

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Hydraulique et du G. civil

Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الري والهندسة المدنية
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences

Option: SCIENCES HYDRAULIQUES

**L'UTILISATION DU BETON BITUMINEUX DANS LES
TRAVAUX HYDRAULIQUES : ETANCHEITE DES
BARRAGES EN REMLAI**

Présentée par :

CHEBBAH Lynda

Soutenue publiquement le : 29/11/2020

Devant le jury composé de :

Dr. Debabeche Mahmoud
Dr. Djemili Lakhdar
Dr. Amarchi Houcine
Dr. Houichi Larbi
Dr. Bedjaoui Ali
Dr. Mimeche Leila

Professeur
Professeur
Professeur
Professeur
MCA
MCA

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

Université de Biskra
Université d'Annaba
Université d'Annaba
Université de Batna
Université de Biskra
Université de Biskra

Résumé

L'utilisation des masques en béton bitumineux dans l'étanchéité des barrages en remblais met en évidence deux faits : le premier est que le béton bitumineux est un matériau étanche et utilisé depuis des millénaires, et le second, que ce matériau possède de très bonnes propriétés de longévité, et aussi il a la capacité de prendre les mouvements des fondations sans aucune perte de son étanchéité, en raison de sa flexibilité.

Tout au long de sa vie, le masque en béton bitumineux est exposé à des conditions climatiques différentes et variées, le plus souvent sans aucune protection. C'est à la température, dans le comportement du masque, que revient le rôle prépondérant. En été, les différentes couches du masque absorbent de larges quantités de radiations solaires pendant la journée, ce qui le réchauffe, diminue leur rigidité et entraîne l'augmentation des dommages par déformation permanente. En hiver, les variations cycliques des températures entre les valeurs négatives et positives créent des cycles de gel-dégel, ce qui augmentera les dommages par fatigue thermique, à cet effet l'étude du comportement des masques en béton bitumineux rend le suivi du régime thermique à l'intérieur du masque de première importance.

Le présent travail porte sur l'étude du transfert thermique transitoire dans les masques amont en béton bitumineux exposés à des fluctuations des températures journalières. L'objectif est de réaliser un modèle numérique permettant de simuler les différents type de transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement en utilisant le logiciel FLUENT, afin de pouvoir tester des solutions pratiques qui ont pour but de limiter les effets négatifs des rayonnement solaires et de diminuer les cycles de gel-dégel. Après une étude de validation de la procédure de simulation pour les deux sites étudiés barrage de Ghrib (Ain Defla) et barrage de Bouhnifia (Mascara), en utilisant les mesures expérimentales disponibles, le travail a été poursuivi par la simulation de différentes solutions pratiques telles que la couche en béton armé, la couche convective en béton poreux, et la surface réfléchissante. Pour chacune des solutions pratiques simulées, il existe une façon optimale de les employer, et que chacune possède à la fois des avantages et des inconvénients. En confrontant les solutions pratiques entre elles, différents points majeurs en ressortent ; La solution de la surface réfléchissante est la moins performante des trois, mais la plus simple à mettre en œuvre, car elle ne nécessite pas de gros œuvres, cependant, son effet est positif seulement dans la période d'été ou elle présente le refroidissement maximale par rapport aux autres solutions, par contre en hiver elle allonge les cycles de gel-dégel. Concernant les deux autres solutions pratiques, la couche convective en béton poreux permet d'obtenir un taux plus faible de cycles gel-dégel a cause de l'influence de son épaisseur sur le réchauffement des différentes couches du masque en hiver et leurs refroidissement en été, mais le béton armé permet d'obtenir un maintien bien plus fort des cycles de gel-dégel en hiver, mais elle agit faiblement sur le refroidissement du béton bitumineux en été. Il est donc préférable d'utiliser une couche convective en béton poreux comme une solution optimale en recouvrant toute la surface du masque pour le protégé durant toute l'année.

