volume standard, afin de minimiser la fissuration.

La vérification de ces changements de volume exige des concepteurs d'effectuer une analyse thermique, pour évaluer la répartition de la température et les contraintes thermiques en vue de prédire le changement de volume dû au retrait thermique.

II.5.1 Concept de l'analyse thermique

La nature de la réaction entre le ciment et l'eau est exothermique, cette réaction provoque l'augmentation de la température dans la masse du béton. Cette augmentation de la température dans la masse de béton dépend de plusieurs paramètres tels que, les propriétés

thermiques du béton, la chaleur générée par le béton lui-même (la chaleur d'hydratation du ciment), les conditions environnementales, la géométrie de la structure, les procédures et les conditions de construction. Habituellement la température maximale est atteinte de quelques jours à quelques semaines après le coulage (placement), suivie par un refroidissement lent qui peut durer de plusieurs mois à plusieurs années. Le cœur se refroidit éventuellement à une température stable ou oscille autour de la température ambiante annuelle de la région.

Cette évolution de la température donne un gradient thermique qui est la cause d'un changement de volume du béton constituant la structure, ce dernier est proportionnel à la variation de la température et le coefficient de dilatation du béton, lors du refroidissement de la masse, si le changement de volume est retenu à l'extérieur par la fondation ou à l'intérieur par le béton précédemment coulé (reprise de bétonnage), figure 2.1, peut être il y aura une apparition des fissures. La fissuration se produit généralement dans le corps principal ou à la surface de la structure, ces deux phénomènes de fissuration sont appelés respectivement gradient de fissuration de masse (fissuration en blocs) et gradient de fissuration de surface (fissuration de peau), figure 2.2. L'ACI 207.R1 contient des informations détaillées sur la génération de chaleur, changement de volume et la fissuration du béton de masse.

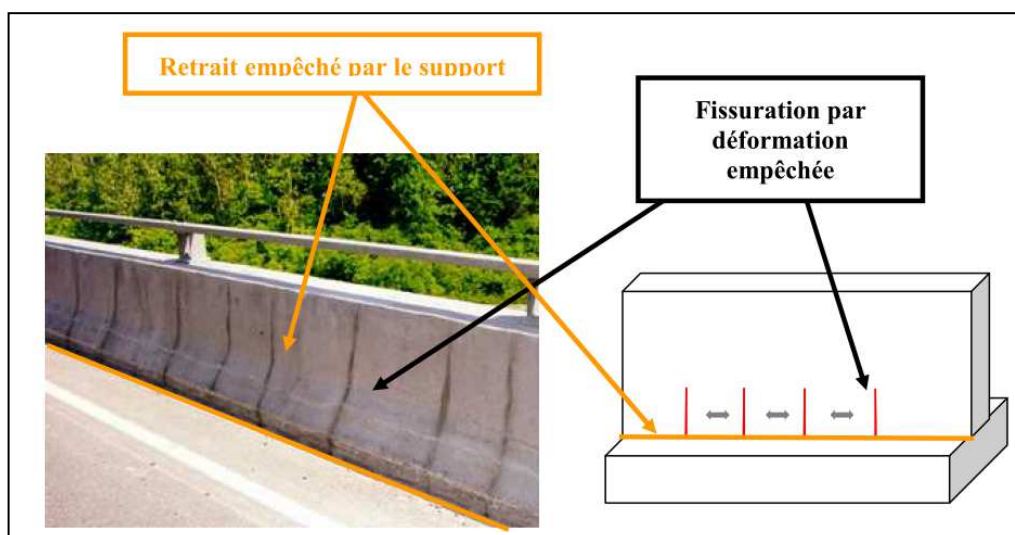


Fig. 2.1 Illustration de la fissuration par déformation structurellement empêchée
Buffo-Lacarrière. L (2006)

Les objectifs de l'analyse thermique ont été de définir une procédure d'analyse qui pourrait être utilisés dans les grands projets, les intentions étaient de ne pas utiliser les résultats de l'analyse au processus de conception, mais de profiter des informations disponibles lors de la

construction. Les caractéristiques thermiques du matériau, les conditions thermiques et les hypothèses de modélisation ont été étudiées pour obtenir un modèle donnant une distribution de température aussi proche que possible de la température mesurée dans le barrage, le modèle de travail permet de prédire la répartition des températures dans le barrage à différents temps.

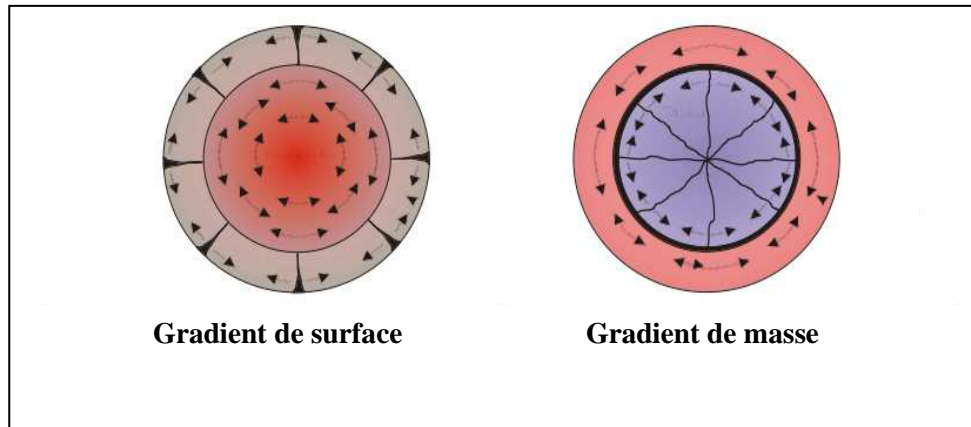


Fig. 2.2 développement du gradient des contraintes thermiques.

II.5.2 Objectif de l'analyse thermique

L'analyse thermique est l'une des analyses les plus importantes qui doivent être effectuées, par la méthode des éléments finis à la fin de conception, est basé sur l'introduction des caractéristiques thermiques et mécaniques du modèle, et qui peut aider à prédire la distribution de la température lors de l'hydratation et les contraintes thermiques qui résultent du gradient thermique au sein de la structure. Elle fournit un guide pour élaborer des caractéristiques de conception avantageux, en optimisant la composition de béton, et mettre en œuvre les exigences de construction nécessaires, telle que le choix de type du ciment, l'épaisseur des couches et la fixation de programme des travaux. En outre, elle fournit des économies en révisant la configuration structurelle, la séquence de construction, la température du béton au moment de coulage, les cadences de coulage, et les exigences d'isolation. Les économies de coûts peuvent être obtenues par des éléments tels que l'élimination des joints inutiles donc réduire le coût de maintenance, éviter ou au moins minimiser l'utilisation des systèmes de refroidissement (installation de réfrigération) si possible. La chose la plus importante est d'éviter le problème de la fissuration précoce et d'assurer la durabilité d'ouvrage.

II.5.3 Exigences de contrôle de température

Les contraintes thermiques importantes induites sont développées en raison de la chaleur d'hydratation des matériaux cimentaires du béton dans les barrages. La répartition des températures à travers le barrage et son temps d'évolution dépendent des facteurs suivants:

- Propriétés du béton.
- Facteur climatique.
- Procédure de construction.
- Épaisseur des couches.
- la température initiale de la couche,
- l'intervalle entre le placement (coulage) des couches.

Ces contraintes de conséquence thermiquement peuvent être suffisamment importantes pour provoquer des fissures dans le béton, le développement récent dans les logiciels basés sur des méthodes numériques avancées, avec la puissance sans cesse croissante des ordinateurs permettent des analyses complexes pour tel problème thermique et structuraux.

Le programme ANSYS basé sur la méthode des éléments finis est utilisé pour analyser le comportement thermique du barrage. Les résultats de conception de l'analyse numérique sont:

- Déterminer la distribution spatiale de température et son évolution avec le temps,
- Déterminer la distribution des contraintes pendant et après la construction du barrage,
- D'identifier l'espacement approprié conjointe afin de minimiser le développement de la fissuration transversale,
- De déterminer les limites de température de placement du béton.

II.6 CONCLUSION

Ce deuxième chapitre a permis la présentation des types des barrages avec un élément de calcul de stabilité des barrages, ainsi que le concept de l'analyse thermique, il facilite la compréhension du processus de fissuration précoce qui était la conséquence du retrait thermique provenant des gradients thermiques, l'intérêt de l'analyse thermique est de minimiser les coûts de construction des barrages et chercher à améliorer la durabilité des structures massives par une exigence de contrôler les températures au sein des structures.

EXPERIMENTATION NUMERIQUE ET RESULTATS

III.1	INTRODUCTION	41
III.2	CAS ETUDIE	41
III.3	METHODOLOGIE DE MODELISATION	44
III.4	HYPOTHESES PRINCIPALES DE MODELISATION	45
III.5	PROPRIETES ET PARAMETRES DU MODELE	45
III.6	LOGICIEL ANSYS	52
III.7	RESULTATS D'ANALYSE THERMIQUE	56
III.8	RESULTATS DES CONTRAINTES THERMIQUES	69
III.9	ANALYSE DE LA FISSURATION	82
III.10	CONCLUSION	87

III.1 INTRODUCTION

Notre travail expérimental a porté sur la détermination de la distribution de la température et des contraintes thermiques dans un barrage en béton durant la construction, donc sous des sollicitations thermiques issues de l'hydratation de ciment exothermique. L'analyse bibliographique a montré que de très nombreuses études ont déjà été réalisées sur le sujet.

Le point de vue original adopté ici est la simulation d'un barrage voûte construit par un béton conventionnel vibré (BCV). Deux catégories de propriétés participent à l'étude, la première concerne les propriétés du barrage, ses constituants, la technique et la procédure de construction, la seconde concerne les conditions environnementales.

Le chapitre que nous abordons va présenter les caractéristiques du barrage étudié, ainsi que les propriétés thermiques et mécanique du modèle afin de prévoir la distribution de la température et des contraintes thermiques.

Dans un premier temps, on donne les caractéristiques géométriques du barrage étudié et la situation du projet pour fixer les propriétés environnementales, par la suite nous montrons les paramètres entrant en jeu dans l'étude, parmi ces paramètres la chaleur d'hydratation qui est le paramètre moteur, ainsi que la capacité thermique, les coefficients d'échange thermique sans oublier la présentation du programme ANSYS utilisé comme outil de simulation.

La deuxième partie sera ensuite consacrée à la présentation des résultats de simulation que ce soit pour le cas d'analyse thermique ou d'analyse des contraintes. On représente les résultats graphiquement et ensuite on donne l'évolution des températures et des contraintes en fonction du temps et la variation en fonction de la position de point.

III.2 CAS ETUDIE

Nous prenons comme barrage à étudier le barrage de Brezina El-Bayadh Algérie.

III.2.1 Description du barrage

Le barrage de Brezina est situé à une latitude de 33.099379° Nord ($33^\circ 05' 58''$) et une longitude de 1.260767° Est ($1^\circ 15' 39''$) à Khneg Larouia, Oued Seggueur, wilaya d'El-Bayadh Algérie. Il a une altitude d'environ de 870m NGA, il est au Sud Ouest d'Alger à environ 650Km, figure 3.1, la wilaya est divisé en trois parties, dans le nord les Hautes

Plaines, le centre l'Atlas Saharien et dans le sud le Pré-Saharienne où se trouve le barrage étudié.

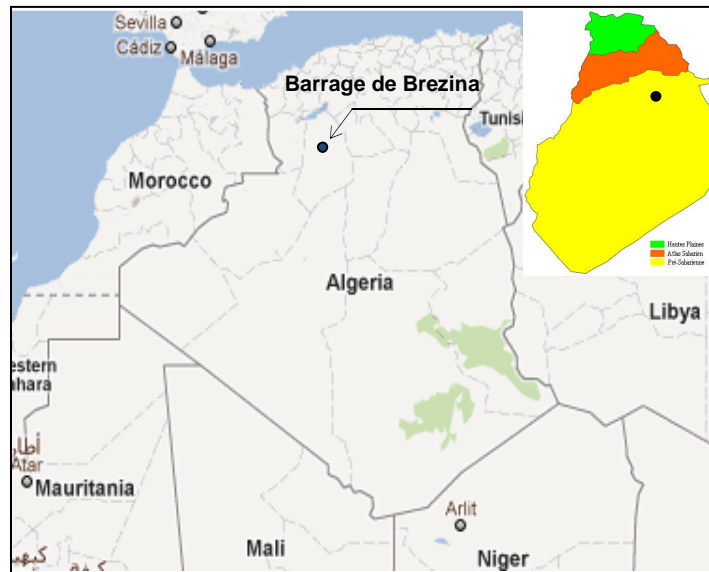


Fig. 3.1 implantation du barrage de Brezina, (Google Mappe.)

III.2.2 Caractéristiques géométriques

Le barrage de Brezina est un barrage poids, voûte en béton, voir figure 3.2. Il est construit sur une fondation rocheuse (calcaire selon le rapport du ANB) pour assurer des ressources en eau à la région soit potable ou pour l'irrigation, surtout à Dhayat El-Bagrat et d'autre part un acquis à une région touristique.



Fig. 3.2 photo au-dessus du barrage du Brezina.

Les caractéristiques du barrage sont :

- ❖ Une hauteur totale de 63m.
- ❖ Une élévation de 910m NGA.
- ❖ Une longueur d'arc au sommet de 153m.
- ❖ Un rayon maximal d'arc de 67,80m.
- ❖ Une épaisseur maximale de 41,33 m, et
- ❖ Une épaisseur de 3m au couronnement.

L'amont du barrage est horizontal sauf entre 892,33 et 897,00m à une pente de 0,6 : 1,0 ; la partie aval à une inclinaison de 1,0 : 0,6 avec un sommet parabolique et un pied hyperbolique à un rayon de 10,00m formé le saut de ski. Figure 3.3 et 3.4.

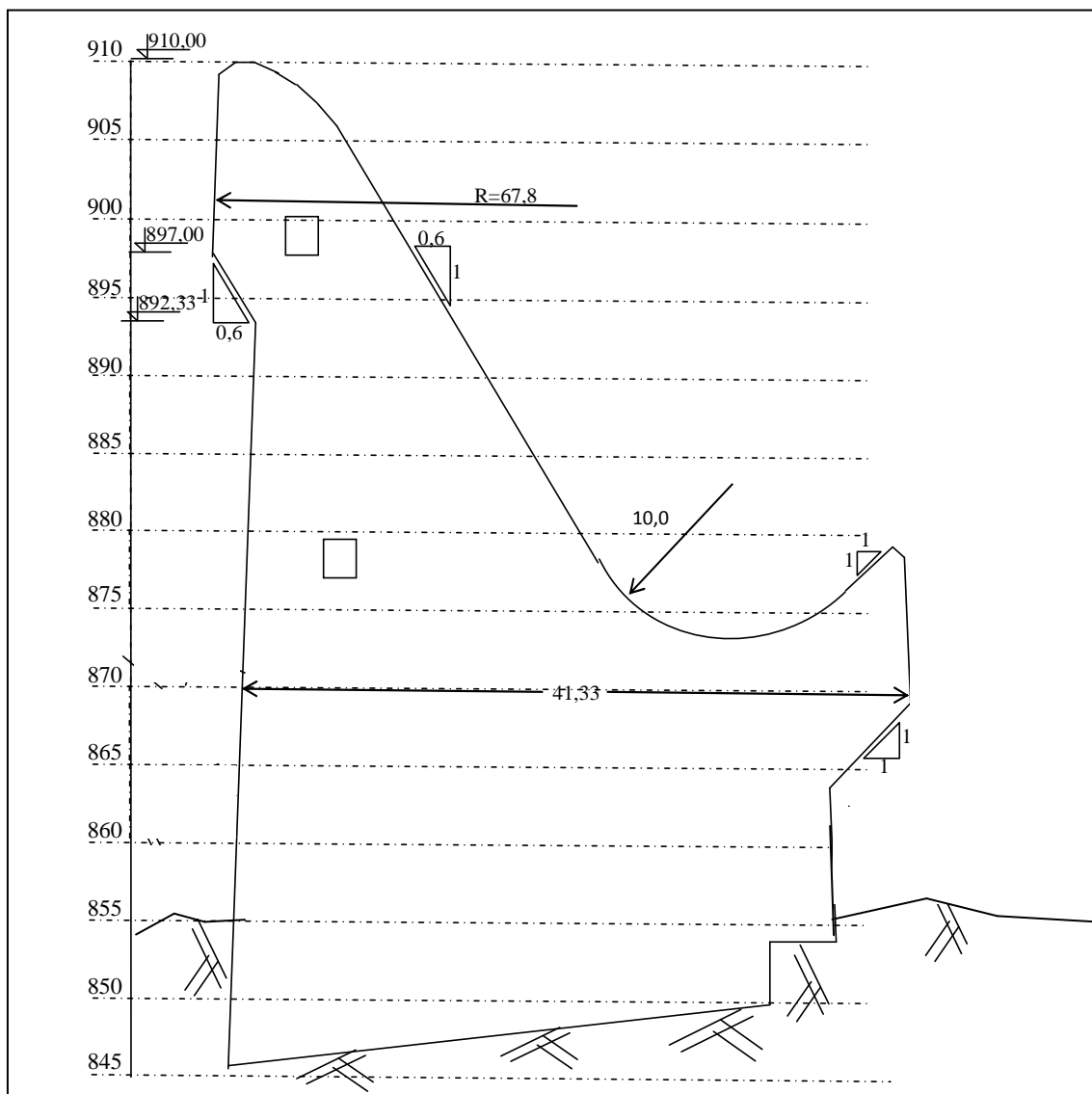


Fig. 3.3 coupe transversale et paramètre dimensionnel du barrage.

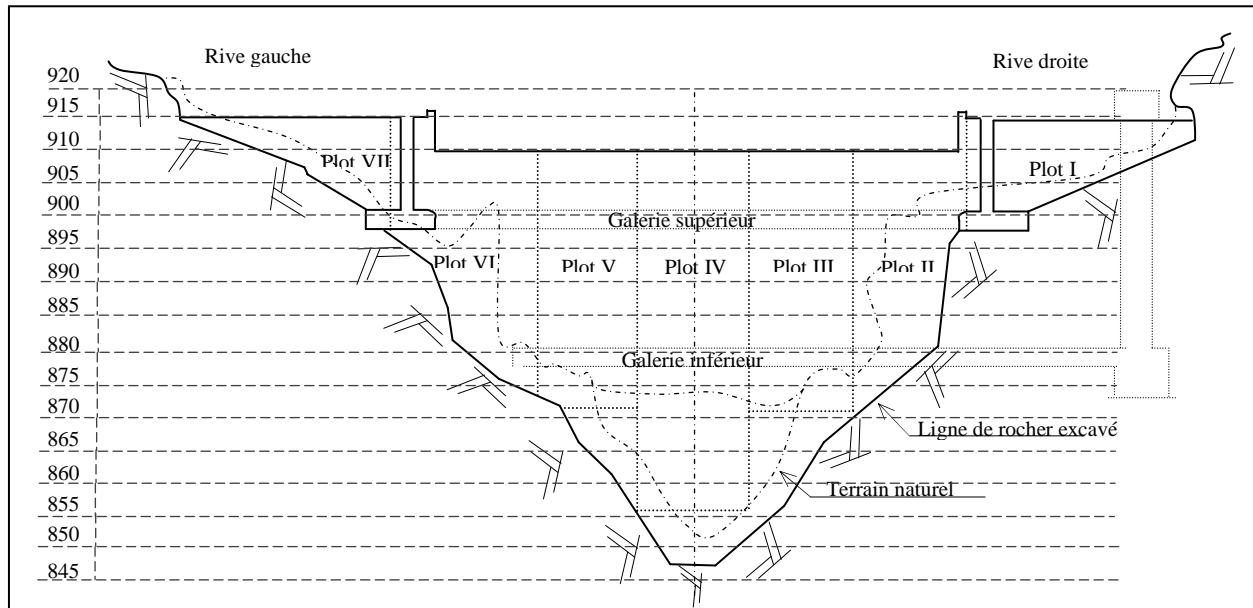


Fig. 3.4 coupe longitudinale du barrage

III.3 METHODOLOGIE DE MODELISATION

Vue l'impossibilité de coupler la simulation thermique et mécanique d'un problème en même temps, l'analyse thermomécanique a été modélisée en deux phases. Pour effectuer cette modélisation, tout d'abord on simule le comportement thermique du barrage à l'aide de construction progressive, les résultats du modèle thermique sont ensuite appliqués par superposition au modèle structurel, qui comprenait également le processus de construction, étape par étape.

L'analyse se fait en remontant d'une couche de 3m tous les 10 jours pour procéder à la construction du barrage. Dans le cas réel de la construction, cette durée est variable, elle dépend des contraintes de réalisation sur chantier, donc il y aura des arrêts pendant la construction, mais le cas le plus défavorable c'est le cas des courtes durées de construction, qui s'écoule entre le coulage d'une couche supérieure et la couche sous-jacente, pour cela on prend la durée minimale (10 jours).

On a effectué l'analyse de deux sections, la construction de la section (N° 1) s'écoule durant 230 jours (23 couches), et la section (N° 2) prend 180 jours (18 couches).

III.4 HYPOTHESES PRINCIPALES DE MODELISATION

La simulation se base sur des hypothèses simplificatrices qui sont liées à des facteurs influents sur les variations thermiques et la répartition des contraintes.

- ✓ Le barrage est divisé en couches de 3m de hauteur, chaque couche est réalisée après la précédente avec un intervalle de 10 jours. Le coulage d'une couche va augmenter la température de la couche sous-jacente et retarder son refroidissement;
- ✓ La température de l'air, qui représente les conditions du site de projet, varie durant la journée, vue la difficulté de prédire ces variations et l'augmentation du nombre des paramètres d'algorithme, on prend la moyenne annuelle;
- ✓ Le coefficient de conductivité thermique est uniforme pour toutes les couches et dans toutes les directions;
- ✓ La fondation est homogène et uniforme;
- ✓ La température de placement est constante (égale pour toutes les couches);
- ✓ La déformation se fait selon un plan élastique linéaire.

III.5 PROPRIETES ET PARAMETRES DU MODELE

L'analyse est influencée par les propriétés et les paramètres du modèle étudié, tels que la conductivité thermique, la densité, le module de Young, la capacité thermique et la chaleur d'hydratation.

III.5.1 Composition du béton

La composition de béton joue un rôle principal dans le comportement soit thermique ou structural. Les granulats utilisés à la confection du béton sont des calcaires, le ciment est un ciment portland (CEM I), la composition d'un mètre cube (1m^3) de béton proposé est donnée au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Composition du béton

Désignation des composants	La masse m (Kg/m^3)
Granulats (classe comprise entre 0 et 50mm)	2074
Ciment	180
Eau de gâchage	140

III.5.2 La température initiale de coulage

Selon Malkawi et al (2003, 2004) La température des agrégats à une grande influence sur la température initiale du béton frais, due au volume d'eau de gâchage faible et la différence négligeable entre la température de l'eau et la température des agrégats, la température d'eau a une faible signification sur la température, le tableau 3.2 est la base d'estimation de la température des agrégats et l'approximation de la température de placement de béton.

La température des granulats dépend du stockage, le concassage, le frottement entre les grains en malaxage et le transport des granulats qui sont liés à la moyenne de la température mensuelle.

La température de coulage maximale utilisée à la construction du barrage est de 20°C, c'est la température qu'on va utiliser à l'analyse. Pour la température mensuelle voir annexe A.

Tableau 3.2 Température initiale du béton en temps de coulage.

mois	T (C°) mois	moyen Annuel	Diffé- rence	2/3 Diffé- rence	secon total	Frot- tement Granula	Stock Granula	adit malaxag e	adit trans- port	T (C°) final
Janvier	8.65	20.20	-11.55	-7.70	12.50	1.2	13.70	1.2	-0.6	14.30
Février	8.65	20.20	-11.55	-7.70	12.50	1.2	13.70	1.2	0	14.90
Mars	13.40	20.20	-6.80	-4.53	15.67	1.2	16.87	1.2	0.6	18.67
Avril	18.90	20.20	-1.30	-0.86	19.33	1.2	20.53	1.2	0.6	22.33
Mai	25.20	20.20	5.00	3.34	23.53	1.2	24.73	1.2	1.1	27.03
Juin	30.75	20.20	10.55	7.04	27.23	1.2	28.43	1.2	1.1	30.73
Juillet	33.10	20.20	12.90	8.60	28.80	1.2	30.00	1.2	1.7	32.90
Aout	32.95	20.20	12.75	8.50	28.70	1.2	29.90	1.2	1.7	32.80
Septembre	27.25	20.20	7.05	4.70	24.90	1.2	26.10	1.2	1.1	28.40
Octobre	21.95	20.20	1.75	1.17	21.37	1.2	22.57	1.2	0.6	24.37
Novembre	12.55	20.20	-7.65	-5.10	15.10	1.2	16.30	1.2	0	17.50
Décembre	9.00	20.20	-11.20	-7.46	12.73	1.2	13.93	1.2	-0.6	14.53
Moyenne										23.20

III.5.3 Température initiale de la fondation rocheuse

Avant de déterminer la distribution de la température dans le corps du barrage, il faut connaître la distribution de la température dans le sol rocheux juste avant le démarrage de

coulage du béton, mais il est difficile de mesurer directement la température de la fondation rocheuse. Généralement la distribution de la température dans la fondation est obtenue par calcul, en tant que méthode pour calculer, il est supposé que la température initiale de la fondation est uniformément répartie et est égale à la moyenne des changements de la température atmosphérique pendant deux ans selon les données observées. (Ishikawa M., 1991).