Mot clés : *Masque en béton bitumineux, Transfert de chaleur, conduction, convection, rayonnement, Fluent, béton armé, béton poreux, surface réfléchissante.*

Abstract

The use of asphaltic concrete facings in the waterproofing of embankment dams highlights two facts: the first is that asphaltic concrete is a waterproof material that has been used for thousands of years, and the second is that this material has very good longevity properties, and also has the ability to take the movements of the foundations without any loss of its waterproofing, due to its flexibility.

Throughout its life, the asphaltic concrete facing is exposed to different and varied climatic conditions, most often without any protection. Temperature plays the most important role in the behaviour of the asphaltic concrete facing. In summer, the different layers of the asphaltic concrete facing absorb large amounts of solar radiations during the day, which warms it up, reduces its rigidity and leads to increased damage through permanent deformation. In winter, the cyclic variations in temperature between negative and positive values create freeze-thaw cycles, which will increase thermal fatigue damage. To this end, the study of the behaviour of asphaltic concrete facings makes the monitoring of the thermal regime inside the asphaltic concrete facing of primary importance.

The present work focuses on the study of transient heat transfer in asphalt concrete facing exposed to daily temperature fluctuations. The objective is to develop a numerical model to simulate the different types of heat transfer by conduction, convection and radiation using the FLUENT software, in order to test practical solutions that aim to limit the negative effects of solar radiation and reduce freeze-thaw cycles. After a validation study of the simulation procedure for the two studied sites Ghrib dam (Ain Defla) and Bouhnifia dam (Mascara), using the available experimental measurements, the work was continued by simulating different practical solutions such as the reinforced concrete layer, the porous concrete convective layer, and the reflective surface. For each of the simulated practical solutions, there is an optimal way to use them, and each has both advantages and disadvantages. The reflective surface solution is the least efficient of the three, but the simplest to implement, as it does not require a major works. However, its effect is positive only in the summer period, when it has the maximum cooling effect compared to the other solutions, whereas in winter it lengthens the freeze-thaw cycles. Concerning the other two practical solutions, the convective layer made of porous concrete allows a lower rate of freeze-thaw cycles due to the influence of its thickness on the heating of the different layers of the asphaltic concrete facing in winter and their cooling in summer, but reinforced concrete allows a much stronger maintenance of freeze-thaw cycles in winter, but it has a weak effect on the cooling of the asphalt concrete in summer. It is therefore preferable to use a convective layer of porous concrete as an optimal solution, covering the entire surface of the asphaltic concrete facing to protect it all year round.

Keywords: Asphaltic concrete facing, Heat transfer, conduction, convection, radiation, Fluent, reinforced concrete, porous concrete, reflective surface.

ملخص

تبرز حقيقة استخدام الأقمعة الخرسانية الاسفلتية في العزل المائي للسدود الركامية في حالتين: الأولى أن الخرسانة الاسفلتية هي مادة مضادة للماء و استخدمت منذ آلاف السنين ، والثانية ، أن لهذه المواد خصائص جيدة من حيث طول العمر ، وكذلك لديها القدرة على مواكبة حركات الأساسات دون أي خسارة في مقاومتها للماء ، و ذلك بسبب مرونتها .

يتعرض القناع الخرساني الاسفلتي طوال مدة استخدامه لظروف مناخية مختلفة ومتنوعة، و هذا دون أي حماية في معظم الأحيان. يعود الدور السائد في سلوك القناع لدرجة الحرارة. خلال فصل الصيف ، تمتص الطبقات المختلفة من القناع كميات كبيرة من الإشعاع الشمسي أثناء النهار ، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته ، التقليل من صلابته و زيادة الضرر بسبب التشوه الدائم. و في فصل الشتاء ، تؤدي الاختلافات الدورية في درجات الحرارة بين القيم السلبية والإيجابية إلى إنشاء دورات ذوبان وتجميد الجليد ، مما يزيد من أضرار التعب الحراري ، ولهذا الغرض فإن دراسة السلوك الحراري للأقمعة الخرسانية الاسفلتية و مراقبة نظامها الحراري تجعل هذه الدراسة ذات أهمية أساسية.

يتناول هذا العمل دراسة النقل الحراري العابر في الاقنعة الامامية الخرسانية الاسفلتية التي تتعرض لتقلبات درجات الحرارة اليومية. الهدف هو إنشاء نموذج رقمي يسمح بمحاكاة أنواع مختلفة من نقل الحرارة عن طريق التوصيل والحمل الحراري والإشعاع باستخدام برنامج FLUENT، من أجل أن تكون قادرة على اختبار الحمول العملية التي تهدف إلى الحد من الآثار السلبية للإشعاع الشمسي. وتقليل دورات ذوبان وتجميد الجليد. بعد دراسة للتحقق من صحة إجراء المحاكاة للموقعين اللذين تمت دراستهما: سد غريب (عين الدقل) وسد بو حنيفة (معسكر) ، باستخدام القياسات التجريبية المتاحة ، اتبع العمل بمحاكاة لحلول عملية مختلفة مثل طبقة الخرسانة المسلحة ، طبقة الخرسانة المسامية ، والسطح العاكس. لكل حل من الحلول العملية طريقة مثالية لاستخدامها ، ولكل منها مزايا و عيوب. من خلال مواجهة الحلول العملية ببعضها البعض ، تظهر العديد من النقاط الرئيسية: حل السطح العاكس هو الأقل كفاءة من الثلاثة ، ولكنه أبسطهم من حيث التطبيق، لأنه لا يحتاج في انجازه إلى أعمال كبرى ، ومع ذلك ، فإن تأثيره إيجابي فقط في فترة الصيف حيث يوفر أقصى تبريد بالمقارنة مع الحلول الأخرى ، إلا أنه في فصل الشتاء يطيل دورات ذوبان وتجميد الجليد. في ما يتعلق بالحلين العمليين الآخرين، فإن طبقة الحمل الحراري من الخرسانة المسامية تجعل من الممكن الحصول على معدل أقل من دورات ذوبان وتجميد الجليد بسبب تأثير سمكها على تسخين الطبقات المختلفة للقناع في الشتاء وتبريدها في الصيف. ولكن الخرسانة المسلحة تجعل من الممكن الحصول على صيانة أقوى لدورات ذوبان وتجميد الجليد في فصل الشتاء ، لكن تأثيرها ضعيف على تبريد الخرسانة الاسفلتية في الصيف. لذلك من الأفضل استخدام طبقة من الخرسانة المسامية كحل مثالي من خلال تغطية سطح القناع بالكامل للحماية طوال العام.

كلمات البحث: الأقمعة الخرسانية الاسفلتية ، نقل الحرارة ، التوصيل ، الحمل الحراري ، الإشعاع ، Fluent ، الخرسانة المسلحة ، الخرسانة المسامية ، السطح العاكس.

Remercîment

Il demeurerait inadéquat après avoir achevé cette thèse sans rendre grâce au Bon Dieu, le tout miséricordieux, pour m'avoir accordé la santé et la présence d'esprit nécessaires à la réalisation de ma thèse de doctorat en-science. Il n'y a aucun doute dans mon âme et mon esprit qu'il est l'unique responsable de tout achèvement.

Ce travail a pu être réalisé et mené à terme grâce à l'implication, aux conseils et au soutien de plusieurs personnes.

D'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse Mr Djemili Lakhdar, professeur à l'université d'Annaba, pour son soutien, technique et moral. Je le remercie de m'avoir fait confiance et de m'avoir guidé par ses conseils pendant toute la période de la thèse, sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pu être complétée.

J'adresse mes remerciements à Mr Bouziane Mohammed Tawfik professeur à l'université de Biskra, pour tout son aide technique et administratif.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse.

Je remercie, Mr Debabeche Mahmoud, professeur au département hydraulique de l'université de Biskra, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Mes vives gratitudes vont aussi à Mr Houichi Larbi, professeur au département Hydraulique de l'université de Batna 2, Mr Amarchi Hocine, professeur au département hydraulique de l'université d'Annaba, Mr Bedjaoui Ali, maitre de conférences au département hydraulique de l'université de Biskra, et Mme Mimeche Leila, maitre de conférences au département hydraulique de l'université de Biskra qui ont bien voulu examiner ce travail.