III.5.4 Propriétés et conditions environnementales

Les paramètres utilisés à la simulation du modèle sont ceux introduits dans le logiciel. Ces paramètres sont déterminés au laboratoire pendant la construction ou obtenus par la bibliographie. Parmi ces propriétés on a: la densité, le module de Young, coefficient de Poisson, la chaleur d'hydratation, la chaleur spécifique ou la capacité thermique, la conductivité thermique...etc.

Ces paramètres sont présentés dans le tableau 3.4.

Les échanges convectifs avec l'air sont calculés à partir de la vitesse du vent à laquelle est soumise la surface considérée. Dans la simulation d'échange convectif naturel à l'interface air-béton, la relation entre le coefficient de convection (h) et la vitesse de vent (V) (Lawrence.A 2009) est donnée par l'équation suivante:

$$h = \begin{cases} 5.6 + 4.0 V & \text{si } V < 5 \text{ m/s.} \\ 7.15 V^{0.78} & \text{si } V \geq 5 \text{ m/s.} \end{cases} \quad \text{eq. (3-1)}$$

Avec V: la vitesse de vent en mètre par seconde;

h: le coefficient de convection de l'air.

Dans notre cas on utilise le coefficient d'échange par convection ($h = 27.8 \text{ J/s m}^2$) qui correspond à la vitesse de vent modérée ($V = 5.7 \text{ m/s}$).

La capacité thermique du béton, selon Zreiki (2009), Buffo-Lacarrière (2007) et Mounanga (2003), est déterminée à partir de la composition du béton. Si m_i est la masse des constituants élémentaires notés i, ainsi que C_i les capacités thermiques massique des ses constituants, tableau 3.3, on peut calculer la capacité thermique du béton par la formule 3-2.

Tableau 3.3 Valeur de la capacité thermique des différents constituants (Zreiki 2009).

Constituants	C (J/g °C)
Ciment	0.75 - 0.80
Fumée de silice	0.75
Eau	3.76 - 4.18
Granulat: Quartz	0.75 - 0.80
Granulats: Calcite, Granit, Grés.	0.75 - 0.80

$$C = \sum m_i C_i \Rightarrow C = C_{eau} \times \frac{m_{eau}}{\rho} + C_{cim \text{ et } granulats} \times \left(\frac{m_{ciment} + m_{granulats}}{\rho} \right) \quad \text{eq. (3-2)}$$

$$\Rightarrow C = 3,97 \times \frac{140}{2450} + 0,775 \times \left(\frac{180 + 2074}{2450} \right).$$

$$\Rightarrow C = 0,93986 \text{ KJ/kg } ^\circ\text{C}.$$

$$\Rightarrow C = 940 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}.$$

La conductivité thermique du béton est un autre paramètre principal, les granulats influent sur la conductivité thermique du béton. Neville A.M (2000) propose de déterminer celle-ci à partir de la nature des granulats (cité par Buffo-Lacarriere 2007). La valeur adoptée pour le calcaire est de 3.2 J/m s °C.

Le comportement thermique du barrage est modélisé sous l'effet de la chaleur générée par la réaction exothermique du ciment durant le durcissement. Le transfert de la chaleur dans le béton et la fondation se fait par conduction et la convection sur les faces exposées à la température ambiante (à l'air libre).

L'analyse des contraintes thermiques fait appel à un autre paramètre: c'est le coefficient de dilatation thermique.

Les propriétés des granulats et des roches d'assise sont données à l'annexe B.

Tableau 3.4 Propriétés adopté à l'analyse thermique.

PROPRIETES DU BETON	
La densité	2450 kg/m ³
Coefficient de dilatation thermique	7.6 10 ⁻⁶ /°C
Capacité thermique	940 J/kg °C
La conductivité thermique	3.2 J/s m °C
La convection thermique à (l'air)	27.8 J/s m ²
Chaleur générée par le béton	376.16 J/g à 28 jours
Température initiale de coulage (placement)	18 - 20 - 25 et 30 °C
Module d'élasticité (Young)	26.6 GPa
PROPRIETES DE LA FONDATION ROCHEUSE	
La densité	2677 kg/m ³
Coefficient de dilatation thermique	6 10 ⁻⁶ /°C
Capacité thermique	920 J/kg °C
La conductivité thermique	2.6 J/s m °C
Température initiale de la fondation rocheuse	20.2 °C

III.5.5 La chaleur d'hydratation

L'hydratation de ciment est une réaction exothermique, la chaleur dégagée par cette réaction est mesurée par un essai adiabatique ou semi-adiabatique.

Radovanović (1998), Luna. R et Wu. Y (2000), Noorzaei. J et al (2006), Jaafar. M.S et al (2007), Lawrence. A.M (2009) et Tia. M (2010) utilisent une formule développée et présentée par Tanabe et al (1986), cette formule donne la température adiabatique de béton en fonction de temps, dans notre cas on va prendre cette formule pour déterminer la température adiabatique T_{ad} .

$$T(t) = K \times (1 - e^{-\alpha t}) \quad \text{eq. (3-3)}$$

Où:

$T(t)$: La température adiabatique en fonction du temps [°C].

t : Le temps en jour.

K et α : Des coefficients donnés par la figure 3.5.

La quantité totale de la chaleur dégagée par unité de volume est:

$$Q(t) = C \times \rho \times T(t) \quad \text{eq. (3-4)}$$

Où:

$Q(t)$: Quantité de la chaleur dégagée par unité de volume [$\text{J}/\text{m}^3\text{s}$].

C : Capacité thermique [$\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$]

ρ : La densité [kg/m^3]

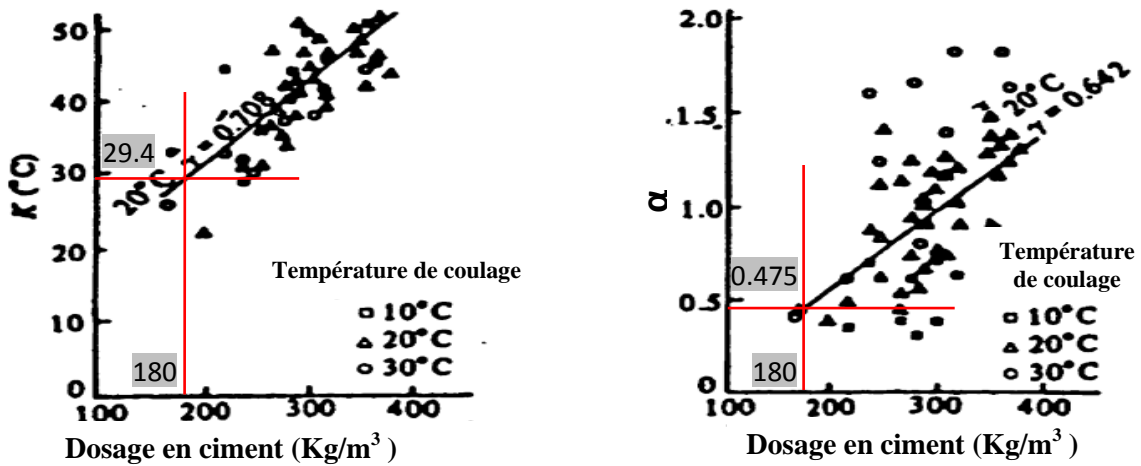


Fig. 3.5 Abaque de détermination des coefficients K et α selon Radovanović (1998).

La chaleur générée par $180\text{kg}/\text{m}^3$ de ciment basé sur la chaleur d'hydratation est représenté sur la figure 3.6, on adopte une chaleur d'hydratation de 376.16 J/g à 28 jours et on utilise à l'analyse thermique.

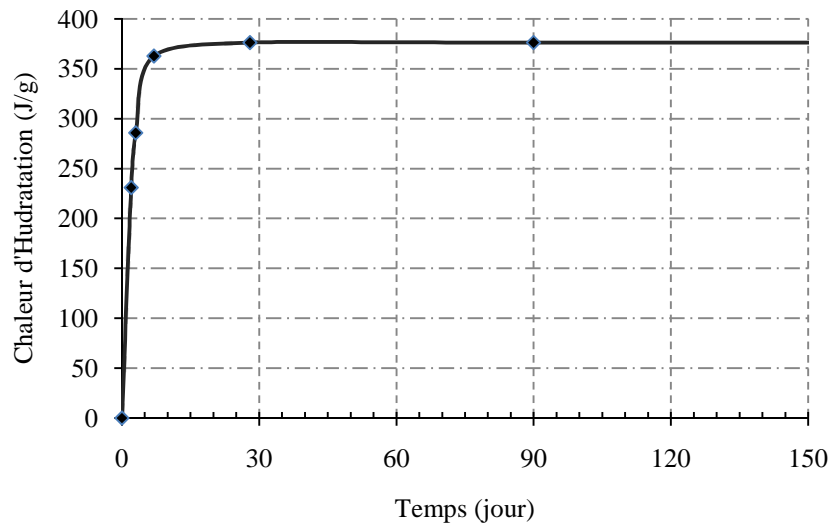


Fig. 3.6 Chaleur cumulée d'hydratation pour le ciment.

La chaleur d'hydratation utilisée à l'analyse par élément fini est représentée à la figure 3.7.

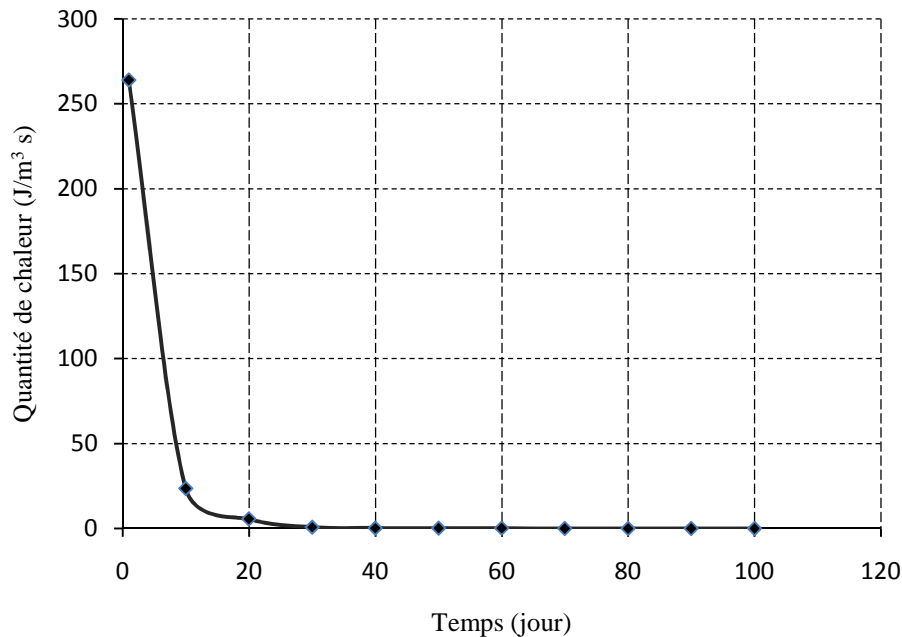


Fig. 3.7 Chaleur d'hydratation du béton (180kg/m^3 de ciment) pour l'analyse en éléments finis.

III.5.6 Conditions initiales et aux limites

Les conditions aux limites du problème et les conditions initiales que ce soit pour le cas d'analyse thermique ou d'analyse des contraintes sont représentées à la figure 3.8.

- a.** Toutes les limites de la fondation assurent une condition adiabatique;

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ (Pas de changement de température à la direction normale du plan).}$$

Où: T: La température.

n: La normale de la face considéré.

- b.** Les surfaces exposées à la température atmosphérique satisfont à la condition suivante:

$$K \times \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T_s - T_a) \quad \text{eq. (3-5)}$$

Où: T_s : La température de la surface.

T_a : La température ambiante.

- c.** Pour les conditions initiales, la température initiale de coulage (placement) de chaque couche est égale à la température de placement, la température dans n'importe quels points de la fondation est égale à la température initiale de la fondation rocheuse avant le démarrage de la construction.

- d. En ce qui concerne les conditions structurales, la fondation est considérée comme étant infinie et le mouvement horizontal de la fondation est bloqué à l'extrémité gauche et droite, le mouvement vertical est bloqué à la base.

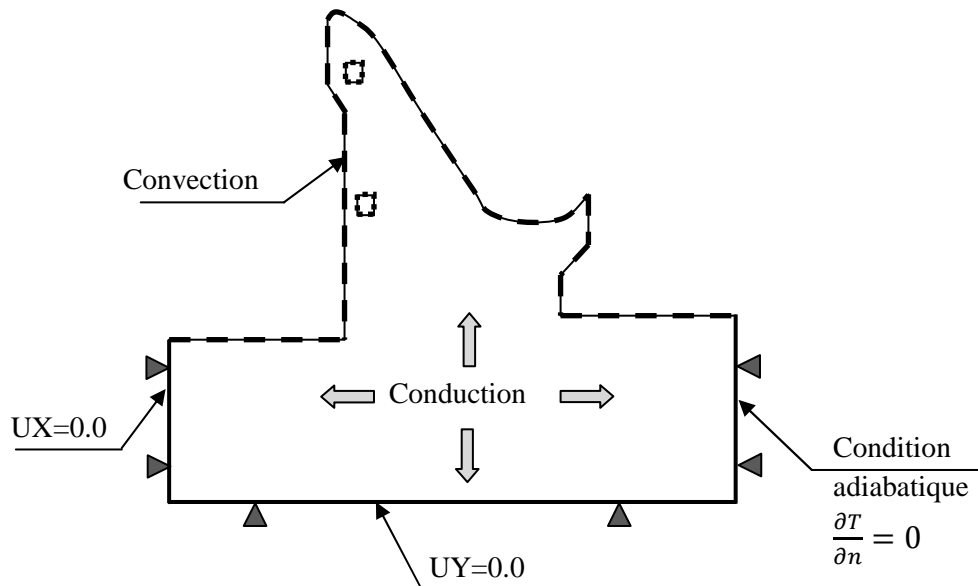


Fig. 3.8 Conditions aux limites thermique et structurales.

III.6 LOGICIEL ANSYS

ANSYS, Multi Physiques, est un code de calcul généraliste capable de traiter de nombreux problèmes faisant intervenir des phénomènes englobant à la fois la mécanique des structures, la mécanique des fluides, la thermique, l'électricité et le magnétisme.

ANSYS est un logiciel basé sur la méthode des éléments finis, permet aux ingénieurs d'effectuer les tâches suivantes:

- ❖ Construire des modèles informatiques ou de transférer des modèles de structures, produits, composants ou systèmes.
- ❖ Appliquer les charges d'exploitation ou d'autres conditions de performance de conception (comme les conditions aux limites).
- ❖ Étudier les réactions physiques, tels que les niveaux de contraintes, les distributions de température.
- ❖ Optimiser la conception avant le processus de développement afin de réduire les coûts de production.

Le programme ANSYS à une interface graphique qui donne aux utilisateurs un accès facile. Le menu principal contient des commandes organisées par préprocesseur. Les

utilisateurs peuvent utiliser les données d'entrée d'une souris, un clavier ou une combinaison entre les deux, on peut même utiliser des lignes de commandes.

III.6.1 La commande d'activation et d'extinction (*Birth, Death*)

L'activation et l'extinction des éléments est également certaines des commandes efficaces dans le programme ANSYS (*Birth and Death*), elle est utilisée pour simuler des problèmes dépendant du temps (l'existence d'une sollicitation ou un élément est périodique).

Pour le cas étudié, l'effet thermique dû à la chaleur d'hydratation par exemple, la construction du barrage se faisant par couches. Pour la confection de la première couche, on active cette couche avec sa température et l'échange convectif aux surfaces exposée à l'air. Quand on ajoute (active) la couche sus-jacente on supprime le transfert de chaleur par convection entre les deux couches et on active l'échange par conduction entre les deux couches, on change également la chaleur d'hydratation selon le temps, car cette réaction est évolutive.

Toutefois, l'élément qui a déjà induit la fonction d'activation, ne doit pas éliminer par la suite dans les autres étapes, sauf les conditions aux limites qui changent, on supprime la convection à la couche précédente et on active à la couche suivante et ainsi de suite jusqu'à la fin de construction voir figure 3.9.

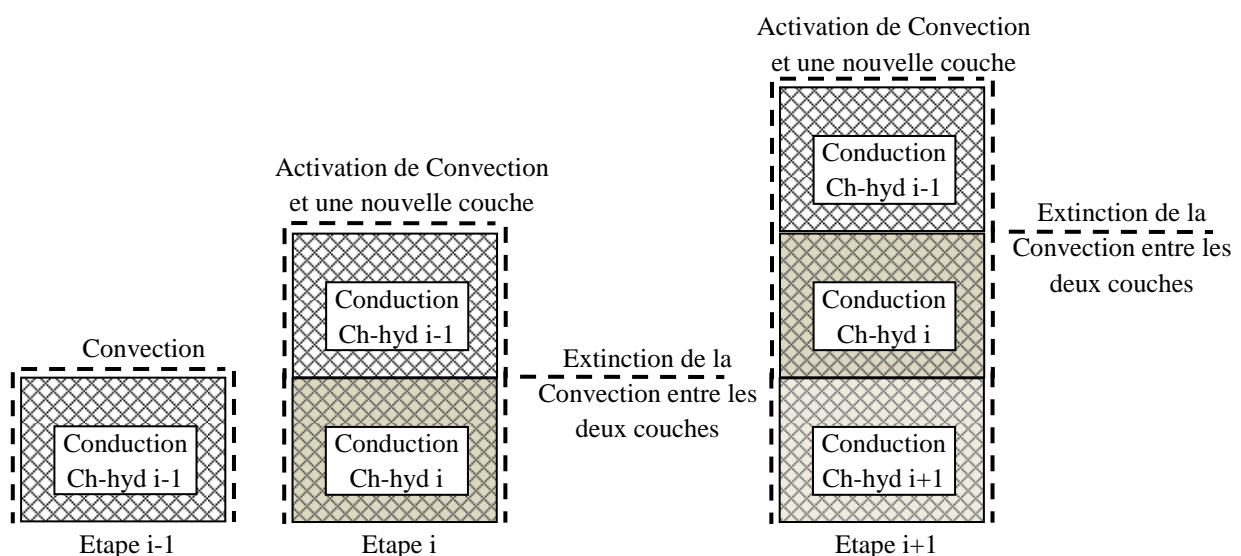


Fig. 3.9 Principe d'Activation-Extinction de modélisation.

III.6.2 Modèle ANSYS utilise avec deux dimensions

Le barrage a été modélisé comme un modèle bidimensionnel de transfert de chaleur transitoire. En utilisant une procédure d'activation et d'extinction, voir figure 3.9. Pour simuler le processus de construction réelle du barrage, la section 1 est divisée en 23 couches et la section 2 est divisée en 18 couches, chaque couche a une épaisseur de 3 m construit en 10 jours, la fondation rocheuse est représentée à partir de 30m en aval, 30m en amont et 30m sous le barrage, L'élément de roche simule la dissipation de la chaleur grâce à la Fondation.

Le nombre total des nœuds et des éléments est respectivement de 2853 et 893, on a utilisé l'élément type PLANE77 qui est disponible dans la bibliothèque des éléments d'ANSYS, l'élément a un degré de liberté de température à chaque nœud figure 3.10. Cet élément a 8 nœuds, est un élément d'ordre supérieur et il est adapté pour simuler des formes irrégulières. Il est applicable à l'analyse thermique à deux dimensions en régime permanent ou transitoire.

En outre, l'élément peut être utilisé pour réaliser une analyse structurale en le remplaçant par un élément équivalent structural appelé PLANE183, figure 3.10, un modèle de déformation plane a été adopté pour l'analyse en deux dimensions, la déformation Plane est la condition pour laquelle les déformations perpendiculaire au plan de l'analyse sont nuls, les charges de gravité due au poids de la Fondation, les charges de béton et thermique ont été inclus dans l'analyse structurale à partir de l'analyse thermique.

Elément thermique à 2D.



Un degré de liberté en
chaque nœud
Température.

Elément structural à 2D.



Deux degrés de liberté en
chaque nœud
 U_x et U_y .

Fig. 3.10 Types des éléments de maillage utilisé à l'analyse.

La figure 3.11 montre le maillage d'éléments finis des sections transversales du barrage modélisée à cette étude.

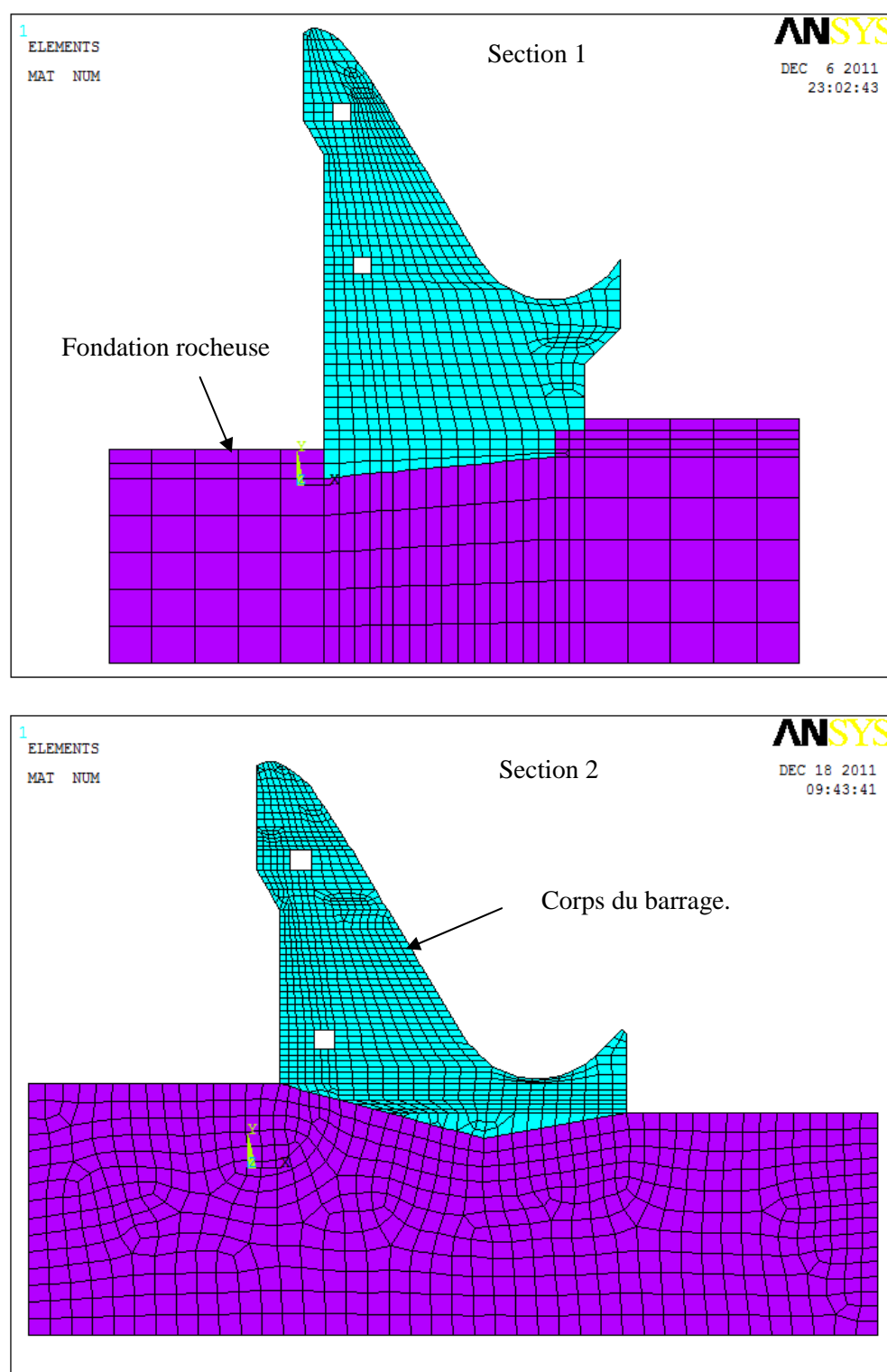


Fig. 3.11 Modèle de maillage en deux dimensions de la Section 1 et 2

III.7 RESULTATS D'ANALYSE THERMIQUE

Nous présentons dans cette partie les résultats d'analyse thermique. En utilisant les paramètres représentés dans le tableau 3.4, sauf la température initiale de coulage qu'on va prendre est de 20 °C, c'est la température utilisée à la construction, et les autres températures (18 - 25 - 30 °C) on verra par la suite dans le chapitre d'étude paramétrique.