Par ailleurs, je tiens à remercier Dr Kabour Abdesselem pour avoir grandement enrichi l'écriture de cette thèse et aussi pour ses commentaires hautement techniques et scientifiques.

Je tiens également à remercier le Dr Bensouici Moumtez et Mr Hemidene Abbas, enseignants à l'université de Mila, pour leurs nombreux conseils lors de la réalisation de l'étude de transfert de chaleur. Je les remercie aussi pour toute l'aide sur la compréhension et la manipulation du logiciel Fluent.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres du département sciences et techniques de l'université de Mila.

Merci à tous mes enseignants depuis l'école primaire jusqu'à ce jour, sans eux je ne serais peut être pas arrivée a ce niveau de formation, aujourd'hui.

Je voudrais remercier tous mes amis pour leur appui et leur encouragement.

Je dédie ce travail à :

Ma fille adorée *Khadidja Darine*

Evidemment, ma mère, mes sœurs et mes frères et leurs petites familles, et ma belle famille, car leur présence et leurs encouragements sont pour moi les piliers fondateurs de ce que je fais et de ce que je suis.

A la mémoire de mon père.

A vous tous et à ceux que j'aurais très injustement oubliés...merci.

cheblyn@yahoo.fr

Tables des matières

	Nomenclature	
	Liste des figures	
	Liste des tableaux	
	Introduction générale	1
1	Problématique	2
2	Revue de la littérature	3
3	Objectifs	4
4	Méthodologie	4
5	Organisation de la thèse	5

PARTIE I

Chapitre I : Utilisation du bitume dans les travaux hydrauliques

I.1	Le bitume dans l'antiquité	6
I.2	Un matériau toujours d'actualité	6
I.3	Origine	7
I.4	Béton bitumineux	8
I.4.1	Composition	8
I.4.1.1	Bitume	8
I.4.1.2	Agrégats	8
I.4.2	Enrochement	9
I.5	Essais de labo sur les mélanges bitumineux	10
I.5.1	Premier essai : La Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)	10
I.5.2	Deuxième essai : L'essai de tenue à l'eau DURIEZ	11
I.5.3	Troisième essai : L'essai d'orniérage	11
I.5.4	Quatrième essai : Essais de module	12
I.5.5	Cinquième essai : Essai de Fatigue	13
I.5.6	Essai de perméabilité	14
I.5.7	Température Bille Anneau (TBA)	15
I.5.8	Point de fragilité FRAASS	15
I.6	Types d'application	16
I.6.1	Application dans les supports (Fondations)	16
I.6.2	Application dans les revêtements	16
I.6.3	Applications routières	17
I.6.4	Applications industrielles	17
I.7	Applications dans le domaine hydraulique	18
I.7.1	Domaine des barrages	19
I.7.1.1	Enrobés étanches pour masques amont de barrage	19
I.7.2	Enrobés étanches pour écran interne de barrage	19
I.7.3	Enrobés étanches pour revêtements de canaux	20
I.7.4	Géomembranes bitumineuses	20
I.7.5	Digues et berges des rivières	21
I.7.6	Canaux de navigation	22
I.7.7	Réservoirs	23
I.7.8	Canaux d'irrigation :	24
I.7.9	Brise-lame, épis et travaux portuaire	25
	Conclusion	26

Chapitre II : L'étanchéité dans les barrages en remblais

	Introduction	27
II.1	Choix du type de l'organe d'étanchéité	27
II.2	Différents types d'organes d'étanchéité des digues en terre	27
II.2.1	Noyaux	27
II.2.1.1	Noyau en argile compacté	27
II.2.1.2	Noyau en béton bitumineux	28
II.2.2	Paroi moulée	29
II.2.3	Masque amont	30
II.2.3.1	Les barrages à masques amont	30
II.2.3.2	Les différents types des masques amont	32
II.2.3.3	Le Parafouille	37
II.2.4	Les géomenbranes	38
	Conclusion	39

Chapitre III : Les barrages à masques en béton bitumineux

	Introduction	40
III.1	Historique	40
III.2	Evolution des barrages à masque en béton bitumineux dans le monde	41
III.3	Types des revêtements des masques en béton bitumineux	46
III.4	Les grands barrages à masque en béton bitumineux	48
III.5	Expérience algérienne	50
III.5.1	Barrage de Bouhanifia (wilaya de Mascara)	51
III.5.1.1	Les principales caractéristiques du barrage	51
III.5.1.2	Structure du masque étanche	51
III.5.2	Barrage du Sarno (wilaya de Sidi bel abbés)	52
III.5.2.1	Les principales caractéristiques du barrage	53
III.5.2.2	Le masque étanche	53
III.5.3	Barrages d'Ighil Emda (wilaya de Bejaïa)	53
III.5.3.1	Caractéristiques techniques du barrage	54
III.5.4	Barrage de Ghrib (wilaya de Ain Defla)	54
III.5.4.1	Caractéristiques techniques du barrage	55
III.5.4.2	Le masque étanche	55
III.6	Avantage des masques en béton bitumineux	55
III.7	Construction	58
III.7.1	Machines	58
III.7.2	Phases de fonctionnement standard	59
III.7.3	Tests en cours	63
III.8	Avenir des masques en béton bitumineux	66
	Conclusion	66

Partie II

Chapitre I : Transfert de chaleur

	Introduction	67
I.1	Bilan énergétique du masque en béton bitumineux	67

I.2	Modes de transfert de chaleur	69
I.2.1	Transfert de chaleur par rayonnement	70
I.2.1.1	Transfert de chaleur par radiation solaire	71
I.2.1.1	Les différentes formes de rayonnement solaire	72
I.2.1.2	Transfert de chaleur par radiation thermique	80
I.2.2	Transfert de chaleur par convection	80
I.2.2.1	Evaluation du coefficient d'échange convectif	81
I.2.3	Transfert de chaleur par conduction	84
I.2.3.1	Evolution des températures dans la structure	88
I.2.3.2	Propriétés thermiques et physiques du masque en béton bitumineux	88
	Conclusion	90

Chapitre II :
Modélisation du transfert de chaleur dans les masques en béton bitumineux.

	Introduction	91
II.1	Objet de la modélisation	91
II.2	Présentation des sites d'étude	91
II.2.1	Le barrage de Ghrib	91
II.2.2	Le barrage de Bouhnifia	92
II.2.3	Caractéristiques climatiques	94
II.2.3.1	Température de l'air	94
II.2.3.2	Vent	95
II.2.3.3	Humidité relative	95
II.3	Modélisation numérique	96
II.3.1	Présentation du logiciel FLUENT	96
II.3.2	Implantation des UDF (user defined fonctions)	97
II.3.3	Dispositif expérimental	99
II.3.4	Modèle mathématique	99
II.3.4.1	Modèle géométrique	99
II.3.5	Modèle physique	100
II.3.6	Définition du modèle numérique utilisé	100
II.3.6.1	Méthode des volumes finis	100
II.3.7	Définition des conditions aux limites et initiale	101
II.3.8	Application sur le barrage de Bouhnifia	101
II.3.8.1	Modèle mathématique	102
II.3.8.1.1	Modèle géométrique	102
	Conclusion	102

Chapitre III : Validation du modèle

	Introduction	103
III.1	Réalisation du modèle numérique sous FLUENT	103
III.1.1	Paramétrage	103
III.1.1.1	Maillage et pas du temps	104
III.1.2	Détermination des conditions aux limites	104
III.1.2.1	Étude des données expérimentales	104
III.1.2.1.1	Le premier site : barrage de Ghrib	105
III.1.2.1.1.1	Détermination des fonctions de la variation de la température	105
III.1.2.1.1.2	Validation des résultats numérique	106

III.1.2.1.1.3	Variation de températures au sein du masque	108
III.1.2.2.2	Le deuxième site : barrage de Bouhnifia	110
III.1.2.1.2.1	Détermination des fonctions de la variation de la température	110
III.1.2.2.2.2	Détermination des températures au sein du masque	111
	Conclusion	114