III.7.1 Distribution des températures

On donne la distribution des températures durant la construction et en fin d'hydratation pour les deux sections (1 et 2) figure 3.12.a et 3.12.b.

❖ Discussion

On observe en premier lieu que la température de la section 2 est inférieure à celle de la section 1, cela est dû d'une part à la dimension de la section du barrage lui-même, quand la section augmente la dissipation de la chaleur vers l'extérieur prend plus de temps et il en résulte une accumulation de température, d'autre part le nombre des couches, parce que chaque couche génère une température de plus due à l'hydratation et empêche la couche sous-jacente de transmettre la chaleur par convection. La distribution de la température dans une section, comme l'indique la figure 3.12, est élevée au centre de la section, plus précisément dans les parties épaisses de la section, car elle n'a pas d'échange convectif avec l'air et la conductivité de béton est faible, au contraire les zones moins épaisses, les surfaces libres et les parties proches aux galeries sont influencées par la convection.

Section 1

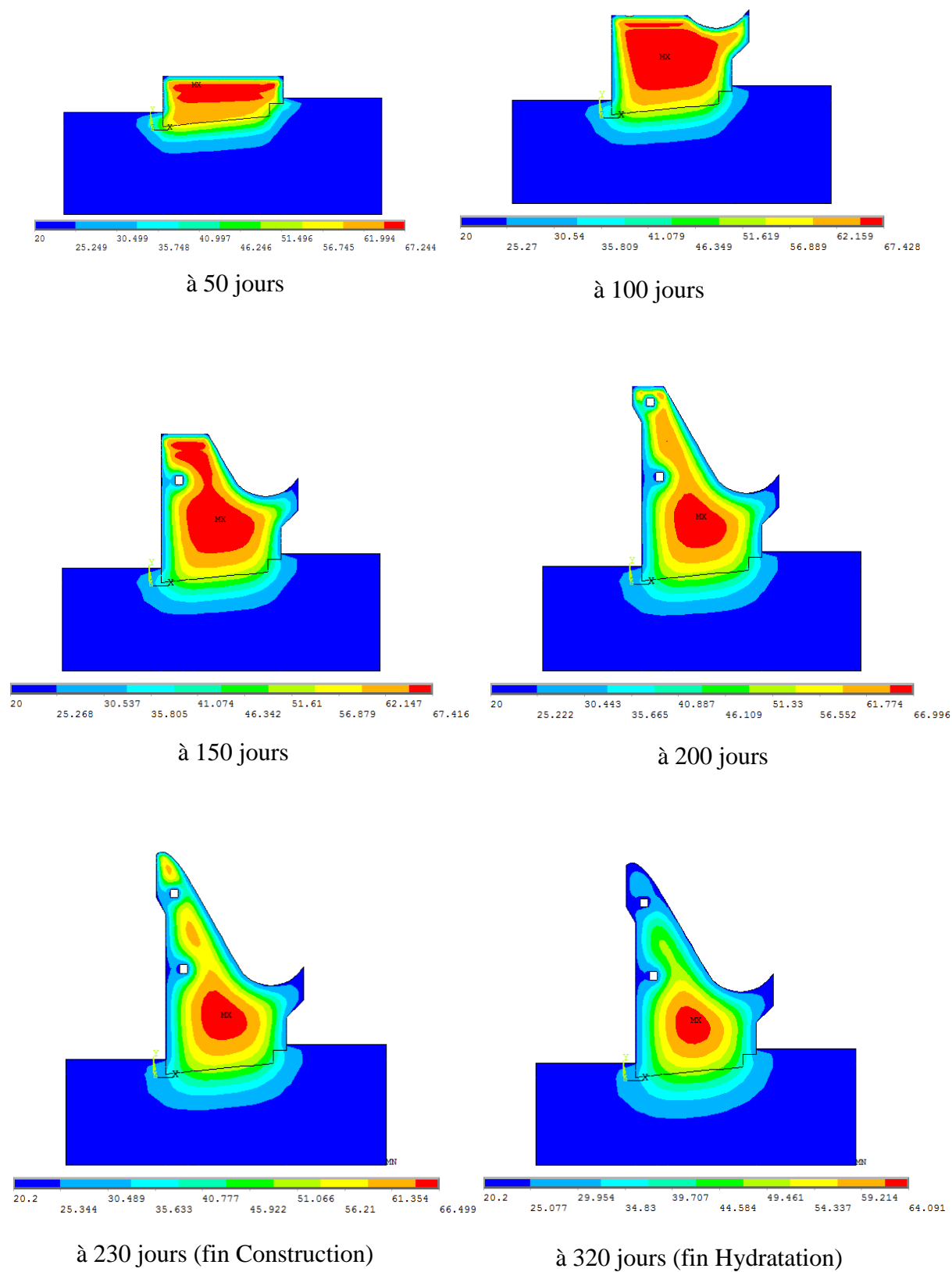


Fig. 3.12.a Distribution des températures à la section 1 durant la construction.

Section 2

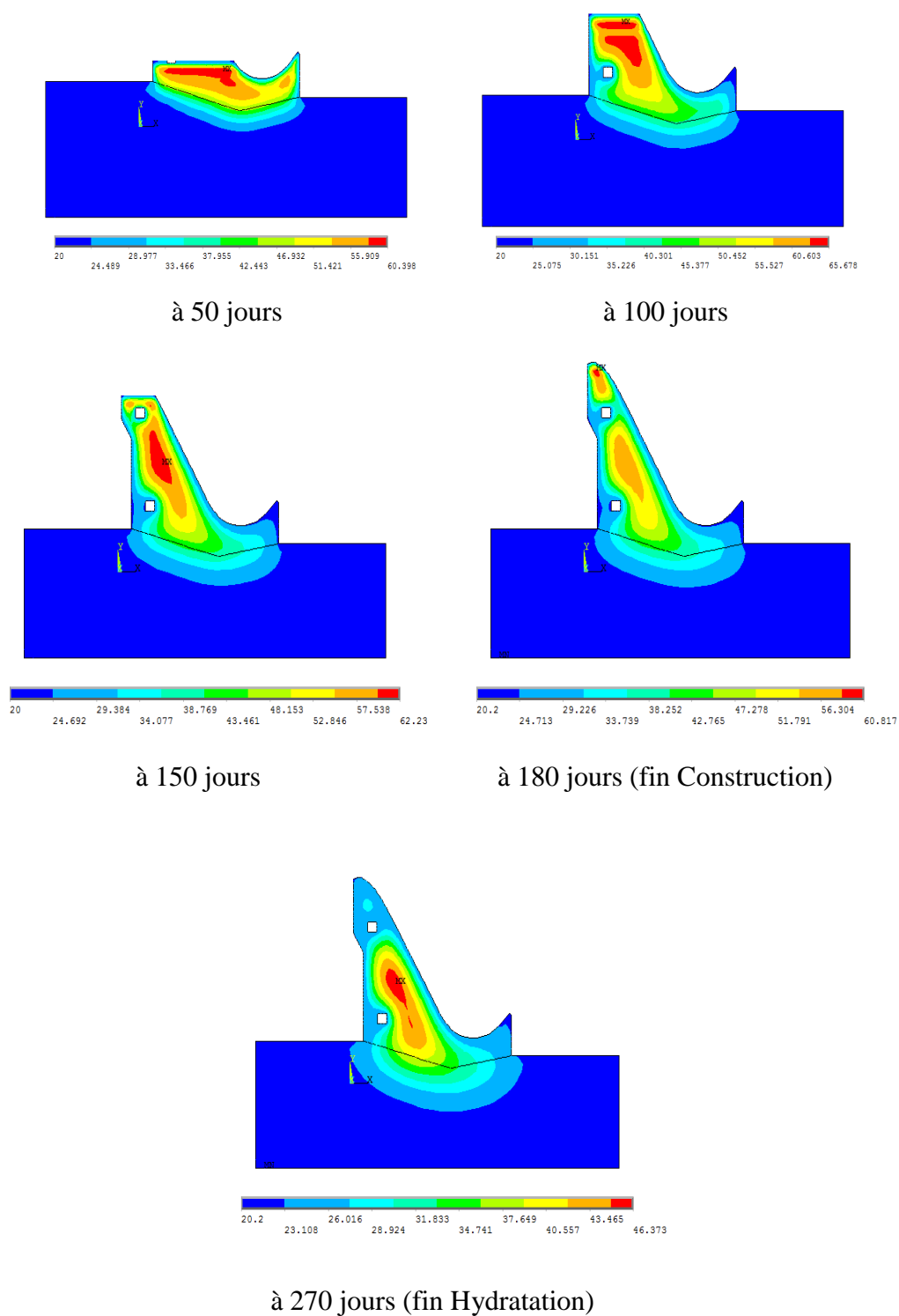


Fig. 3.12.b Distribution des températures à la section 2 dans des différents temps.

Les résultats des températures pour les deux sections en fin d'hydratation et fin de construction sont représentés au tableau 3.5.

Tableau 3.5 températures atteignent en fin de construction et fin d'hydratation dans les deux sections.

Section	La température en °C	
	Fin de construction	Fin d'hydratation
1	66.50	64.09
2	60.82	46.37

Selon le tableau, on observe que la différence de température maximale entre les deux sections ne dépasse pas les 6 °C, mais la température en fin d'hydratation dans les deux sections a une différence de 17.72 °C, la section 2 refroidie rapidement par rapport à la section 1 et cela est lié aux dimensions et au nombre de couches comme cité précédemment.

La température autour des galeries est inférieure aux températures au centre de la section et des points éloignés des surfaces libres, cette température tend vers la température ambiante surtout pour les cotés proches aux surfaces exposées à l'air amont ou aval, sur ces surfaces il y a l'influence de la température de l'air (transmission par convection).

III.7.2 Evolution de la température en fonction du temps

Dans cette partie on présente la variation de température dans les points définis à la figure 3.13 en fonction du temps, pour les deux sections.

On a utilisé les lettres majuscules pour les points de la section (1) et les lettres minuscules pour la section (2).

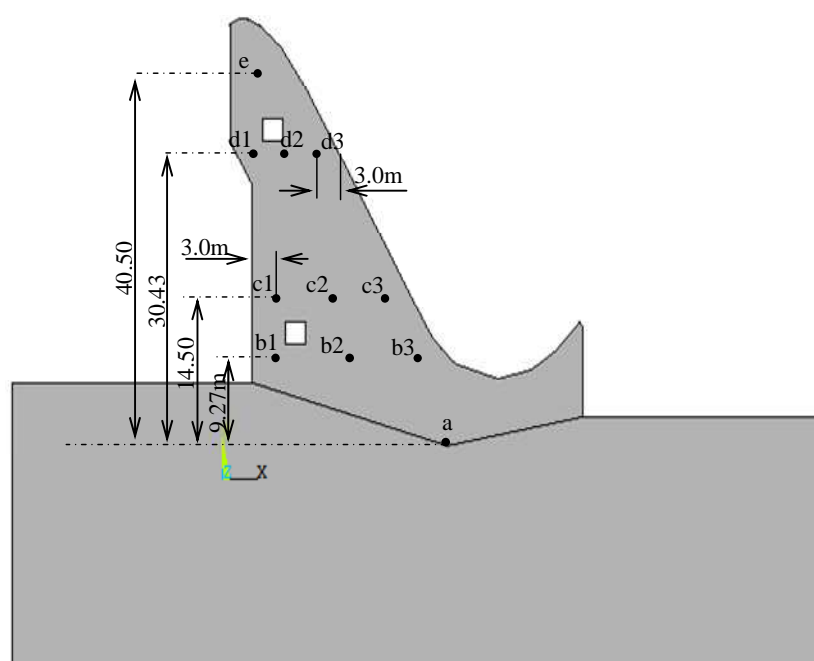
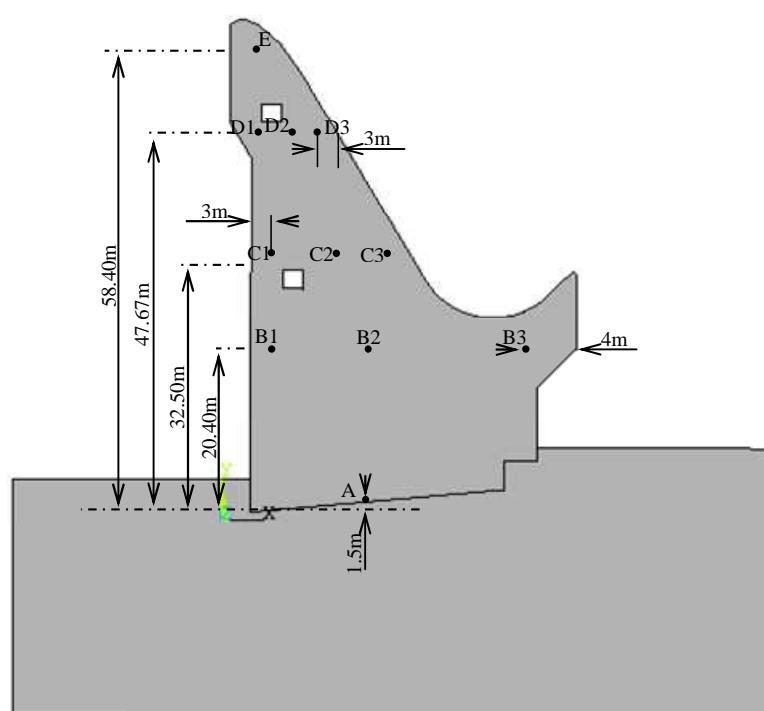


Fig. 3.13 Localisation des points de résultat de température en fonction de temps aux sections 1 et 2.

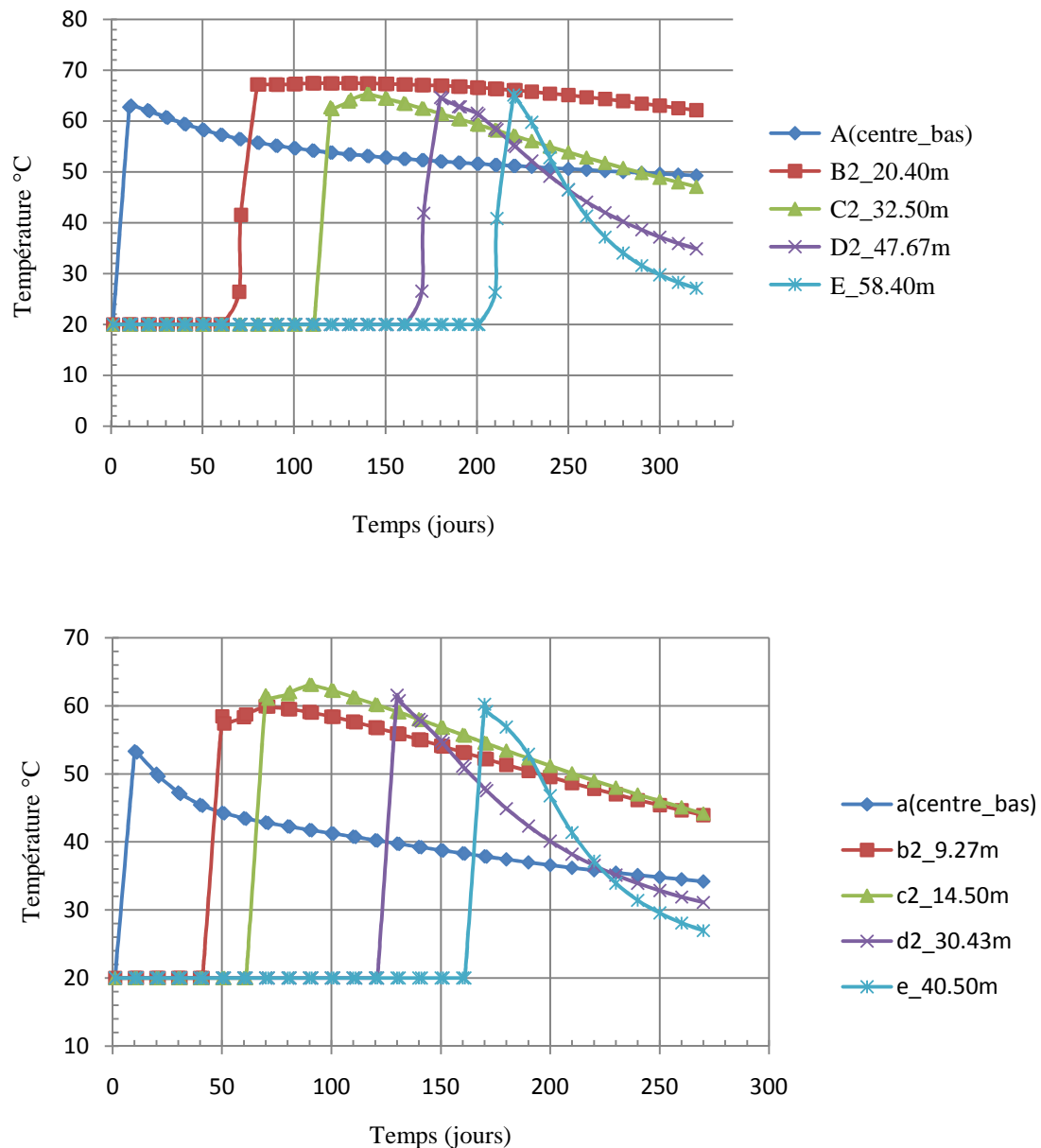


Fig. 3.14 Evolution de la température au centre du barrage en fonction de temps respectivement à la section 1 et 2 à différentes hauteurs.

❖ Discussion

La figure 3.14 montre la variation de la température en fonction du temps, la température initiale dans tous les points est égale à 20°C, la température de coulage, et augmente pendant les premiers jours. La température des points situées en partie haut du barrage (D2, d2, E et e dans les deux sections) refroidies rapidement et cela est dû à la dissipation de la chaleur par convection car la section de barrage diminuait en haut et ces points sont proche de la galerie, la température maximale à la section (1) est de 67.45°C au centre (B2) à une hauteur de 20.40m à 120j et de 63.10°C à la section (2) au centre (c2) à

14.50m au-dessus de la base à 90j, la température au centre de la section (1) à la hauteur 20.40m (B2) prend une certaine asymptote puis diminuait lentement pour atteindre 62.12°C, cela lié à la faible conductivité de béton et l'épaisseur de la section du barrage à cet endroit qui empêche le transfert par convection.

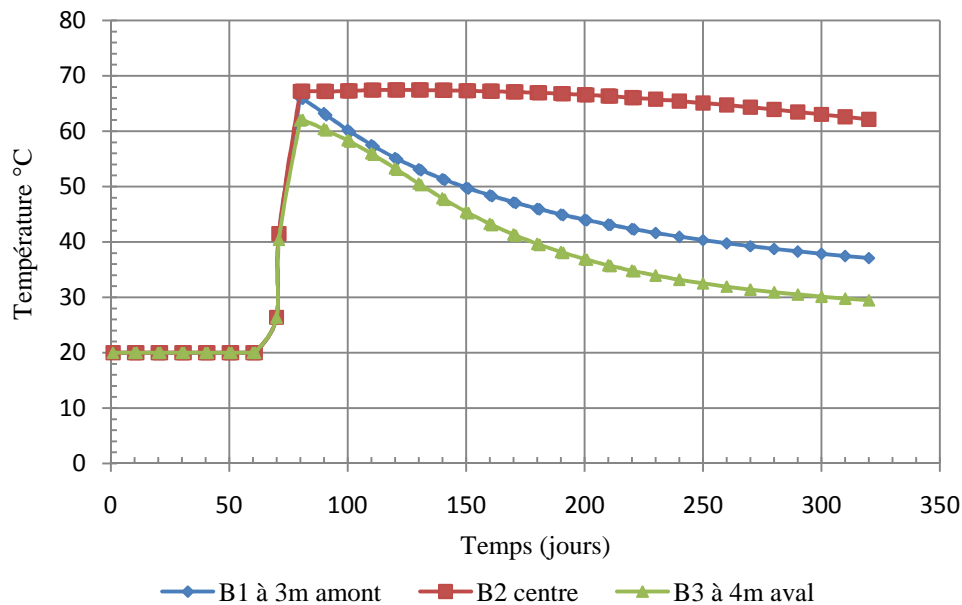


Fig. 3.15 Evolution de la température à la hauteur 20.40m aux différents points amont, aval et centre (section 1).

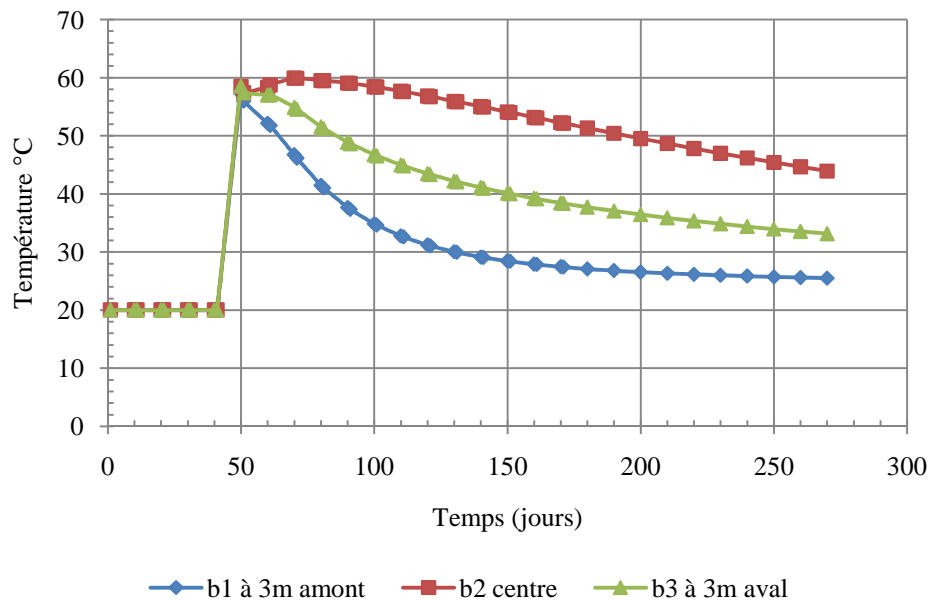


Fig. 3.16 Evolution de la température à la hauteur 9.27m aux différents points amont, aval et centre (section 2).

❖ Discussion

La figure 3.15 montre la variation de la température de la section (1) à l'élévation de 20.40m, la température atteint un maximum de 67.45°C au centre de la section (B2), la température augmente brusquement dans les premiers 10j après le coulage et prend une valeur presque constante de l'ordre de 67°C pendant 100j à l'intervalle [80 - 180] j, puis diminue lentement à 62.12°C en fin de construction parce que le centre est loin des surfaces exposé à l'air (convection) et le transfert par conduction est faible dans le béton. Aux points B1 et B3 la température augmente dans les premiers 10j pour atteindre son maximum, elle refroidit rapidement que le centre B2 pour atteindre 37.08°C au côté amont B1 et 29.46°C au côté aval B3. Ce refroidissement est dû à l'échange convectif avec l'air, la température au point B3 diminue plus qu'au point B1 malgré son éloignement de la surface de 4m, ceci est dû à la position du point (au saut de ski) qui est exposé à l'échange convectif par trois côtés (au-dessus, en-dessous et à la droite).

La figure 3.16 représente la variation de la température à la section (2) à une hauteur de 9.27m au-dessus de la base, la température maximale est de 59.93°C au centre b2 à 70j, ensuite elle diminue à 43.91°C , cette diminution de température est lente par rapport aux deux autres points, elle est plus rapide qu'au point B2 de la section (1), cela provient des dimensions de la section considéré. Pour les points (b1 et b2) proches des côtés amont et aval, la température diminue plus rapidement qu'au centre. La température en fin de construction (à 270j) pour b1 et b3 est égale respectivement à 25.49°C et 33.12°C , il y a une différence d'environ 8°C malgré que les deux points sont situés à la même distance des surfaces libres, ceci résulte de l'influence de la galerie sur le point (b1).

III.7.3 Variation de la température selon la position

Nous représentons dans cette partie la variation de la température en fonction de la situation des points à la section du barrage, c'est-à-dire pour un temps fixe on donne la variation de la température à travers un tracé désigné.

La disposition des directions utilisées à la présentation des résultats sont représentés à la figure 3.17.