Chapitre IV : Optimisation de l'effet de la protection thermique sur les différents masques par des solutions pratiques

	Introduction	115
IV.1	Barrage Ghrib	115
IV.1.1	Optimisation de l'effet de la couche convective en béton poreux	115
IV.1.1.1	Définition du modèle	116
IV.1.1.2	Positionnement de la couche convective	117
IV.1.1.3	Variation temporelle	118
IV.1.1.4	Variation spatiale	119
IV.1.2	Optimisation de l'absorptivité de la surface réfléchissante	120
IV.1.2.1	Définition du modèle	121
IV.1.2.2	Variation des Flux radiatif solaire	122
IV.1.2.3	Variation temporelle de la température	123
IV.1.2.4	Variation spatiale de la température	125
IV.1.3	Comparaison entre les deux solutions	126
IV.1.3.1	Thermocouple TH 1cm	126
IV.1.3.2	Thermocouple TH 6 cm	127
IV.1.3.3	Thermocouple TH 10cm	128
IV.2	Barrage de Bouhnifia	128
IV.2.1	Optimisation de l'effet de la couche existante en béton armé de 12 cm	128
IV.1.2.1	Variation temporelle	129
IV.1.2.2	Variation spatiale	130
IV.2.2	Optimisation de l'effet de la couche convective de 12 cm en béton poreux	132
IV.2.2.1	Variation temporelle	132
IV.2.2.2	Variation spatiale	133
IV.2.3	Optimisation de l'absorptivité d'une couche réfléchissante	134
IV.2.3.1	Définition du modèle	134
IV.2.3.2	Variation des rayonnements solaires à la surface du masque brut, barrage de Bouhnifia	135
IV.2.3.1	Variation temporelle	136
IV.2.3.2	Variation spatiale	139
IV.1.3	Comparaison entre les solutions	141
	Conclusion	145
	Conclusion générale et recommandations	146
	Références bibliographiques	149
	Productions scientifiques	154

Liste des figures

Partie I

Fig. I.1 : Essais de laboratoire – Étude de formulation	10
Fig. I.2 : La presse de cisaillement giratoire	10
Fig. I.3 : Essai de tenue à l'eau DURIEZ	11
Fig. I.4 : Appareil de mesure de la profondeur d'ornière	12
Fig. I.5 : Mesure du module des enrobés bitumineux en traction directe : essai MAER	13
Fig. I.6 : Appareil de mesure de la fatigue	13
Fig. I.7 : Graphe de l'essai de la fatigue	14
Fig. I.8 : Essai de pénétrabilité	14
Fig. I.9 : Essai de température bille anneau (TBA)	15
Fig. I.10 : Essai de point de fragilité	15
Fig. I.11 : Travaux routier	17
Fig. I.12 : Masque en béton bitumineux du barrage Chabrouh (Liban)	19
Fig. I.13 : Noyau en béton bitumineux du barrage de Nemiscau, Canada ,1982	20
Fig. I.14 : Protection d'un bassin par géomembrane bitumineuse	21
Fig. I.15 : Coupe longitudinale d'une berge protégée par les enrochements bitumineux	21
Fig. I.16 : Protection des berges par le béton bitumineux	22
Fig. I.17 : Canal de navigation de Milano, Italie (1966-1968)	22
Fig. I.18 : Section et revêtement types d'un réservoir	23
Fig. I.19 : Réservoir Sarconi en Italie, 1984	23
Fig. I.20 : Etanchéité du canal d'irrigation de Caldwell (USA) par les enrobés bitumineuses	24
Fig. I.21 : Coupe du canal d'irrigation de Beni Mtir, Maroc	25
Fig. I.22 : Coupe transversale d'un épi à la cote de Shevieningen (Defland en Hollande 1938)	25
Fig. I.23 : Coupe du brise-lames nord, Hook Van, Holand	26
Fig. II.1 : Etanchéité par noyau en argile compacté	28
Fig. II.2 : Barrage à noyau de béton bitumineux	29
Fig. II.3 : Paroi moulée	29
Fig. II.4 : Masque en béton de ciment	33
Fig. II.5 : Masque amont en béton bitumineux	34
Fig. II.6 : Masque en membrane souple	36
Fig. II.7 : Raccordement d'un masque étanche au parafouille	37
Fig. II.8 : Parafouille avec galerie de visite	38
Fig. II.9 : Mise en place d'une géomembrane bitumeuse	39
Fig. III.1 : Coupe transversale du barrage Mulungushi (Zambie1) après réparation	41
Fig. III.2 : Allocation de barrages a masque amont en béton bitumineux dans le monde	42
Fig. III.3 : Défaillance des masques en béton bitumineux avant la période de reconstruction	45
Fig. III.4 : Défaillance des masques amont en béton bitumineux sans données de reconstruction	46
Fig. III.5 : Barrage d'Oued El Guattara. Lybie, 2003	46
Fig. III.6 : Revêtement Type A du barrage de Genkel (Allemagne)	47
Fig. III.7 : Revêtement Type B du barrage en enrochements de Huesna (Espagne)	48
Fig. III.8 : Barrage de Genkel. Section typique avec détails du masque	49
Fig. III.9 : Détails de la galerie de drainage au pied amont du barrage de Genkel (Allemagne)	49
Fig. III.10 : Situation des barrages à masques amont en béton bitumineux en Algérie	50
Fig. III.11 : Le barrage de Bouhanifia, Mascara	51