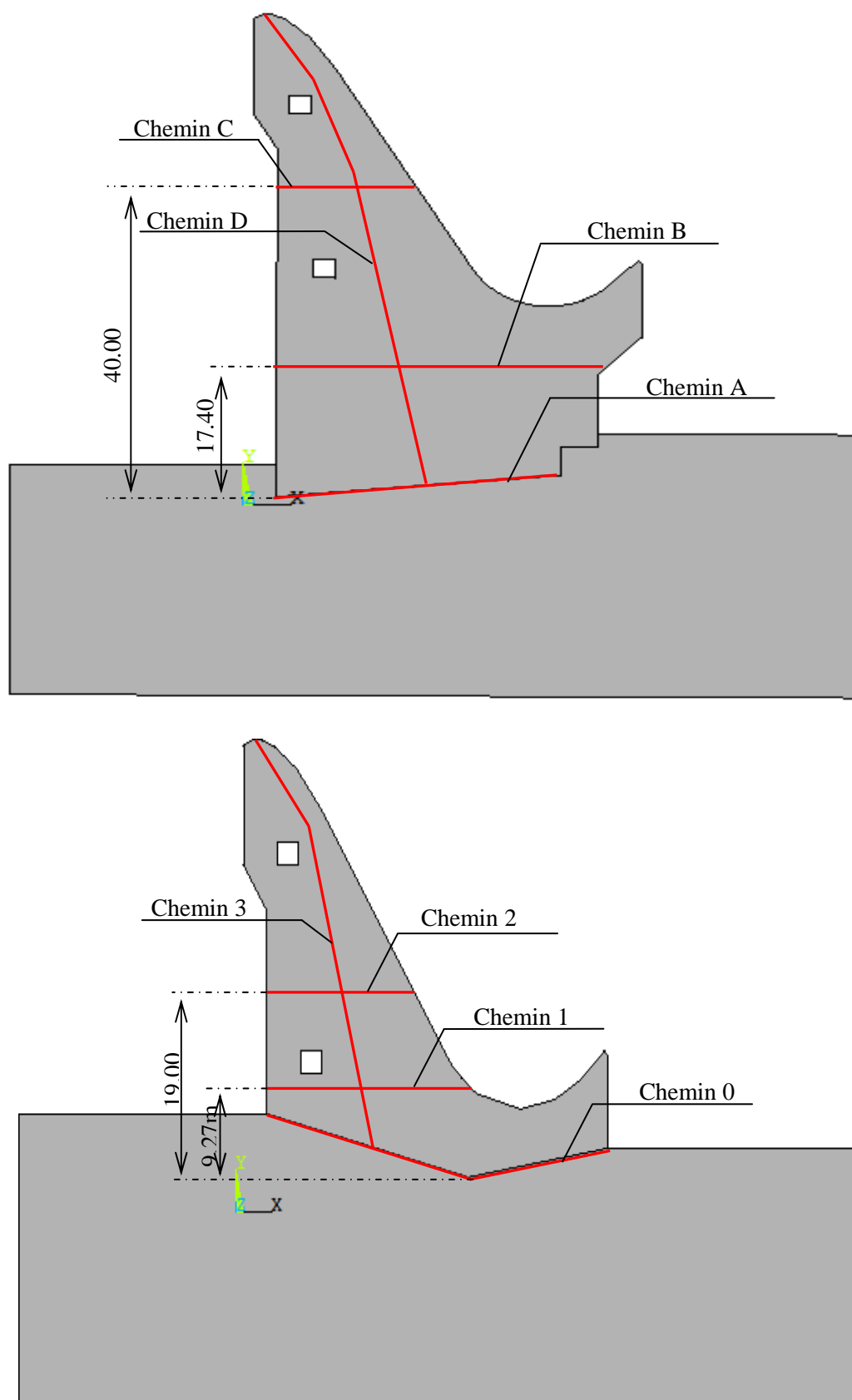


Fig. 3.17 Chemins choisies pour présenter la variation de température selon la position aux sections 1 et 2.

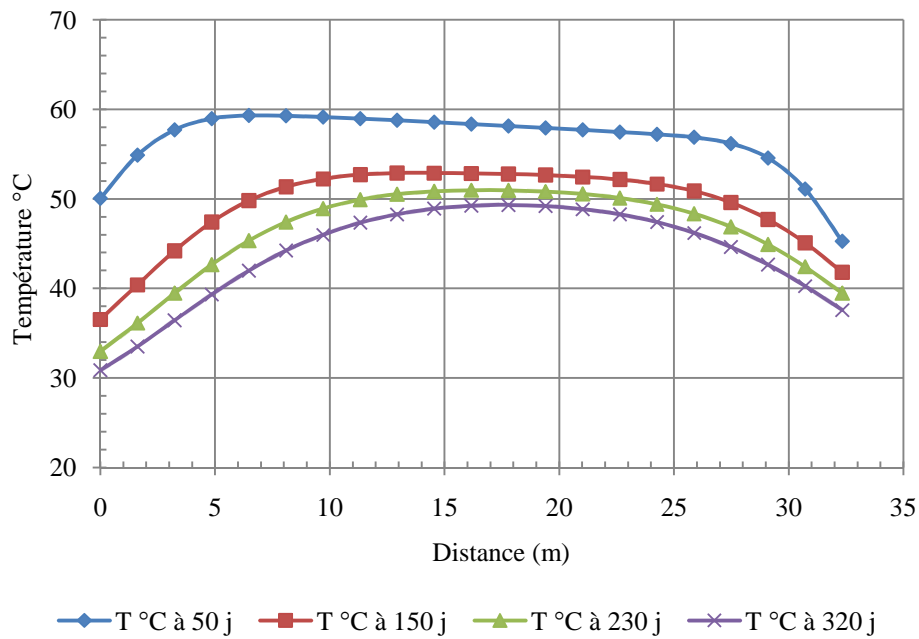


Fig. 3.18 Variation de la température sur le chemin A (la base) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 1.

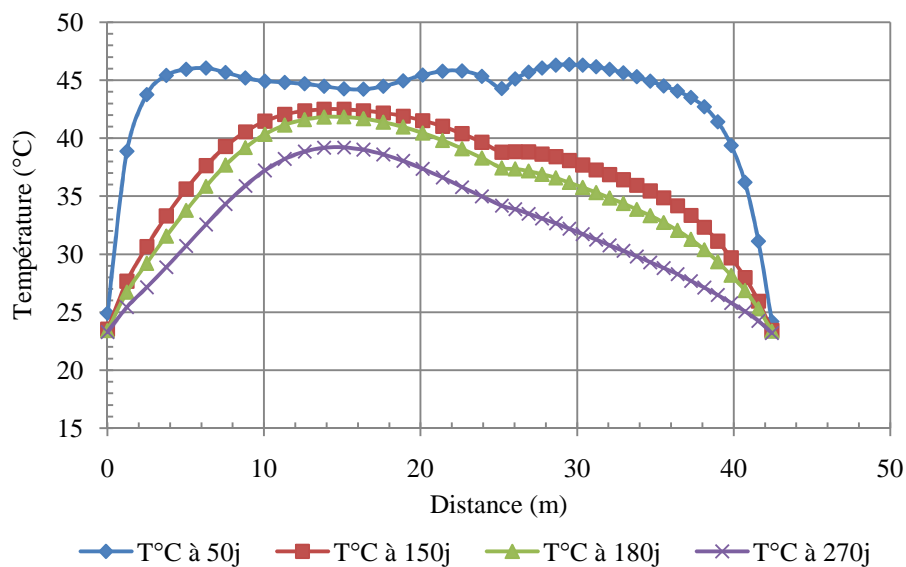


Fig. 3.19 Variation de la température sur le chemin 0 (la base) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 2.

❖ Discussion

La figure 3.18 donne la variation de la température à la base de la section (1) à des temps différents. La température maximale obtenue est de 59.32°C à 50j, on observe qu'à 50j la température en amont (position 0m) est supérieure que la température en aval (position 32.34m) car le point situé en aval est exposé à la transmission par convection (à

travers le béton) plus que le point en amont (il est proche de la surface libre de béton), concernant les trois autres courbes on remarque qu'elles ont la même allure parce qu'elles sont influencées par le transfert par conduction avec la fondation, on observe aussi que la température en amont est inférieure à celle en aval, cela est dû à la position des points par rapport aux surfaces libres. En amont le point situé à 4.10m en-dessous de la surface libre de la fondation et en aval à une profondeur de 5.40m, donc la dissipation de la chaleur vers l'extérieur à travers la fondation pour le côté aval prend plus de temps.

La variation de la température à la base de la section (2), chemin 0, montrée par la figure 3.19 donne une température maximale de 46.35°C à 50j, les quatre courbes ayant une température minimale à peu près de 24°C (près de la température ambiante) en début et en fin car les deux extrémités de chemin sont exposés à l'air ambiante. Dans la courbe de la variation de la température à 50j on remarque que la température diminue puis augmente à la distance de 25.18m, cette variation est due à la forme de la section à cet endroit, ce point transmet la chaleur par les deux côtés.

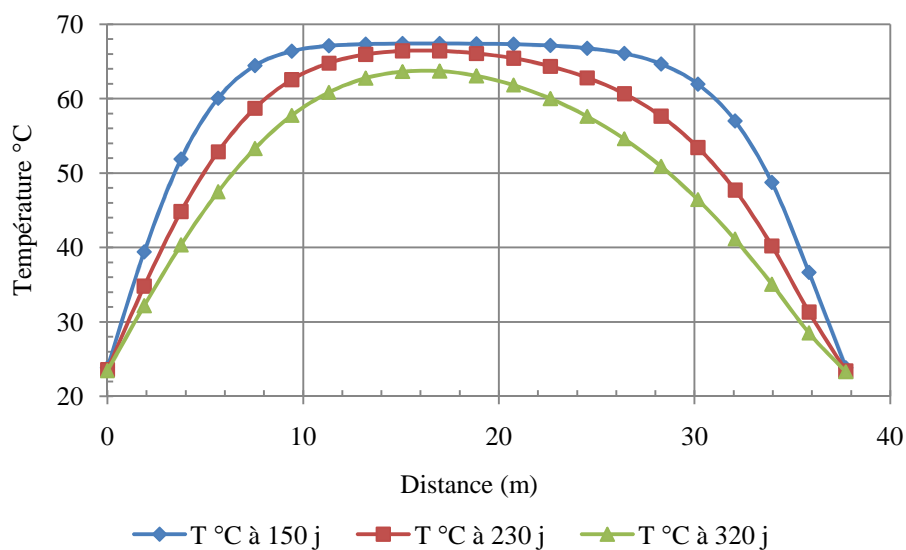


Fig. 3.20 Variation de la température sur le chemin B (à 17.40m) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 1.

❖ Discussion

La figure 3.20 représente la variation de la température à la section (1) à 17.40m au-dessus de la fondation, la température maximale atteint 67.41°C après 150j, les températures aux extrémités sont de 23.50°C, proche de la température ambiante.

La variation de la température à la section (2) à 9.27m au-dessus de la fondation donnée par la figure 3.21 montre une température maximale de 55.56°C après 150j, la température aux extrémités est proche de la température ambiante, à la partie amont on remarque que la température augmente lentement parce que dans cette zone le chemin 1 est proche de la galerie.

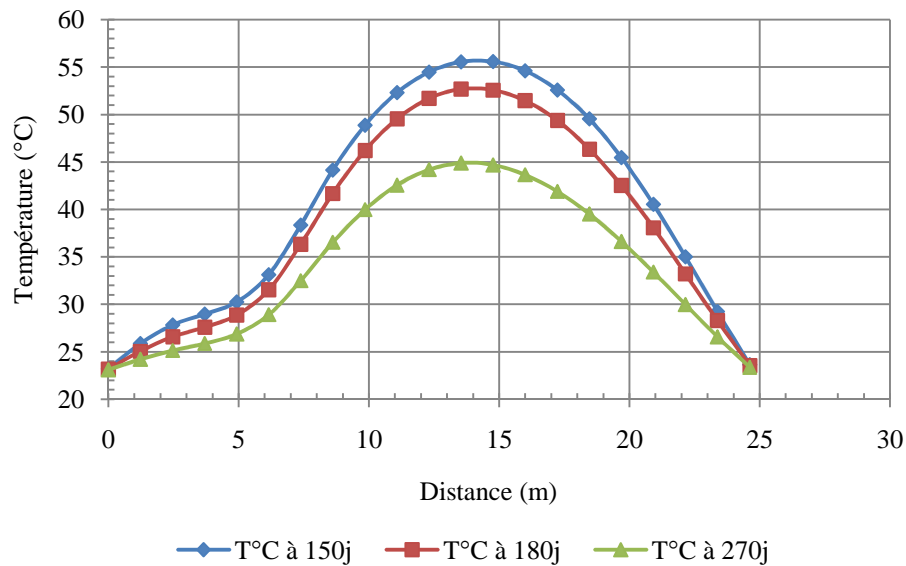


Fig. 3.21 Variation de la température sur le chemin 1 (à 9.27m) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 2.

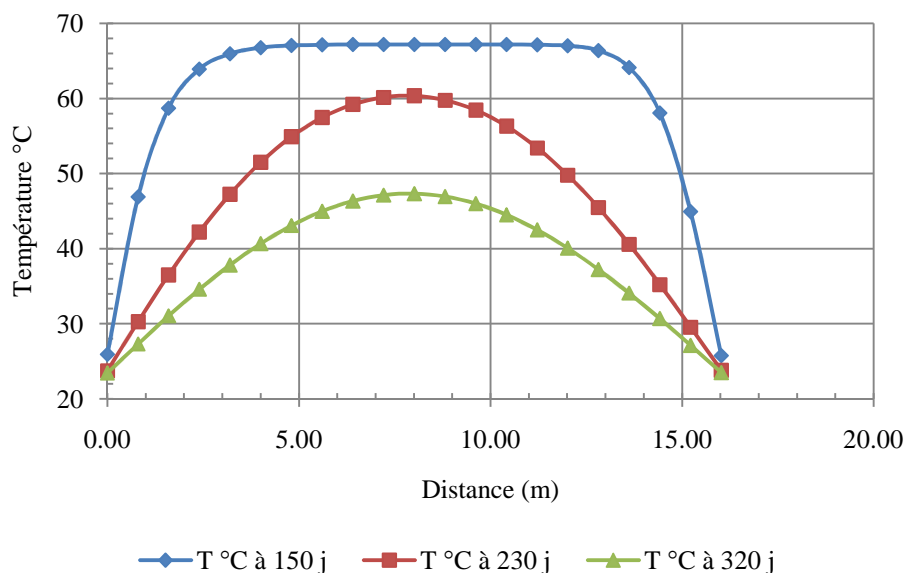


Fig. 3.22 Variation de la température sur le chemin C (à 40.00m) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 1.

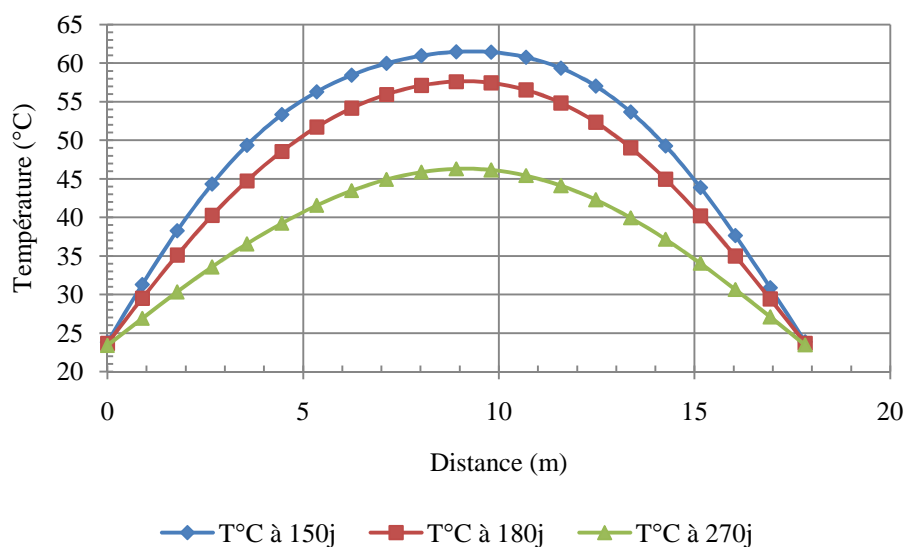


Fig. 3.23 Variation de la température sur le chemin 2 (à 19.00m) en fonction de la distance à des temps différents pour la section 2.

❖ Discussion

Dans les deux figures 3.22 et 3.23, on observe que les courbes ont la même allure que celle du chemin B, cependant la différence entre la température maximale en 150j et la fin d'hydratation 320j et 270j respectivement aux sections 1 et 2 est plus grande que celle de la figure 3.20 car le chemin C et le chemin 2 traversent les sections à des zones minces par rapport au chemin B.

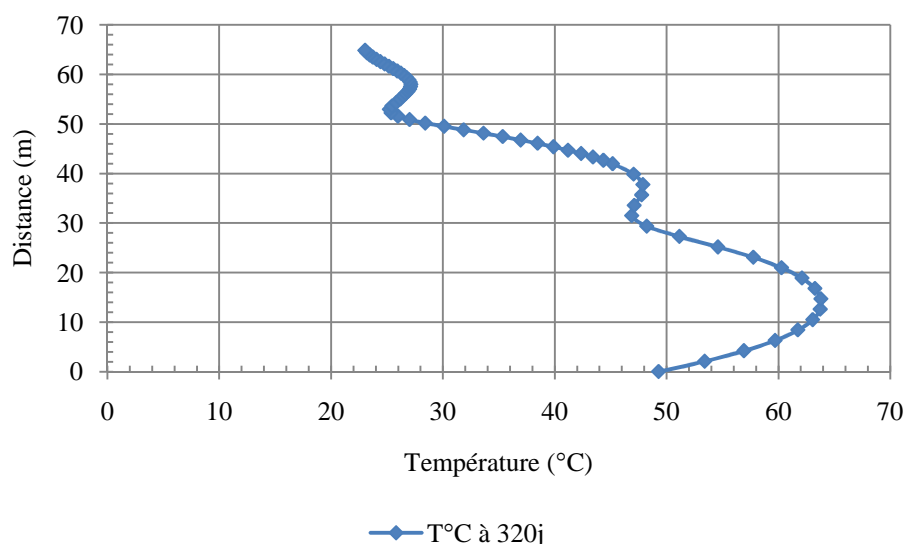


Fig. 3.24 Variation de la température au chemin vertical à la fin d'hydratation dans la section 1.

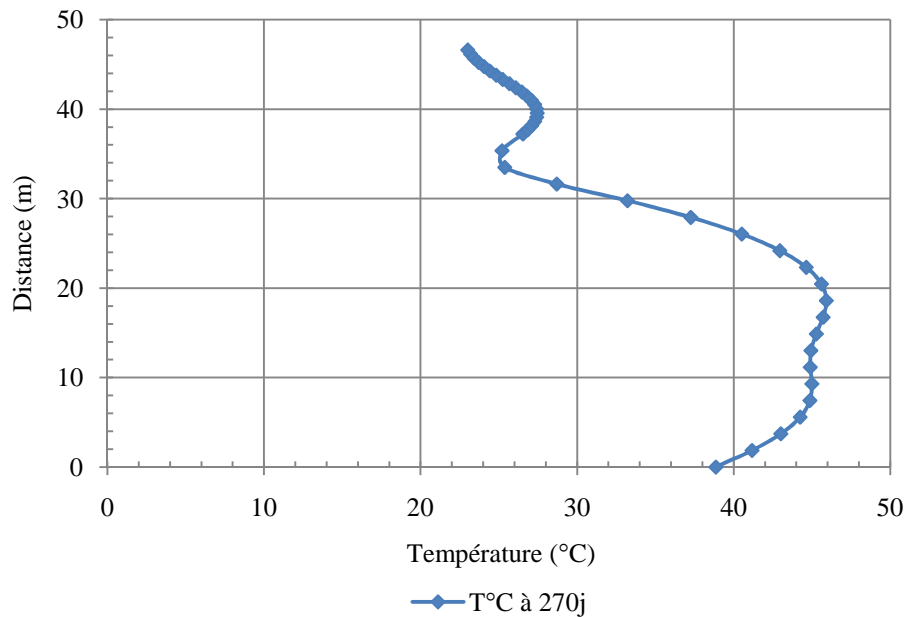


Fig. 3.25 Variation de la température au chemin vertical à la fin d'hydratation dans la section 2.

❖ Discussion

Les deux figures 3.24 et 3.25 donnent l'évolution de la température verticalement en fin d'hydratation, on obtient une température maximale de 63.79°C à 14.68m à la section 1 car cet endroit est le plus épais de la section. Par la suite il y a deux diminutions de la température, la première de 46.88°C et la deuxième de 25.22°C respectivement à 31.45m et 52.91m , près des galeries. La température au sommet tend vers la température ambiante qui est de 23°C .

Dans la figure 3.25 la température maximale est de 45.93°C à 18.60m , il y a aussi une réduction de 25.21°C à 35.34m près de la galerie supérieure et une température minimale de 23.1°C au sommet comme conséquence d'échange convectif avec l'air.

III.8 RESULTATS DES CONTRAINTES THERMIQUES

Dans cette partie nous présentons les résultats des contraintes thermiques qui sont les conséquences des variations des températures données précédemment.

III.8.1 Distribution des contraintes au corps du barrage

Les figures 3.26.a et 3.26.b montrent les distributions des contraintes thermiques dans le corps du barrage dans les deux directions, (x) horizontale et (z) perpendiculaire à la section, et pour différentes temps.

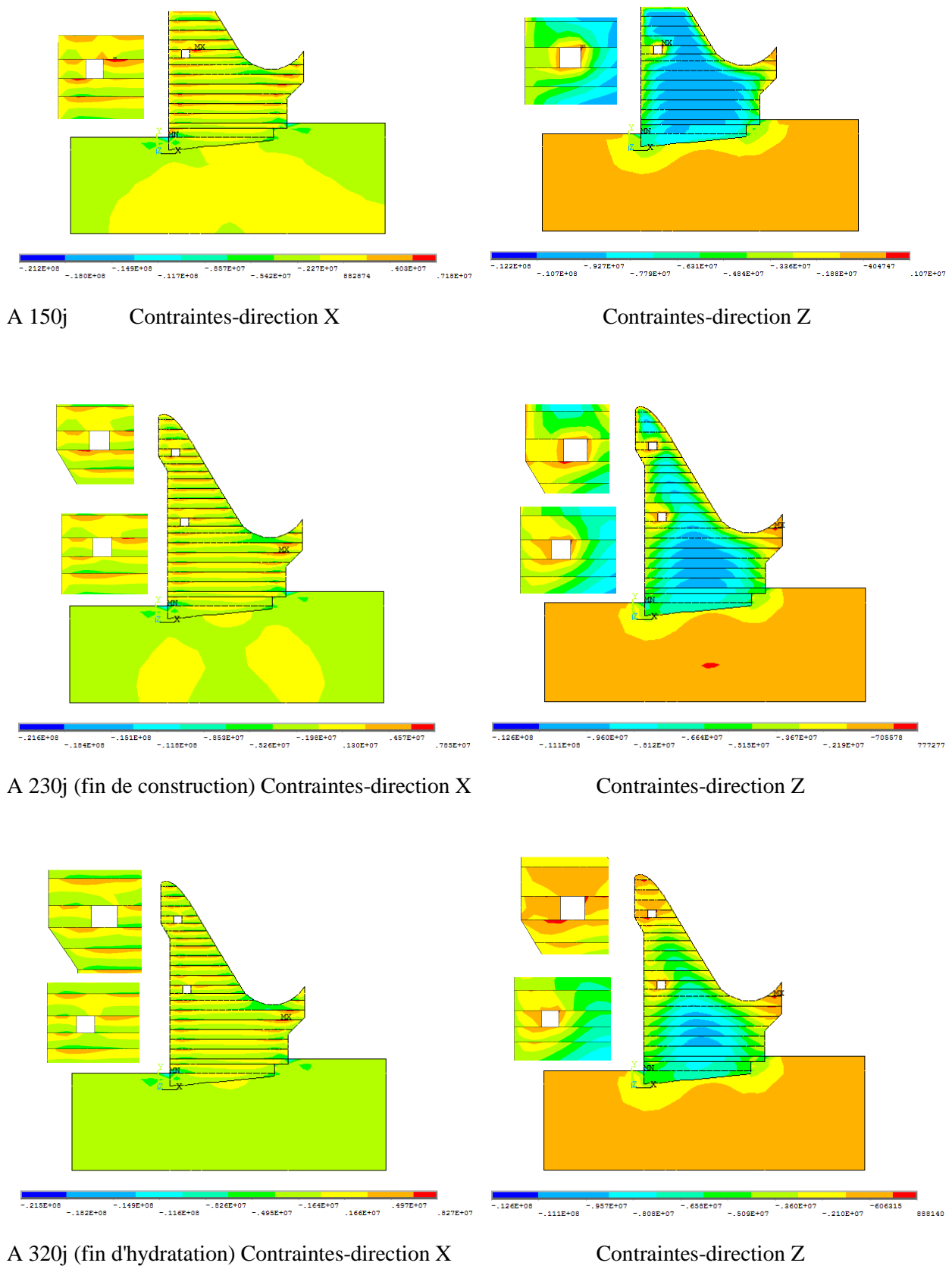


Fig. 3.26.a Distribution des contraintes thermiques à la section 1(en Pa).

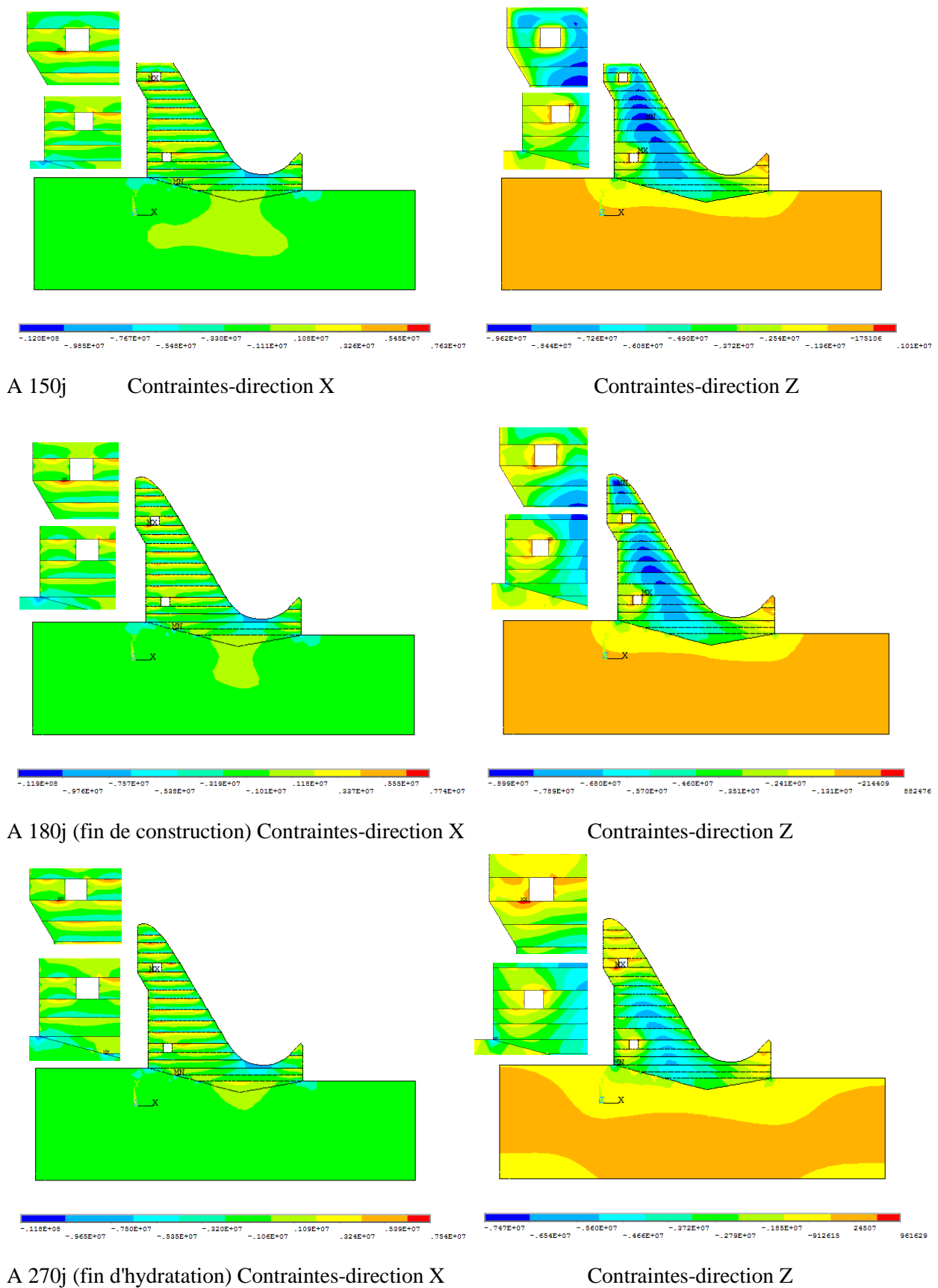


Fig. 3.26.b Distribution des contraintes thermiques à la section 2 (en Pa).

❖ Discussion

Les figures 3.26.a et 3.26.b représentent la distribution des contraintes au corps du barrage. On observe dans la figure 3.26.a que la contrainte maximale (de traction) se localise autour de la galerie inférieure après 150j car la température autour de la galerie diminue rapidement que le corps du barrage à cause des échanges convectifs. En fin de construction et fin d'hydratation la contrainte maximale se trouve près du saut de ski, dans la direction Z on remarque l'apparition des contraintes de compression au cœur de la section. La contrainte minimale (de compression) apparaît en amont bas près de la fondation.

Dans la figure 3.26.b, on observe une contrainte de traction autour des galeries et une contrainte de compression sur la surface de contact entre la fondation et le corps du barrage pour les deux directions X et Z. Dans le sens Z une distribution des contraintes de compression apparaît au cœur de la section.

III.8.2 Variation des contraintes en fonction du temps

On donne dans cette partie la variation des contraintes thermiques en fonction du temps dans les deux sens transversal (X) et frontal (Z) du barrage.

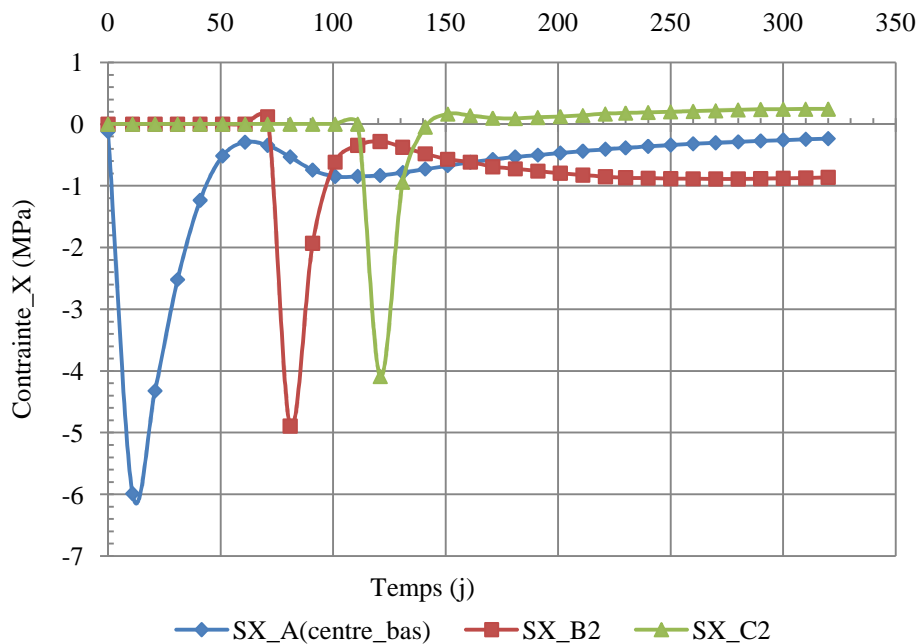


Fig. 3.27 Variation des contraintes suivant l'axe X à différentes élévations dans le centre de la section 1.

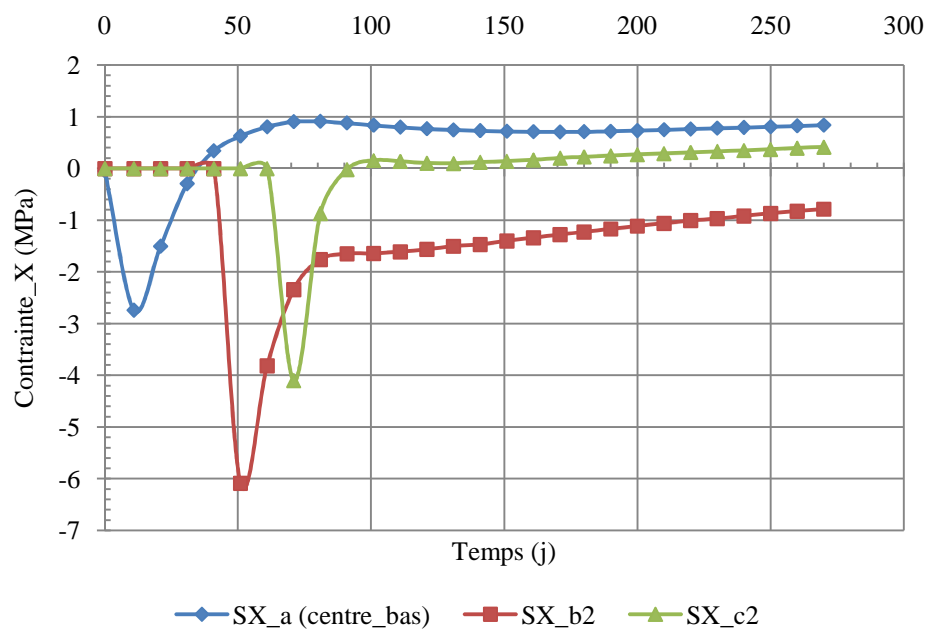


Fig. 3.28 Variation des contraintes suivant l'axe X à différentes élévations dans le centre de la section 2.

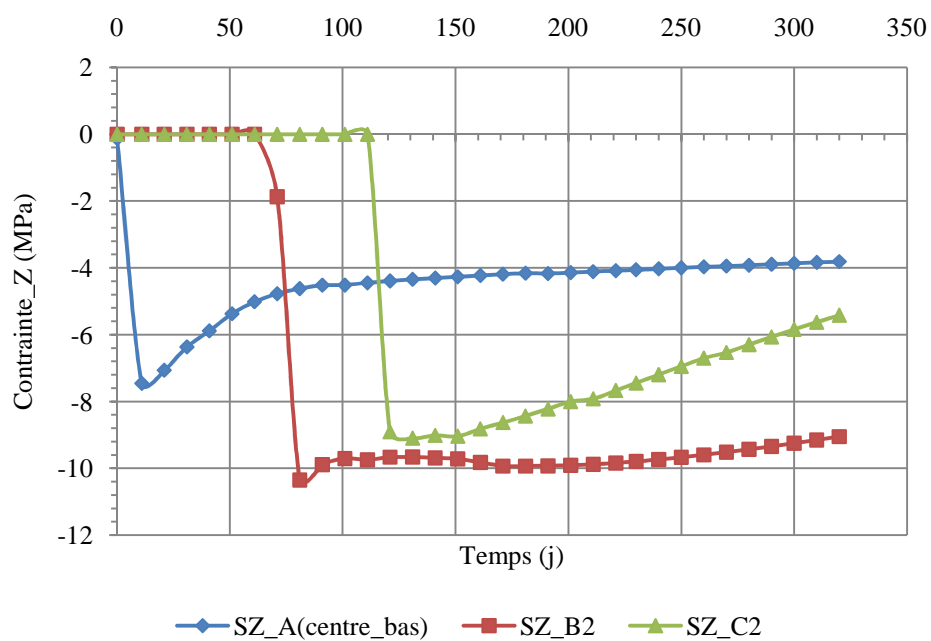


Fig. 3.29 Variation des contraintes suivant l'axe Z à différentes élévations dans le centre de la section 1.

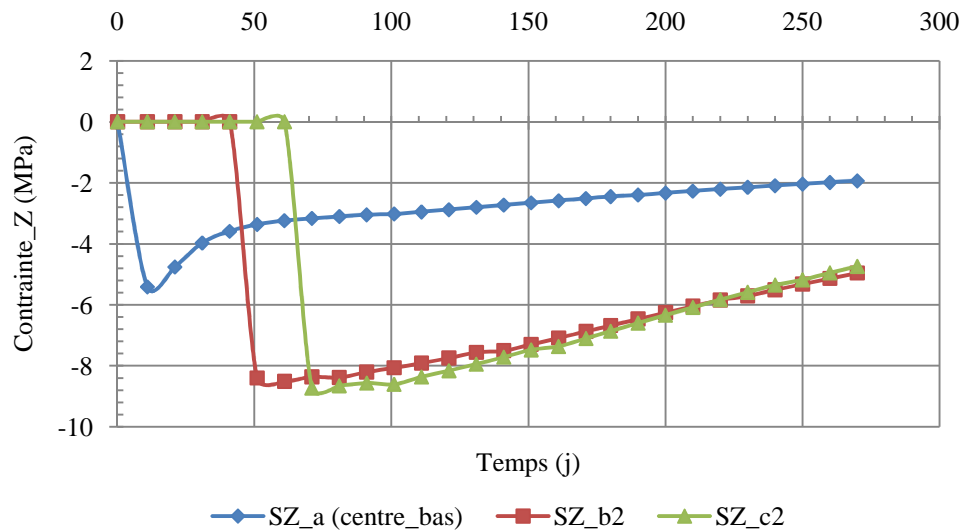


Fig. 3.30 Variation des contraintes suivant l'axe Z à différentes élévations dans le centre de la section 2.

❖ Discussion

Les figures 3.27 à 3.30 représentent la variation des contraintes dans le centre du barrage à des hauteurs différentes pour les deux sens X et Z. D'une part dans les quatre figures on observe que les courbes commencent par une contrainte maximale de compression (contrainte négative) cette contrainte est la conséquence d'augmentation de la température. Quand la température augmente il résulte une dilatation, si cette dilatation est retenue extérieurement (par la fondation ou par reprise de bétonnage) des contraintes de compression en résultent. Après ces pics, on remarque une diminution de cette contrainte de compression à cause du refroidissement. D'autre par dans les deux sections 1 et 2 dans le sens X (fig. 3.27 et fig. 3.28) on observe l'apparition des contraintes de traction (contrainte positive). Les valeurs maximales et minimales de ces contraintes sont représentées au tableau 3.6.

Tableau 3.6 valeurs max et min des contraintes obtenues dans le centre du barrage sens X et Z

Position	Contraintes au sens X (MPa)		Contraintes au sens Z (MPa)	
A (centre_bas)	-5.99	-0.24	-7.46	-3.81
B2 (20.40m)	-4.90	-0.28	-10.35	-9.05
C2 (32.50m)	-4.09	0.24	-9.10	-5.42
a (centre_bas)	-2.74	0.84	-5.41	-1.94
b2 (9.27m)	-6.09	0.42	-8.51	-4.96
c2 (14.50m)	-4.10	-0.78	-8.73	-4.74

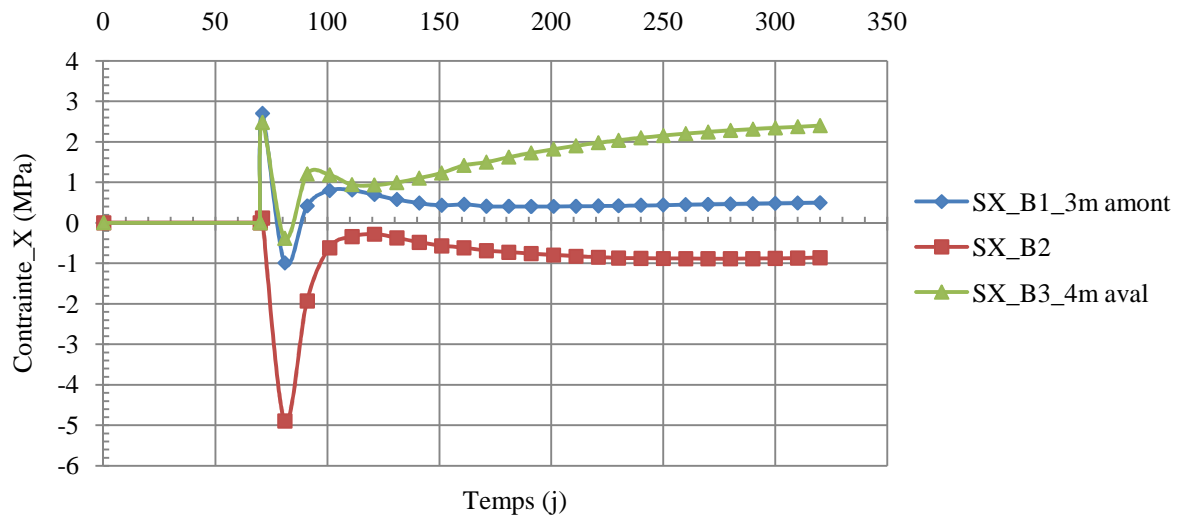


Fig. 3.31 Variation des contraintes suivant l'axe X à 20.40m au-dessus de la base de la section 1.

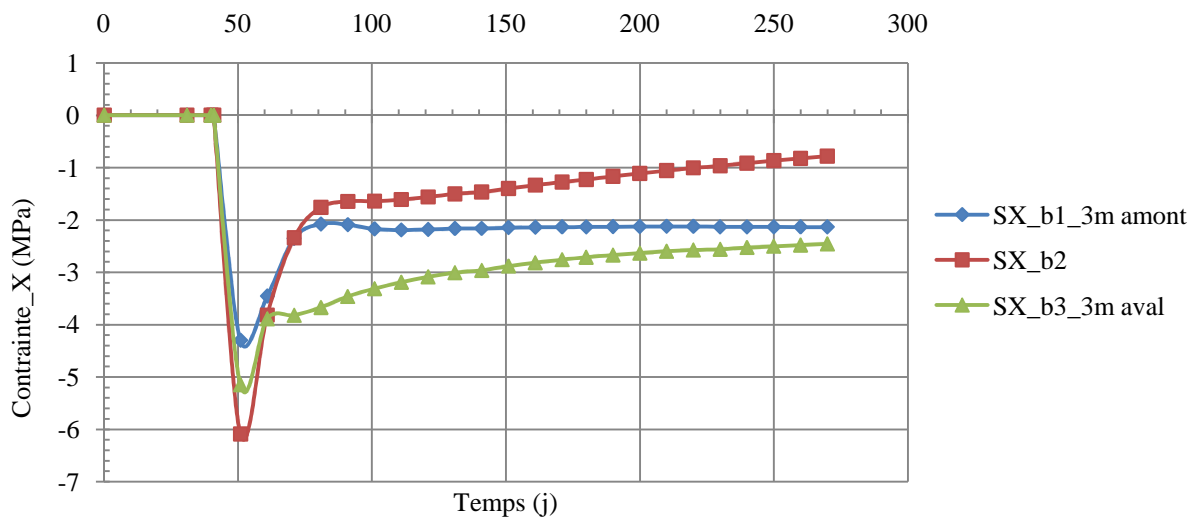


Fig. 3.32 Variation des contraintes suivant l'axe X à 9.27m au-dessus de la base de la section 2.

❖ Discussion

La figure 3.31 représente la variation des contraintes en différents points situés à 20.40m au-dessus de la base de la section 1. On observe une contrainte de traction dans les deux points (amont et aval), car la température diminue rapidement en ces points. La contrainte maximale de traction est de 2.70 MPa près de l'amont, le point situé au centre (B2) est toujours en compression parce que la température au centre du barrage est élevée. La contrainte maximale de compression est de 4.90 MPa.

Dans la figure 3.32 on observe que les trois points sont en compression. La contrainte maximale de compression est de 6.09 MPa au centre, cette contrainte diminue par la suite, car la température augmente pour atteindre la valeur maximale et diminue en suite.

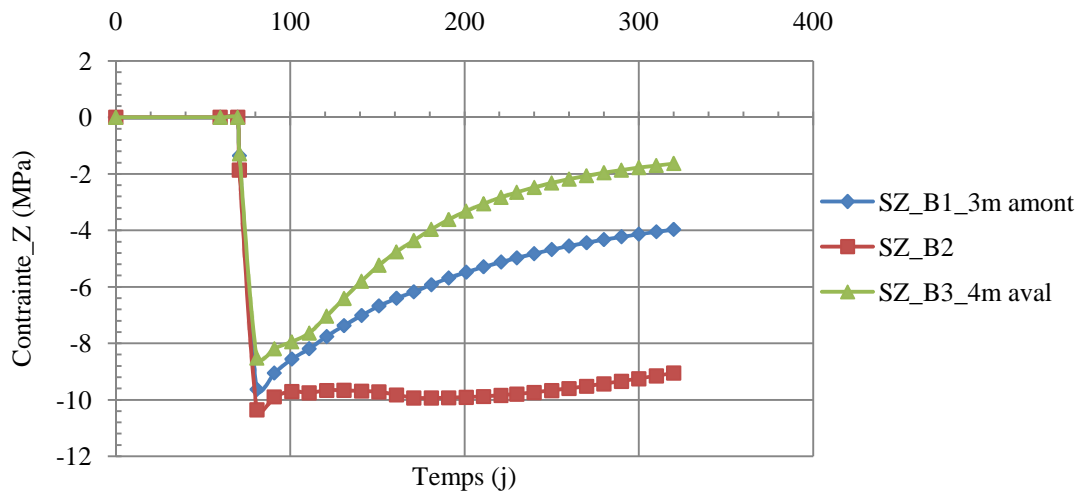


Fig. 3.33 Variation des contraintes suivant l'axe Z à 20.40m au-dessus de la base de la section 1.

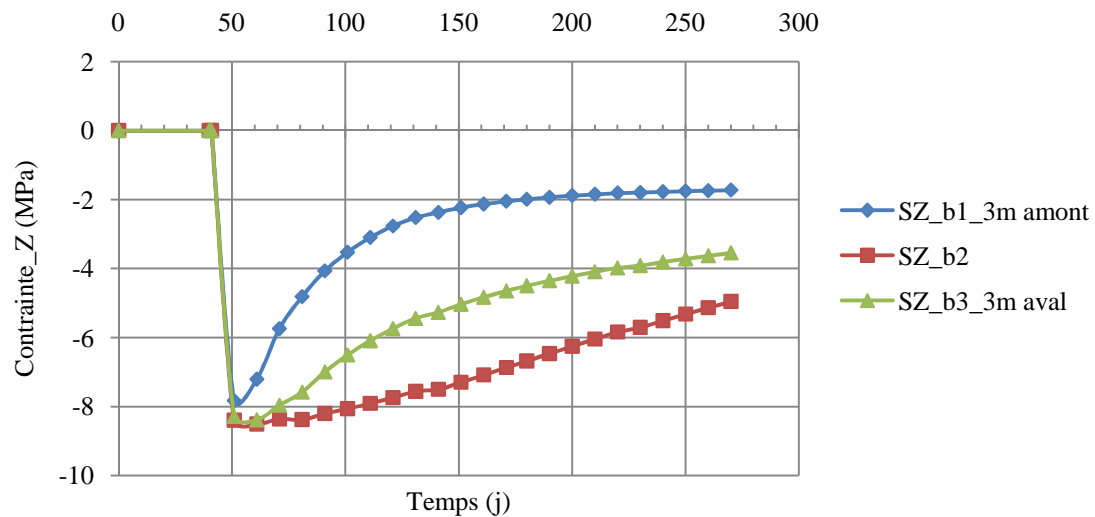


Fig. 3.34 Variation des contraintes suivant l'axe Z à 9.27m au-dessus de la base de la section 2.

❖ Discussion

Les deux figures 3.33 et 3.34 montrent qu'à ces hauteurs les deux sections sont sollicitées par une contrainte de compression dans le sens Z. La contrainte maximale obtenue en (B2), centre de la section 1, est égale à 10.35 MPa. On remarque aussi une diminution rapide des contraintes des points amont et aval, ceci est dû au refroidissement rapide des points situés près des surfaces exposées à un échange convectif. Au centre la contrainte diminue lentement, cela provient de la faible conduction thermique du béton.

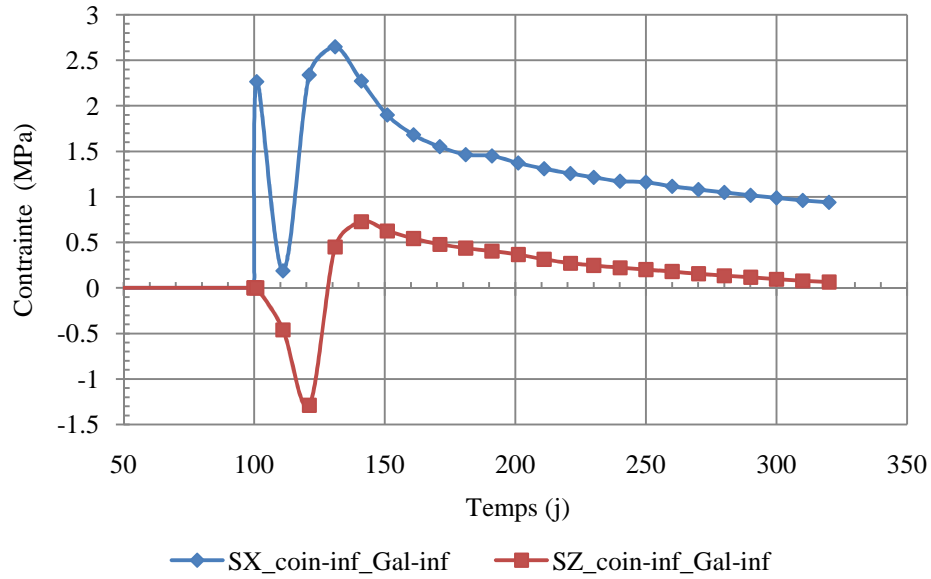


Fig. 3.35 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à la galerie inférieure de la section 1.

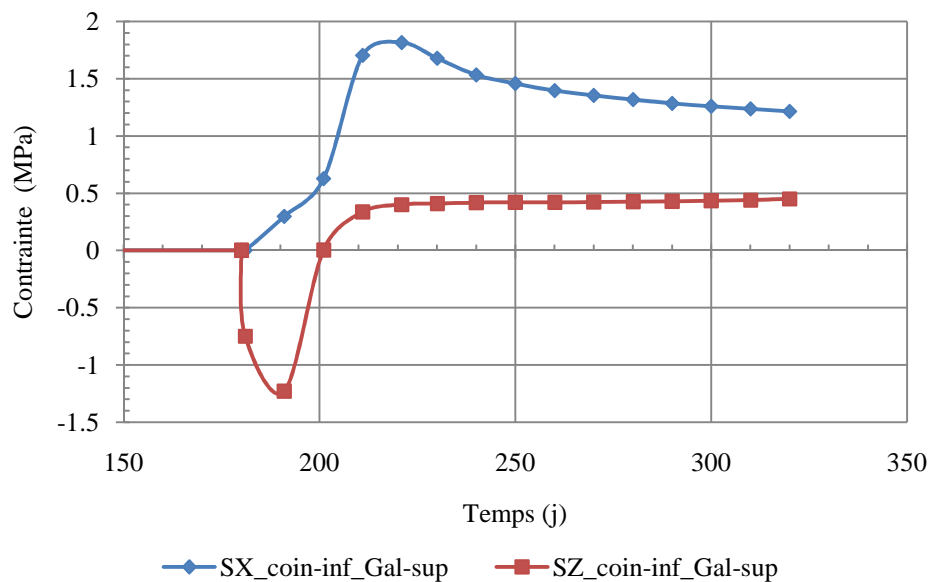


Fig. 3.36 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à la galerie supérieure de la section 1.

❖ Discussion

On observe dans les quatre figures 3.35 à 3.38 que les surfaces des galeries sont sollicitées par des contraintes de traction car à la surface des galeries il y a un échange convectif qui permet de diminuer la température qui est la cause d'un gradient thermique. La contrainte maximale de traction est égale à 2.65 MPa à la galerie inférieure et de 1.81 MPa à la galerie supérieure dans le sens X à la section 1. Elle atteint 2.85 MPa et 4.36 MPa respectivement à la galerie inférieure et supérieure dans la section 2 (sens X). La variation

des contraintes dans les premiers jours est la conséquence de coulage des couches sus-jacentes, parce que l'ajout d'une couche augmente la température de la couche sous-jacente, d'où un gradient thermique positif (dilatation) résulte.

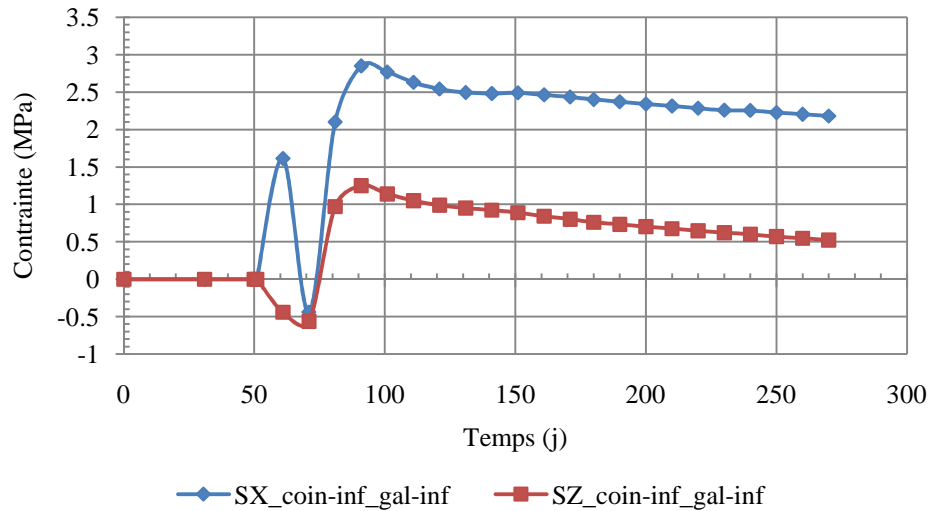


Fig. 3.37 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à la galerie inférieure de la section 2.

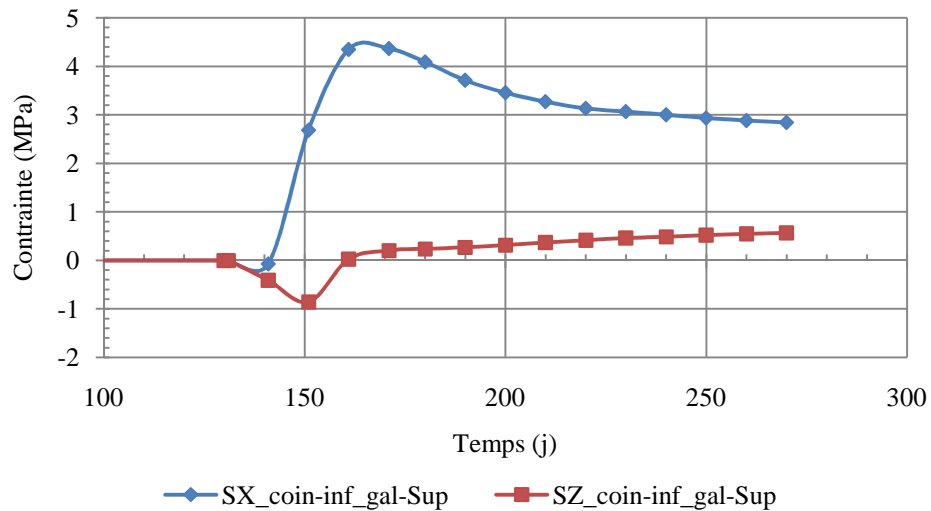


Fig. 3.38 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à la galerie supérieure de la section 2.

III.8.3 Variation des contraintes au sein du corps du barrage

Les figures 3.26.a et 3.26.b montrent que les contraintes varient d'un point à un autre. Afin de représenter ces changements on donne la variation des contraintes suivant différents chemins à travers le corps du barrage.

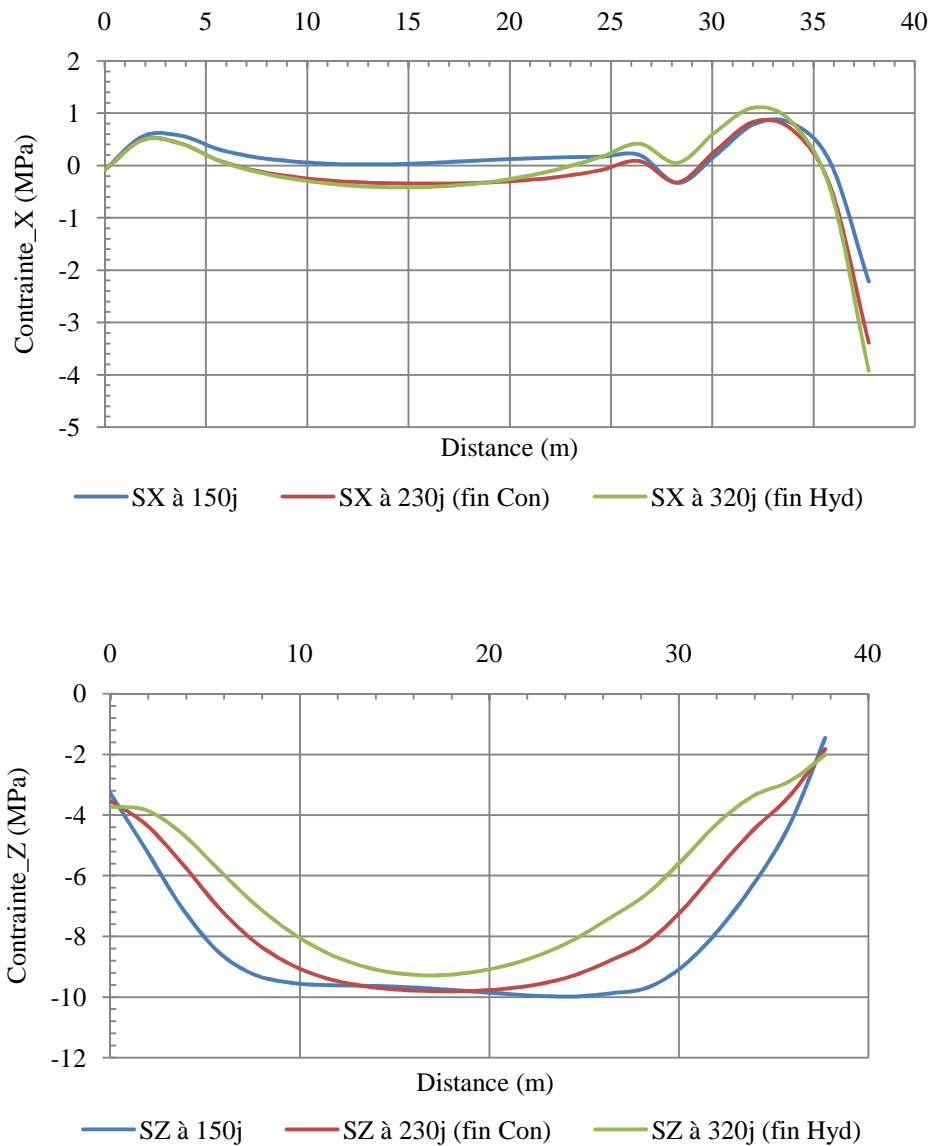


Fig. 3.39 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à 17.40m au-dessus de la base (chemin B) de la section 1.

❖ Discussion

On observe dans la figure 3.39 que les points situés à 17.40m au-dessus de la base de la section 1, sont sollicités par une contrainte de compression dans le sens Z. Dans le sens X il y a des contraintes de traction aux extrémités amont et aval, cette traction résulte du refroidissement rapide des points situés près des surfaces libres (amont et aval). On remarque aussi que les contraintes augmentent proportionnellement au temps c'est-à-dire en fin de construction (320j), la contrainte est grande que celle obtenue à 150js pour les contraintes de traction, mais inversement proportionnelle dans le cas de compression.

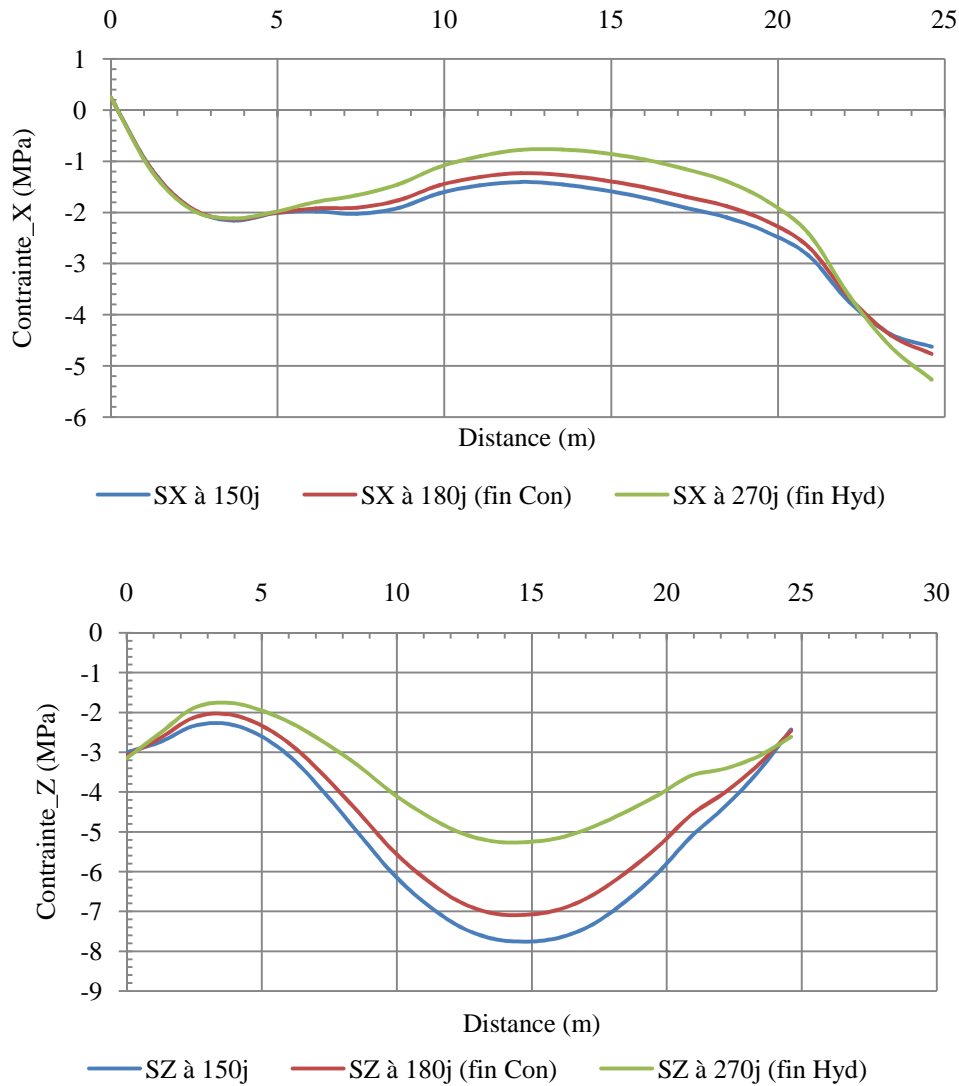


Fig. 3.40 Variation des contraintes suivant les axes X et Z à 9.27m au-dessus de la base (chemin 1) de la section 2.

❖ Discussion

La figure 3.40 représente la variation des contraintes dans la section 2 à 9.27m au-dessus de la fondation (la base) dans les deux sens X et Z, d'une part, on examine dans la figure une contrainte de compression dans les deux sens X et Z, cette compression est la conséquence d'élévation de la température parce que dans cette position (à 9.27) la section est plus épaisse, d'autre part on observe que les contraintes diminuent aux extrémités amont et aval dans le sens Z car en surface la température diminue rapidement sous l'influence d'échange convectif, ainsi à la distance de 4m près de la surface amont la contrainte diminue considérablement car à cette endroit le chemin est près de la galerie qui sert à réduire la température.

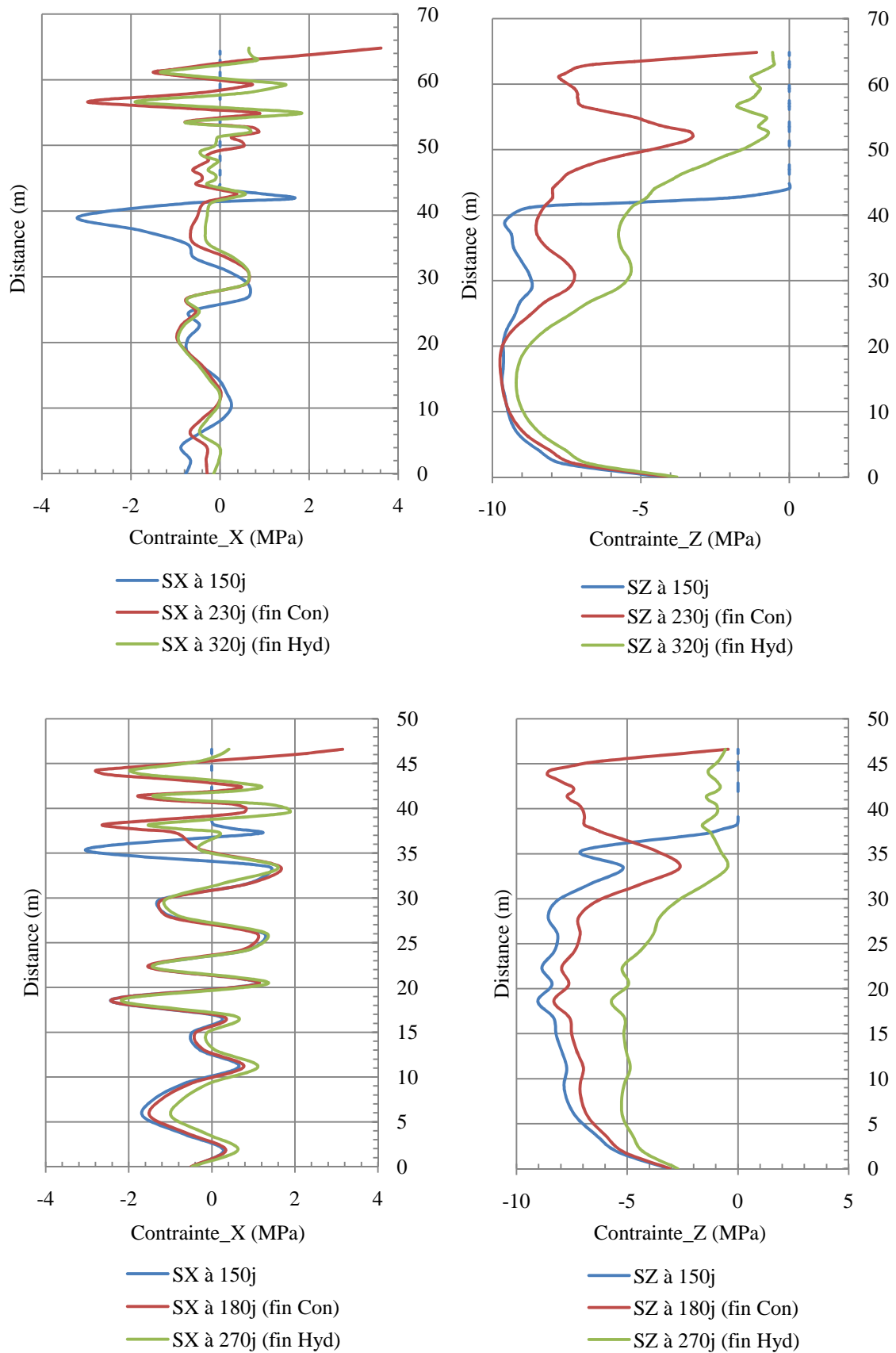


Fig. 3.41 Variation des contraintes suivant la direction verticale (chemin D et chemin 3) respectivement à la section 1 et la section 2 dans les deux sens X et Z.

❖ Discussion

La figure 3.41 représente la distribution des contraintes suivant la direction verticale du barrage, sur cette figure on observe que les deux sections 1 et 2 sont sollicitées par des contraintes de compression dans le sens Z, la contrainte maximale de compression varie de 9.73 MPa à 9.03 MPa respectivement à la section 1 et la section 2, on remarque aussi une diminution des contraintes de compression à la base et au sommet, cette réduction résulte de la diminution de la température par l'échange convectif au sommet et le transfert par conduction près du sol. Dans le sens X on observe une variation sinusoïdale des contraintes entre la compression et la traction cette variation provient d'une part du principe d'étude étape par étape, d'autre part, elle est la conséquence de la différence du module d'élasticité et de la température entre les couches. La contrainte maximale de traction obtenue dans la section 1 et 2 varie de 3.61 MPa à 3.15 MPa, cette contrainte apparaît au sommet et en fin de construction parce que le sommet est exposé à la température ambiante qui sert à diminuer la température de la surface.

III.9 ANALYSE DE LA FISSURATION

Les résultats de distribution des températures obtenus précédemment (paragraphe III.7) montrent qu'un gradient thermique se développe entre le cœur du barrage chaud et les surfaces extérieures refroidies ainsi qu'une élévation de température considérable provenant du barrage. Cette variation de température peut provoquer deux types de fissuration selon Malkawi et al (2003) et U.S Army of engineers (1997).

- ❖ Fissuration en blocs: cette fissuration est généralement causée par une contrainte. La fissuration en masse est décrite comme le craquage qui se produit lorsque les contraintes de traction de la masse dépassent la capacité de contrainte de traction du béton, cette procédure d'analyse de la fissuration peut être adoptée pour une contrainte ou une méthodologie basée sur la déformation.
- ❖ Fissuration de peau: lorsque la surface d'une structure se refroidit plus rapidement que le cœur, un gradient de température existe entre le cœur et la surface. Ce qui provoque un gradient de contrainte de traction qui peut provoquer la fissuration à la surface extérieure.

III.9.1 Gradient de fissuration en blocs

Généralement la déformation est utilisée comme base pour suivre la fissuration, on peut utiliser la contrainte de traction obtenu par l'analyse et la contrainte admissible du béton. L'équation suivante peut être utilisée pour calculer la déformation de la structure (U.S Army corps of engineers (1997)).

$$\varepsilon = \alpha \times \Delta T \times K_R \times K_f \quad \text{eq. (3-6)}$$

Où α : Coefficient de dilatation thermique

K_R : Facteur de rétention par la structure

K_f : Facteur de rétention par la fondation

ΔT : Différence de température

Selon Tatro et Schrader (1992) le coefficient K_R est égal à 1.0 pour l'hypothèse prudente et la déformation maximale obtenue à la base de fondation.

Le coefficient K_f est calculé par la formule suivante

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_b}{A_f E_f}} \quad \text{eq. (3-7)}$$

Où A_g : Superficie brute de la section transversale du béton au niveau du plan de fondation

A_f : Superficie de la fondation ou la zone de béton retenue à la contraction, la valeur maximale recommandée est $A_f = 2.5 A_g$.

E_b et E_f les modules d'élasticité du béton et de la fondation respectivement égale à 26.6GPa et 14.0 GPa.

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_b}{A_f E_f}} \Rightarrow K_f = \frac{1}{1 + \frac{26.6}{2.5 \times 14.0}} \\ \Rightarrow K_f = 0.57$$

ΔT , la différence de température entre la température maximale obtenue et la température ambiante, le coefficient de dilatation est de $7.6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Selon Malkawi et al (2003), la capacité de déformation du béton sous la traction est de $80\mu\text{m/m}$ et la fissuration admise est de 2.5mm.

Le tableau 3.7 représente les résultats de fissuration et l'espacement des joints.

Tableau 3.7 résultats de fissuration et espacement des joints du barrage de Brezina.

	Section 1	Section 2
Température maximale (°C)	67.48	65.76
Température ambiante (°C)	20.2	20.2
Différence de température (°C)	47.28	45.56
Déformation ($\mu\text{m/m}$)	204.82	197.36
Déformation admissible ($\mu\text{m/m}$)	80	80
Différence de déformation ($\mu\text{m/m}$)	124.82	117.36
Fissuration total (mm)	19.10	17.95
Nombre de blocs	8	8
Largeur de blocs (m)	19	19

❖ **Commentaire**

On observe à partir du tableau qu'il faut huit (8) blocs pour éviter l'apparition des fissures dépassent les 2.5mm, mais le barrage est construit en sept (7) blocs car les barrages voûtes construits dans des vallées étroites donnent des sections assez grandes au centre du barrage et moindres aux extrémités (voir figure 3.4) et les dimensions des blocs ont une influence sur la température maximale qui provoque la fissuration. Les dimensions des blocs utilisés à la construction sont données dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 dimension des sections (Plots) du barrage.

Plot	I	II	III	IV	V	VI	VII
Largeur (m)	33.00	16.80	15.40	15.40	15.40	16.60	36.00

Donc les cinq (5) sections centrales ne dépassent pas la longueur de bloc calculée (19m)

III.9.2 Gradient de fissuration de peau

Dans les barrages la température de la surface refroidie rapidement que le cœur du barrage, cette diminution cause un gradient thermique entre la surface froide et le centre chaud qui peut générer des contraintes thermique indésirables ainsi qu'une fissuration surfacique.

On utilise la méthode proposée par Tatro et Schrader (1992) pour calculer la fissuration surfacique.

Selon l'agence nationale des barrages (ANB) la résistance à la compression du béton utilisée à la construction du barrage est égale à 22 MPa, à partir de cette valeur on peut déduire la résistance à la traction et le module d'élasticité ainsi que leurs variations en fonction du temps.

Selon l'Eurocode2 (1992) la résistance à la traction calculée en fonction de la résistance à la compression par la formule suivante

$$f_t = 0,30f_c^{2/3} \Rightarrow f_t = 0.30 \times (22)^{2/3}$$

$$\Rightarrow f_t = 2.35 \text{ MPa.}$$

Le module d'élasticité est donné par la relation

$$E = 9500 \times (f_c)^{(1/3)} \Rightarrow E = 9500 \times (22)^{(1/3)}$$

$$\Rightarrow E = 26.6 \text{ GPa.}$$

Selon Radovanović (1998), la variation du module d'élasticité en fonction du temps est donnée par la relation suivante

$$E_t = \beta_e \times E_{28}$$

Où β_e : coefficient dépend de l'âge du béton, ce coefficient est donné par la figure 3.42.

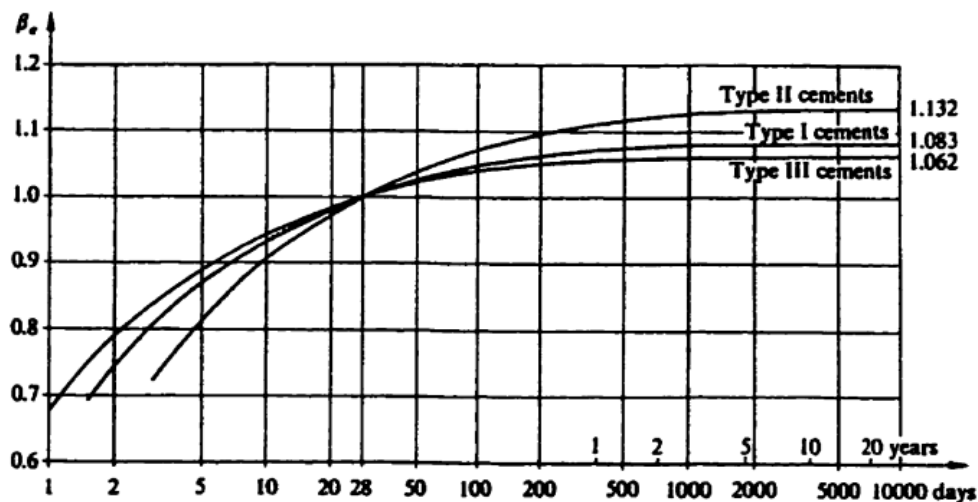


Fig. 3.42 effet de l'âge de béton sur le module d'élasticité selon Radovanović (1998).

Les résultats de variation du module d'élasticité de béton sont représentés à la figure 3.43

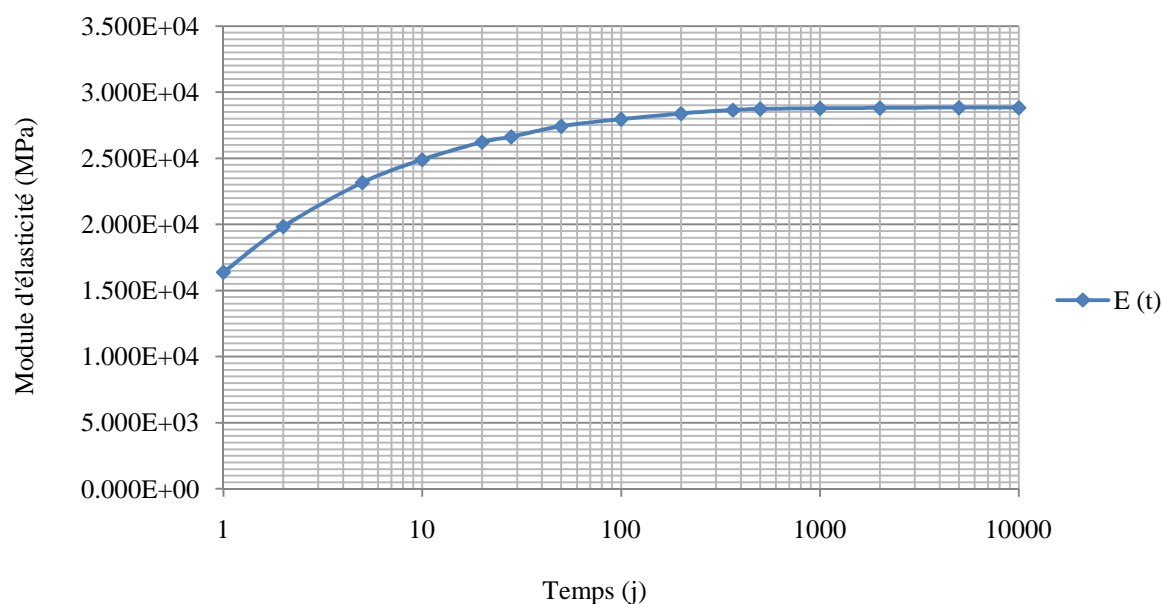


Fig. 3.43 Variation du module d'élasticité en fonction du temps.

Le gradient de fissuration de peau est présenté dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 Analyse de fissuration de la surface du barrage.

	Période (j)	ΔT (°C)	Déformation Incrémentale ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Module d'élasticité (MPa)	Contrainte incrémentale (MPa)	Contrainte total (MPa)	Contrainte maximale de traction (MPa)
Section 1	0 à 3	9.06	68.85	18101	1.24	1.24	1.09
	3 à 14	7.56	57.46	24756	1.42	2.66	2.04
	14 à 28	0.97	7.37	25909	0.19	2.85	2.23
Section 2	0 à 3	7.31	55.56	18101	1.01	1.01	1.09
	3 à 14	5.92	44.99	24756	1.11	2.12	2.04
	14 à 28	0.78	5.92	25909	0.15	2.27	2.23

❖ Commentaire

A partir du tableau 3.9, on observe que dans la section 1 il y aura des fissures après les premiers jours, mais dans la section 2 les fissures ne se développent qu'après le troisième

jour. Si on prend ces résultats pour calculer le nombre des blocs et la longueur des blocs on trouve les valeurs ci-dessous:

Tableau 3.10 présentation de nombre des blocs et la longueur nécessaire pour éviter la fissuration de peau.

	Section 1	Section 2
Déformation total ($\mu\text{m/m}$)	133.68	106.47
Déformation admissible ($\mu\text{m/m}$)	80	80
Différence de déformation ($\mu\text{m/m}$)	53.68	26.47
Fissuration total (mm)	8.21	4.05
Nombre de blocs	4	2
Longueur de blocs (m)	38	76

Donc on prend des blocs inférieurs à 19m pour les sections centrales du barrage pour éviter les deux cas de fissuration que ce soit la fissuration de peau ou la fissuration en blocs. Ces conditions sont vérifiées dans la construction du barrage qui nous a permis de juger qu'il n'y a pas des fissures qui dépasse les 2.5mm que ce soit en surface du barrage ou au centre.

III.10 CONCLUSION

Dans cette partie du mémoire, nous avons déterminé la distribution des températures et des contraintes thermiques dans le barrage de Brezina en cours de construction. Les résultats obtenus nous ont permis de montrer la nécessité de la prise en compte du phénomène de retrait thermique dans la conception de structures massives telles que les barrages. Ce phénomène dérive de l'évolution des températures causées par la chaleur d'hydratation du ciment qui est le paramètre moteur, les propriétés du matériau et les conditions environnementales jouent aussi un rôle.

Les contraintes obtenues sont les conséquences de changement de températures, elles peuvent provoquer la fissuration précoce si les contraintes dépassent la résistance admissible du béton que ce soit pour les contraintes de compression ou de traction, mais le plus souvent la fissuration résulte des contraintes de traction car la résistance du béton à la traction est plus faible que celle de compression.

ETUDE PARAMETRIQUE

4-1	INTRODUCTION	89
4-2	RESULTATS D'ANALYSE THERMIQUE	89
4-3	ANALYSE DE LA FISSURATION	96
4-4	CONCLUSION	97

IV.1 INTRODUCTION

Les résultats de distribution des températures et des contraintes thermiques présentées dans le chapitre III sont obtenues en faisant rentrer les données nécessaires à la prévision du comportement mécanique et thermique du béton à savoir la chaleur d'hydratation du ciment, la température ambiante du site, le module d'élasticité, la résistance à la traction et à la compression, la conductivité thermique et la température initiale de coulage.

Le chapitre que nous abordons va présenter une étude paramétrique qui servira à prévoir l'influence de la température initiale du béton (température de coulage) sur l'évolution de la température dans le corps du barrage. En effet, on propose des températures initiales de coulage de 18 - 20 - 25 et 30 °C.

IV.2 RESULTATS D'ANALYSE THERMIQUE

A partir du chapitre III on a remarqué que la température maximale est atteinte à la section 1. Pour cette raison on étudie seulement la section 1 dans cette partie.

❖ Discussion

La figure 4.1 représente la distribution de la température à la fin d'hydratation (320j) pour des températures initiales de coulage différentes. On observe en premier lieu que la distribution de la température est la même pour les quatre cas, ce résultat est acceptable parce que la distribution dépend de la géométrie et des paramètres d'échange thermique (la convection et la conduction). Par exemple pour l'échange convectif on remarque que la température diminue autour de barrage et des galeries. En second lieu on observe une augmentation de la température de fin d'hydratation proportionnelle à la température initiale de coulage.

Tableau 4.1 Température à différente temps pour différentes températures de coulage.

Température de coulage (°C)	18	20	25	30
Température maximale (°C)	66.03	67.49	71.16	75.91
Fin de construction (230j) (°C)	65.07	66.50	70.05	73.61
Fin d'hydratation (320j) (°C)	62.75	64.09	67.43	70.77

❖ Commentaire

La température augmente proportionnellement avec la température initiale de coulage. Cette proportionnalité est logique car dans le cœur du barrage la température est égale à

peu près à la somme entre la température adiabatique générée par le ciment et la température initiale de coulage. On montre cette proportionnalité sur la figure 4.2.

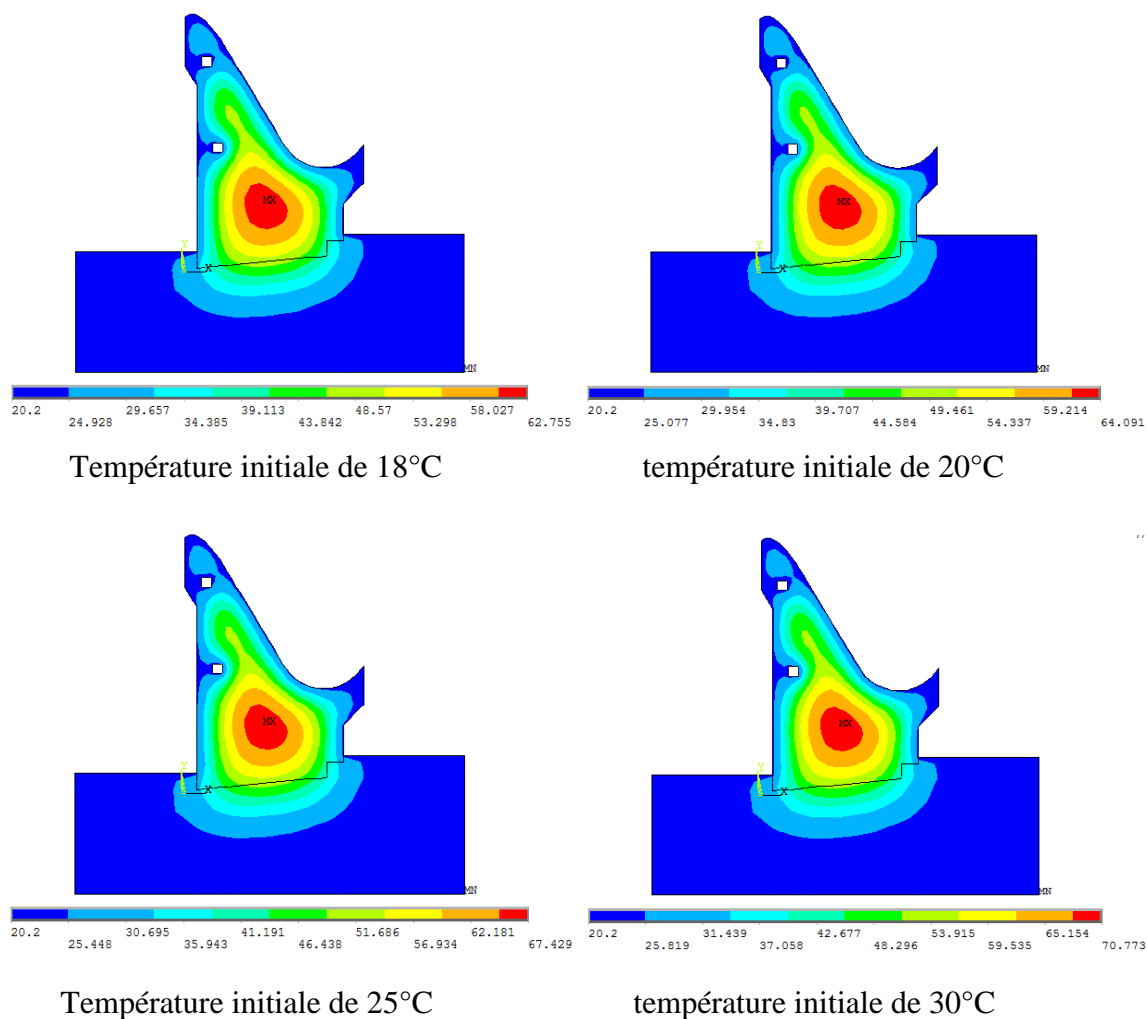


Fig. 4.1 évolution de la température en fin d'hydratation (320j) pour des températures de coulage différentes.

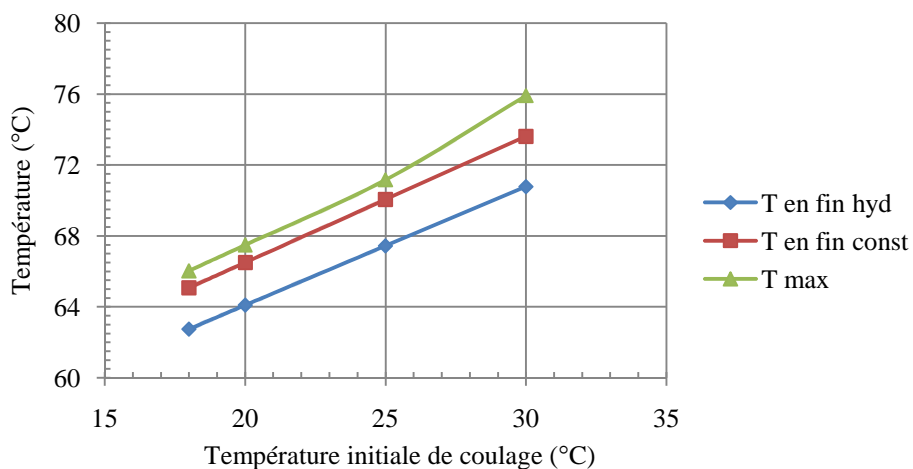


Fig. 4.2 Variation de température en fonction de la température initiale de coulage.

IV.2.1 Variation de la température en fonction de temps

Dans cette partie on représente la variation de la température en fonction de temps pour les quatre températures initiales du béton.

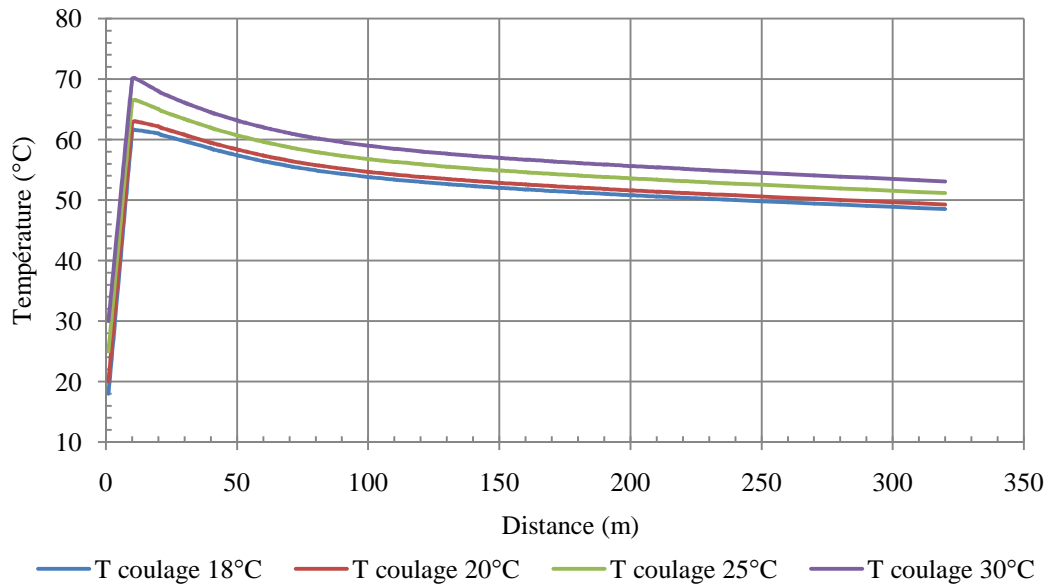


Fig. 4.3 Variation de la température au centre de la base de la section 1 (point A) pour différentes températures de coulage.

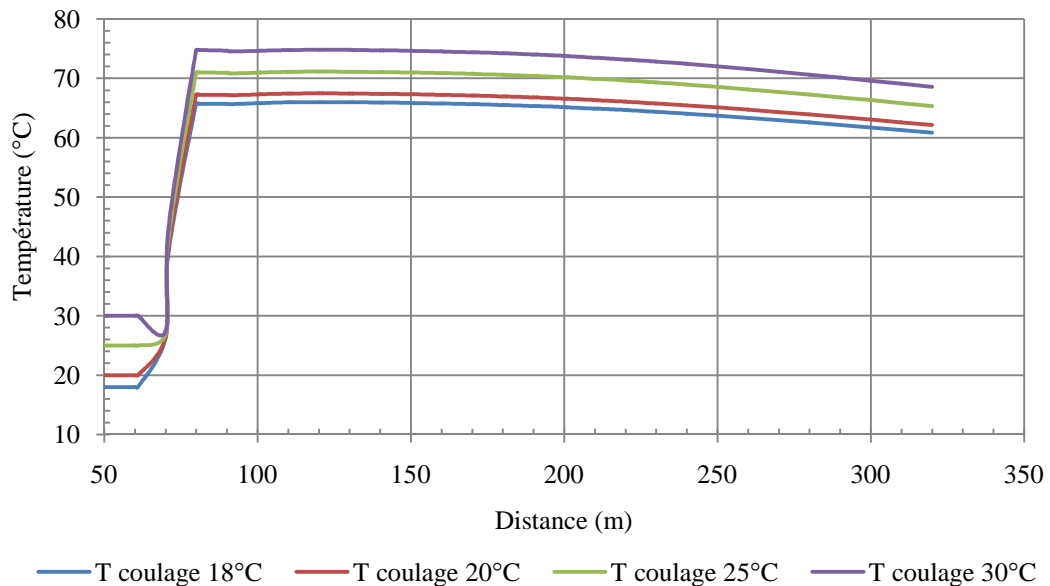


Fig. 4.4 Variation de la température à 20.40m au dessus de la base de la section 1 (point B2) pour différentes températures de coulage.

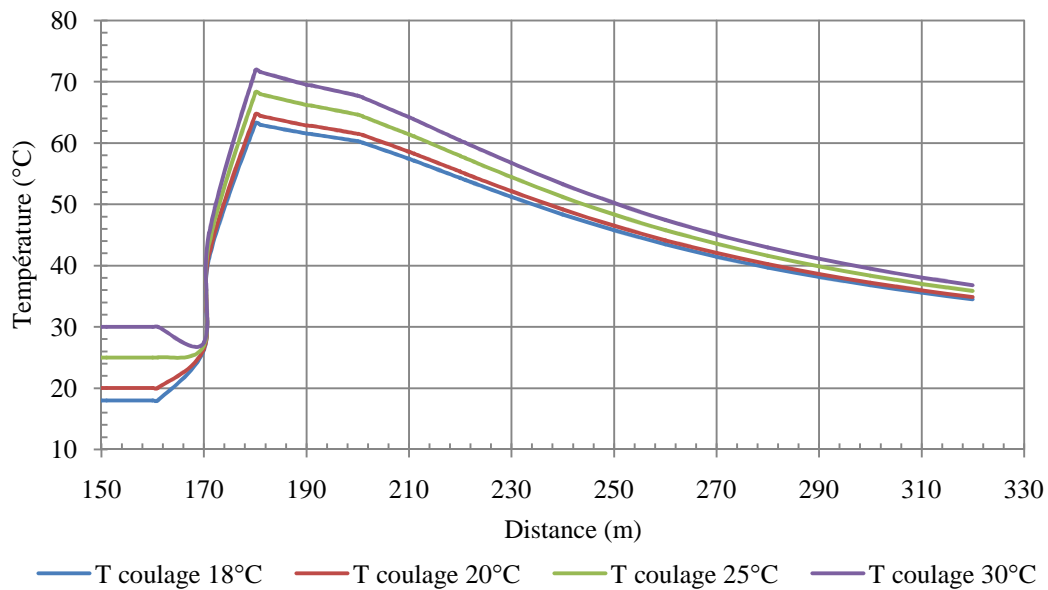


Fig. 4.5 Variation de la température à 47.67m au dessus de la base de la section 1 (point D2) pour différentes températures de coulage.

❖ Discussion

Les figures 4.3 à 4.5 représentent la variation de la température dans le centre de la section 1 en des points à différentes hauteurs et pour différentes températures de coulage. La figure 4.3 donne la variation de la température au centre de la base, on observe dans cette figure que la température atteint une valeur maximale de 70.13°C pour une température de placement de 30°C, et une valeur de 61.60°C pour la température de placement de 18°C, donc une différence de 8.53°C. Cette différence est suffisante pour développer une déformation de 64.82 $\mu\text{m}/\text{m}$. Autrement dit si on compare les températures maximales obtenue dans les trois cas, on observe que la différence entre le cas de la température de placement de 20°C et 25°C ainsi entre 25°C et 30°C, elle est égale à deux fois et demi la différence entre la température obtenue pour 18°C et 20°C, donc la différence est proportionnelle à la température de coulage.

La particularité observée dans la figure 4.4 et 4.5 est la diminution de la température au premier jour dans le cas où la température de placement égale à 30°C, cette réduction résulte d'échange convectif qu'a pour effet de diminuer la température à 27.4°C.

IV.2.2 Evolution de la température selon la position

Les résultats représentés dans cette partie concernent la variation de la température en fonction de la position du point.

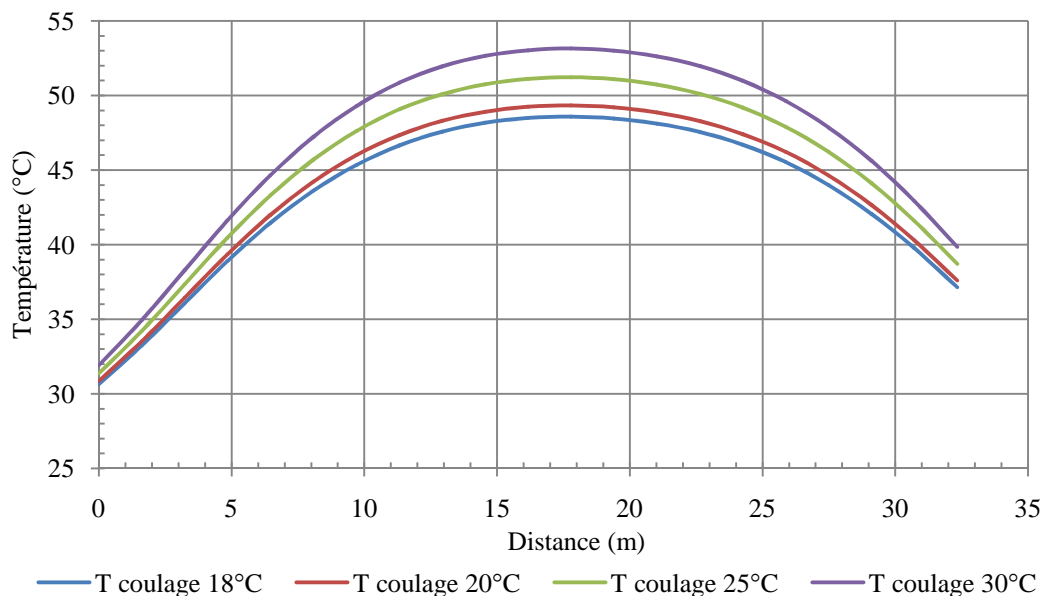


Fig. 4.6 Variation de la température sur la base (chemin A) de la section 1 en fin d'hydratation.

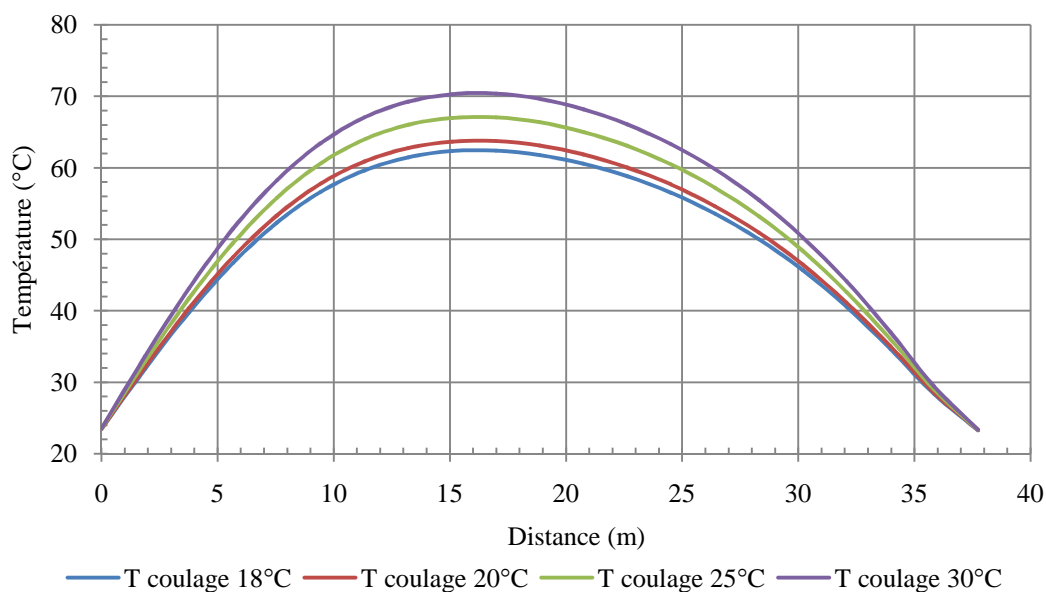


Fig. 4.7 Variation de la température à 17.40m au-dessus de la base (chemin B) de la section 1 en fin d'hydratation.

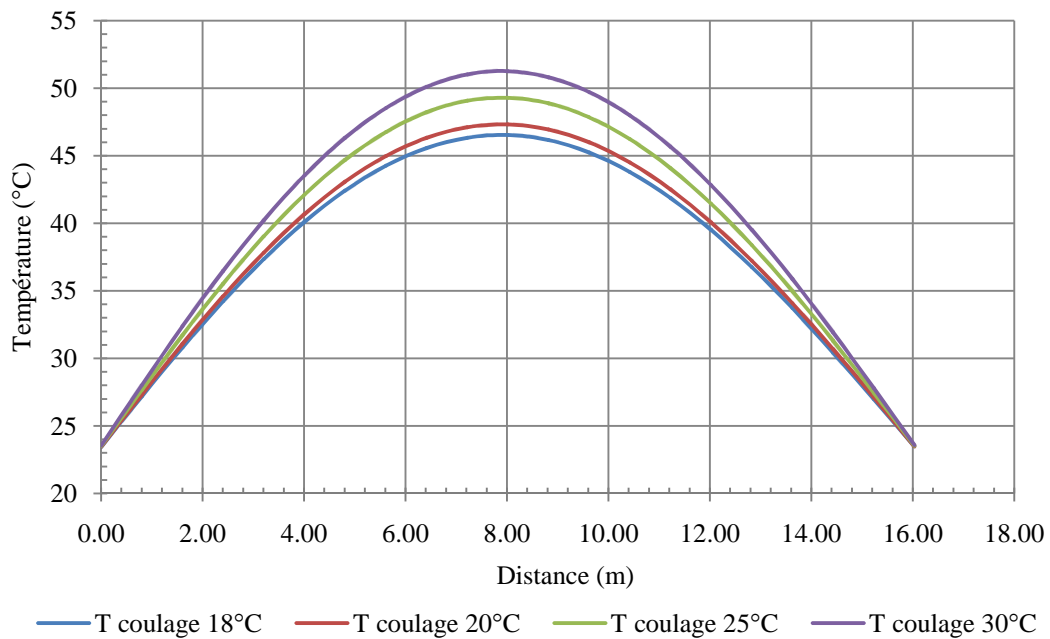


Fig. 4.8 Variation de la température à 40.00m au-dessus de la base (chemin C) de la section 1 en fin d'hydratation.

❖ Discussion

Les figures 4.6 à 4.8 donnent la distribution de la température selon la position des points selon des hauteurs déterminées. On observe dans ces figures que la variation de la température est proportionnelle à la température initiale de coulage, la température maximale est égale à 70.36°C au centre du barrage à une hauteur de 17.40m pour une température initiale de coulage de 30°C. On remarque aussi que l'allure de variation de la température ne dépend pas de la température initiale de coulage, mais dépend de la géométrie, des propriétés de dissipation de la chaleur et des conditions aux limites comme l'indiquent la figure 4.7 et 4.8. La diminution de la température aux extrémités tend vers la température ambiante (23.3°C).

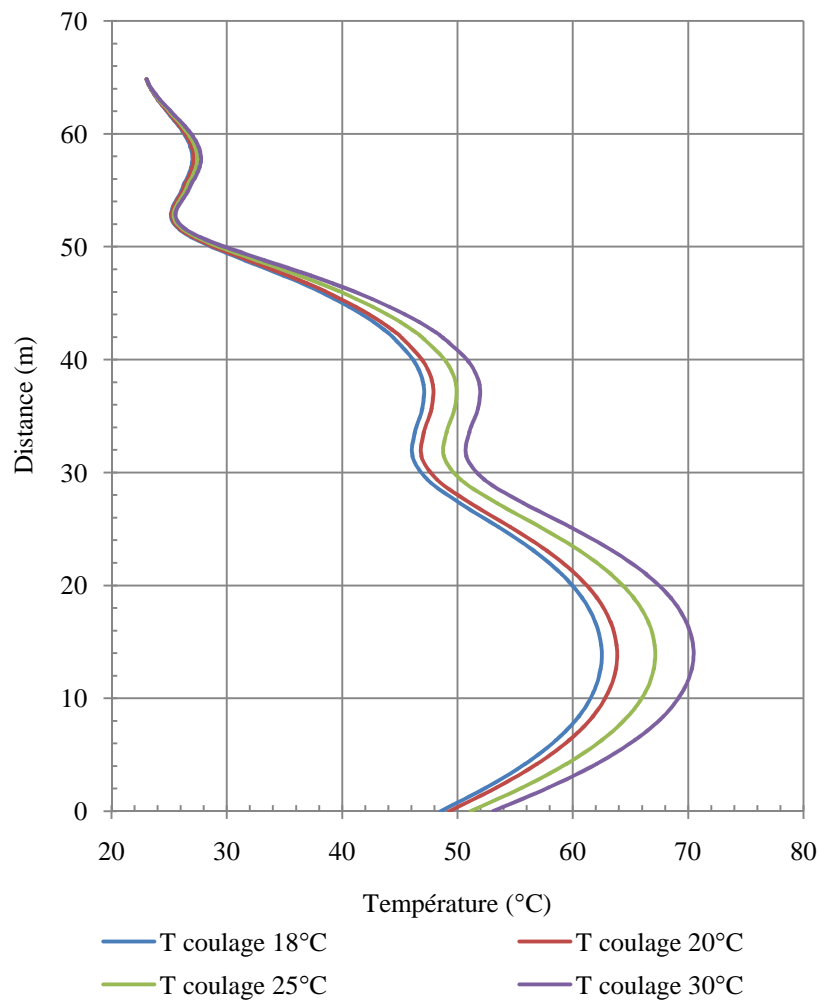


Fig. 4.9 Variation de la température dans le sens vertical (chemin D) de la section 1 en fin d'hydratation.

❖ Discussion

On observe dans la figure 4.9 que la distribution de la température varie toujours proportionnellement à la température initiale de coulage. La température maximale est égale à 70.42°C elle apparaît à la zone épaisse du barrage à environ 15m au-dessus de la base. Pour la température initiale de coulage 30°C, la température diminue à 23.05°C au sommet de la section parce que elle est exposée à la température ambiante.

L'étude paramétrique met en évidence qu'une diminution de la température initiale du béton se répercute intégralement sur la température maximale atteinte au cœur de l'ouvrage, et démontre l'importance majeure de ce paramètre, guidant, par là même, le choix des installations pour la production du béton.

IV.3 ANALYSE DE LA FISSURATION

L'influence de la température initiale de coulage sur la température maximale atteinte se répercute directement sur le gradient thermique qui est la cause de la fissuration précoce des ouvrages en béton. Dans cette partie on représente l'influence de la température de placement au développement de la fissuration.

En utilisant la formule ci-dessous pour calculer la déformation.

$$\varepsilon = \alpha \times \Delta T \times K_R \times K_f \quad \text{eq. (4-1)}$$

Avec $K_R = 1$

$$K_f = 0.57$$

Pour plus de détail voir paragraphe III.9.1 chapitre III.

Ci-dessous on représente les résultats d'étude de la fissuration en blocs obtenus pour les différentes températures de coulage dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 résultats de fissuration et espacement des joints pour différentes températures initiale de coulage.

Température initiale (°C)	18	20	25	30
Température maximale (°C)	66.03	67.49	71.16	75.91
Température ambiante (°C)	20.2	20.2	20.2	20.2
Différence de température (°C)	45.83	47.29	50.96	55.71
Déformation (µm/m)	198.53	204.86	220.76	241.34
Déformation admissible (µm/m)	80	80	80	80
Différence de déformation (µm/m)	118.53	124.86	140.76	161.34
Fissuration total (mm)	18.13	19.10	21.54	24.68
Nombre de blocs	8	8	9	10
Largeur de blocs (m)	19	19	17	15

❖ Commentaire

A partir du tableau 4.2 on observe que la température initiale de coulage du béton se répercute intégralement sur le développement de la fissuration précoce, le nombre des joints et le nombre des blocs et leur largeur maximale. On remarque que pour une

augmentation de 5°C de la température de coulage la largeur du bloc diminue de 2m, on ne peut pas donc utiliser la température de coulage de 30°C à la construction du barrage du Brezina car cette température exige de ne pas dépasser une largeur de 15m, mais dans la conception du barrage la largeur de la section 1 est de 15.40m.

IV.4 CONCLUSION

Ce quatrième chapitre a permis la présentation de l'influence de la température initiale de coulage sur la conception du barrage que ce soit de point de vue résultats thermique ou de fissuration. D'une part, l'étude paramétrique met en évidence qu'une diminution de la température initiale du béton se répercute intégralement sur la température maximale atteinte au cœur du barrage, et démontre l'importance majeure de ce paramètre, guidant, par là même, le choix des installations pour la production du béton. D'autre part, les résultats d'étude paramétrique donnent une idée sur l'impact de la température de coulage sur le coût du projet par l'élimination des joints inutiles afin de d'économiser leur entretien coûteux. Enfin, éviter l'utilisation des systèmes de réfrigération qui augmentent le coût de réalisation par l'utilisation des techniques simples diminue la température initiale de coulage tel que l'utilisation de l'eau de gâchage refroidie.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

99

CONCLUSION GENERALE

Nous avons procédé au cours de cette étude à la détermination de la distribution des températures et des contraintes thermiques dans un barrage en béton en construction. Cette température est la conséquence de la réaction exothermique d'hydratation du ciment. Pour ce faire, on prend en considération d'une part l'influence de la température initiale de la fondation rocheuse, la température environnementale et la vitesse de vent (comme conditions environnementales) d'autre part la chaleur d'hydratation du ciment, la résistance, la composition du béton, la conductivité thermique, le module d'élasticité et le coefficient de dilatation thermique comme propriétés du matériau.

L'ouvrage étudié est modélisé en 2D par la méthode des éléments finis en utilisant le code de calcul ANSYS. Les excitations appliquées au barrage sont son poids propre et les températures (que ce soit la température ambiante ou la température due à la chaleur d'hydratation du ciment). La simulation s'effectue en deux phases. Dans un premier temps on a étudié l'évolution de la température au cœur du barrage, dans un second temps on a étudié la distribution des contraintes thermiques (étude structurale) par l'introduction des résultats de la première phase (évolution de la température). Les principaux résultats obtenus sont:

- La température dans les zones épaisses est plus élevée que celle des zones minces. Il en est de même pour la grande section et dans la petite section car quand les dimensions de la zone où la section augmente la dissipation de la chaleur vers l'extérieur prend plus du temps.
- La température diminue rapidement sur les parois extérieures parce qu'elles sont exposées aux échanges convectifs qui servent à réduire la température à la température ambiante.
- La chaleur d'hydratation du ciment plus que la faible conductivité thermique du béton peuvent augmenter la température dans le cœur du barrage de plusieurs degrés Celsius, cette température ne diminue que lentement pour osciller autour de la température moyenne annuelle de la région.
- La température initiale du gâché se répercute directement sur l'évolution de la température du corps et sur les contraintes thermiques.

- Les déformations thermiques obtenues par le gradient thermique sont suffisantes pour provoquer des fissures si ces contraintes dépassent la résistance limite du béton.
- Les résultats obtenus par cette étude nous permettent d'affirmer que les dimensions utilisées à la construction du barrage du Brezina sont acceptables si les fissures limites ne dépassent pas les 2.5 mm.

D'une manière générale l'étude donne un guide sur le choix des installations pour la production du béton, le choix des matériaux constituant le béton (tel que le ciment), les techniques de construction, l'estimation de la largeur des plots du barrage, et l'élimination des joints de dilatation inutiles.

De nombreuses perspectives apparaissent à la fin de l'étude que ce soit du point de vue propriétés du béton ou du point de vue procédure de construction.

De point de vue propriétés des matériaux, il est recommandé de déterminer la chaleur d'hydratation du ciment par la méthode expérimentale en utilisant des essais adiabatiques ou semi-adiabatiques sans oublier de prendre en considération l'influence des adjuvants et effectuer l'analyse pour différents types de ciment avec l'utilisation des ajouts tel que les cendres volantes et le pouzzolane. Il faut déterminer le coefficient de dilatation thermique du béton par des essais au laboratoire avec des compositions différentes, car ce dernier influe directement sur la déformation du béton qu'entraîne l'apparition des contraintes de traction.

En ce qui concerne les procédures de construction on propose de refaire la simulation en variant l'épaisseur des couches et le temps écoulé entre le coulage de deux couches successives. Il faut effectuer une étude en trois dimensions (3D) et prendre en considération le remplissage du réservoir, car les échanges convectifs entre le béton et l'air sont différents du celle entre le béton et l'eau.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

ACI 116R-00 (2005) "Cement and Concrete Terminology" American Concrete Institute, USA, Committee 116, 2005.

ACI 207.1R-96 "Mass Concrete" American Concrete Institute, USA, Committee 207, 1996.

Aggoun S, Torrenti J.M, Prost J, Legrand M (1994) "Analyse des effets thermiques sur le comportement mécanique des bétons destinés aux revêtements de tunnels" Materials and structures, Vol 27, 1994, pp 138-147.

Alfred S., Maurice-H.D. (1957) "Problème thermique posés par la construction des barrages-réservoirs." Publication N° 38, 1957, éd Paul Feissly, Université de LAUSANNE, 1957.

Boulay C, Torrenti J-M, Andre J-L, Saintilan R (2010) "Quasi-adiabatic calorimetry for concretes: Influential factors" Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol 278, 2010, pp 19-36.

Bouzoubaâ N, Lachemi M, Miao B, Aïtcin P.C (1996) "Comportement thermique et mécanique du béton de masse au jeune âge" Canadien journal civil engineering, Vol 23, 1996, pp 1199-1206.

Comité Français des grands barrages " Petits Barrages" recommandation pour la conception, la réalisation et la suivi, éd Cemagref, 2002.

Crichton A.J, Benzenati I, Qiu T.J, Williams J.T. (1999) "Kinta RCC Dam-are over-simplified thermal-structure analyses valid?" Proc., ANCOLD Conf, on Dams, 1999.

Eurocode 2: Eurocode2, Calcul des structures en béton et document d'application nationale, Normalisation Française, P18-711, 1992.

Francesco Amberg, Commission International Des Grands Barrages (ICOLD) "thermal analysis of dam during construction", Benchmark Workshop on Numerical analysis of dams, 2003.

Haouas A (2007) "Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires - Caractérisation et modélisation CHIMIO-HYDRO-MECANIQUE du retrait" Thèse de Doctorat, ENSC, CACHAN (France), 2007, 222 p.

Ishikawa M, (1991) "Thermal Stress Analysis of Concrete Dam" Computers and Structures, Vol. 40, N° 2, 1991, pp. 347-352.

Jaafar M.S, Bayagoob K.H, Noorzaei J, Thanoon Waleed. A.M (2007) "Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams" Elsevier Ltd and Civil-Comp Ltd, Vol 38, 2007, pp 886-895.

Kim J.K, Kim K.H, Yany J.K (2001) "Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system" Computers and structures, Vol 79, 2001, pp 163-171.

Lamond J.F, Pielert J.H (2006) "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials" ASTM Stock No.: STP 169D, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA, 2006.

Laurie Buffo-Lacarrière (2007) "Prévision et évaluation de la fissuration précoce des ouvrages en béton" Thèse de Doctorat, INSA, TOULOUSE (France), 2007, 250 p.

Lawrence A.M (2009) "A Finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete" Thèse de Doctorat, FLORIDA, 2009, 177 p.

Luna R, Wu Y (2000) "Simulation of Temperature and Stress Fields during RCC Dam Construction" Journal of Construction Engineering and Management, Vol 126, 2000, pp 381-388.

Malkawi A.H, Mutasher S.A, Qiu T.J. (2003) "Thermal-Structural Modeling and Temperature Control of Roller Compacted Concrete Gravity Dam." Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 17, 2003, pp. 177-187.

Malkawi A.H, Shatnawi E, Aufleger M, (2004) "Temperature Distribution in Roller Compacted Concrete RCC Dam Using Two Different Finite Element Codes" International Conference on Geotechnical Engineering, October 3-6, 2004, Sharjah-United Arab Emirates.

Mounanga P, Khelidj A, Loukili A, Bastian G (2004) "Contribution a l'étude des mécanismes a l'origine de la fissuration précoce des matrices cimentaires" 1 st international Congress on Technology and Durability, 24-26 mai 2004, U.S.T.H.B, Alger, 2004.

Mounanga Pierre (2004) "Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge: hydratation, retraits, propriétés thermophysiques" Thèse de Doctorat, NANTES, 2004, 245 p.

Nabeel Ahmed Khan (2011) "Thermo-Mechanical Analysis of Roller Compacted Concrete Dams" Master of Science, University of Engineering and Technology LAHORE (Pakistan), 2011, 80 p.

Noorzai J, Bayagoob K.H, Thanoon W.A, Jaafar M.S (2006) "Thermal and stress analysis of Kinta RCC dam" Engineering Structures, 2006, pp. 1795-1802.

Radovanović S (1998) "Thermal and structural finite element analysis of early age mass concrete structures" Master of Science, MANITOBA, 1998, 157 p.

Saetta A, Scotta R, Vitaliani R. (1995) "Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads" Journal of Structural Engineering, Vol. 121, 1995, pp. 446-457.

Shatnawi E.S (2004) "Determination of Temperature Distribution and Thermal Stresses for RCC Dams Using Two Different Finite Element Codes (A Comparative study)" Master of Science, Jordan University of Science and Technology, 2004, 127 p.

Tanabe T, Kawasumi M, Yamaskita Y (1986) "Thermal Stress Analysis of Massive Concrete Structures, Seminar Proceedings For Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Tokyo, Japan, May 21-24, 1985, ASCE, New York, N.Y.

Tatro S, Schrader E (1992) "Thermal Analysis of RCC - A Practical Approach" Roller Compacted Concrete III, ASCE, New York, 1992.

Tia M, Ferraro C, Lawrence A, Smith S, Ochiai E (2010) "Development of design parameters for mass concrete using finite element analysis" FLORIDA, Project No. 00054863, 2010, 194 p.

U.S Army corps of engineers (1995) "Engineering and design "Gravity Dam Design" Engineering Manuel (EM) 1110-2-2200, Washington, DC20314-1000, 1995.

U.S Army corps of engineers (1997) "Thermal studies of mass concrete structures" Engineering Technical Letter 1110-2-542, Washington, D.C, 1997.

**Annexe A - Température mensuelle de la
région de Brezina**



Données Climatologiques

Période : 01/01/1999 au 31/12/1999	Date d'exécution : 19/12/2011
Destinataire	BOUGUENINA Orbi 14 GAID Benomar - Saida-
Document N°:105/ASSIST/CLIM/2011	

Analyse pour : BREZINA, point de mesure représentatif BREZINA.

Mois	Année 1999		
	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Tmoy (°C)
Janvier	4.1	13.2	8.7
Février	3.7	13.6	8.7
Mars	7.8	19.0	13.4
Avril	11.5	26.3	18.9
Mai	17.5	32.9	25.2
Juin	23.2	38.3	30.8
Juillet	25.9	40.3	33.1
Aout	25.7	40.2	33.0
Septembre	20.6	33.9	27.3
Octobre	15.3	28.6	22.0
Novembre	7.3	17.8	12.6
Décembre	3.6	14.4	9.0

P/ Le Directeur Régional

Le chef de Section Assistance

TA

TAMRAGH



**Annexe B - caractéristiques des
granulats et de la roche de fondation**



3.6.4. RESULTATS DES ESSAIS

A. Proprietes physiques et mecaniques de la pierre

		Echantillon		
		ECH-4	ECH-5	
1. Resistance a la compression (JUS*B.B.8.018)				
a) etat sec	op max.	169.0	228.0	MN/m ²
	op min.	154.0	180.5	MN/m ²
	op.moyen	164.0	198.5	MM/m ²
b) etat sature	op max.	188.5	207.5	MN/m ²
	op min.	130.5	154.0	MN/m ²
	op moyen	161.5	178.5	MM/m ²
c) apres congelation	op max.	165.5	211.0	MN/m ²
	op min.	123.0	147.0	MN/m ²
	op moyen	143.5	172.0	MM/m ²
2. Resistance a l'usure par meulage selon Böhme (mode operatoire 22-LRS-13)	As	17.0	16.6	cm
3. Resistance au choc par la methode treton (JUS B.B8.019), passage au tamis 2 mm		17.3	18.0	% en masse
4. Absorption d' eau (mode operatoire 22-LRS-15/87)	U	0.25	0.20	% en masse
5. Resistance au gel (mode operatoire 22-LRS-10/87)		materiau ingelif		
6. Masse volumique (mode operatoire 22-LRS-1/87)	γ _m	2683	2670	kg/m ³
7. Densite des particules solides (mode operatoire 22-LRT-2/84)	γ _s	2700	2706	kg/m ³
8. Degre de densite	γ _m /γ _s	0.994	0.987	-
9. Porosite (mode operatoire 22-LRS-1/87)	(1-γ _m /γ _s).100	0.6	1.3	% vol.

*/JUS - norme Yougoslave

Résumé

Ce travail de recherche porte sur l'étude de la distribution des températures et des contraintes thermiques dans un barrage en construction. Le barrage choisi est celui de Brezina qui est un barrage voûte en béton situé dans la région d'El-Bayadh. La simulation est effectuée en utilisant le programme en élément finis ANSYS, l'étude se fait en deux dimensions sous l'excitation du poids propre du barrage et de la chaleur d'hydratation du béton.

Certains facteurs intervenants lors de la construction du barrage sont pris en compte dans l'étude tels-que : les propriétés des matériaux utilisés, le programme de bétonnage, le développement de la chaleur d'hydratation..... Il en est de même pour certains paramètres climatiques tels-que : la température ambiante de l'air et la vitesse de vent qui interviennent dans les échanges convectifs.

L'objectif de l'étude vise la détermination et l'optimisation des systèmes de refroidissement artificiel du béton et le calcul des contraintes d'origines thermiques afin de déterminer le nombre de joints et leurs espacements. L'analyse permettra un choix adéquat des matériaux de construction et de fixer la température initiale du gâché pour éviter ou au moins minimiser le risque de fissuration précoce. La température maximale atteinte au centre du barrage est de 67°C .

L'effet important de la température de l'air a été constaté à proximité des parements amont et aval du barrage, avec des températures de béton réagissant fortement aux conditions environnantes. Les contraintes thermiques dans le béton engendrées par le dégagement de chaleur du béton lors de sa prise ont été calculées. La valeur maximale de la contrainte de traction relevée à proximité des parements varie de 1.1 MPa à 4.36 MPa.

Mots clés: Analyse thermique, température, chaleur d'hydratation, contrainte thermique, méthode des éléments finis, barrage.