Fig. III.12 : Coupe du masque en béton bitumineux de barrage de Bouhanifia	52
Fig. III.13 : Barrage du Sarno, Sidi Bel Abes	52
Fig. III.14 : Coupe du masque en béton bitumineux du barrage Sarno	53
Fig. III.15 : Barrage d'Ighil Emda, Bejaia	54
Fig. III.16 : Barrage de Ghrib, Ain Defla	54
Fig. III.17 : Coupe du masque en béton bitumineux du barrage Ghrib	55
Fig. III.18 : Vue globale des machines opérant lors du revêtement	58
Fig. III.19 : Le treuil principal, le dumper et le rouleau	59
Fig. III.20 : laminage préliminaire de la couche de base	60
Fig. III.21 : La pulvérisation de l'émulsion	60
Fig. III.22 : Dumper alimentant le finisseur	61
Fig. III.23 : Compactage primaire par un rouleau vibrant à 2,5 tonnes	62
Fig. III.24 : Chauffage et re-compactage d'une couche	62
Fig. III.25 : Application de géo-grille et compactage en suite	63
Fig. III.26 : Fraisage du revêtement endommagé	65

Partie II

Fig. I.1 : Les composantes solaires autour d'un masque en béton bitumineux.	68
Fig. I.2 : Schéma explicatif de l'équation du bilan énergétique	69
Fig. I.4 : Transfert de chaleur par rayonnement	71
Fig. I.5 : Coordonnées géographiques	74
Fig. I.6 : Coordonnées horaires	74
Fig. I.7 : Coordonnées horizontales	75
Fig. I.8 : Evolution de la température aux abords de la paroi du masque	81
Fig. I.9 : Schéma illustrant la progression d'un pas de temps avec l'algorithme de Crank–Nicholson.	86
Fig. I.10 : Schéma numérique de Crank – Nicolson	86
Fig. I.11 : Modélisation de la structure	88
Fig. II.1 : Situation géographique des sites d'études	93
Fig. II.2 : Variation de température de l'air de la station de Ghriiss-Mascara, série1987/2012	95
Fig. II.3 : Variation de la température de l'air de la station de Khemis Meliana, série1975/2007	95
Fig. II.4 : Variation de l'humidité relative de la station de Ghriiss-Mascara, série1987/2012	96
Fig. II.5 : Variation de l'humidité relative de la station de Khemis Meliana, série1975/2007	96
Fig. II.6 : Schéma du processus de modélisation numérique	98
Fig. II.7 : Modèle géométrique du masque en béton bitumineux du barrage Ghrib	99
Fig. II.8 : Modèle géométrique du masque en béton bitumineux du barrage Bouhnifia	102
Fig. III.1 : Exemple de maillage réalisé sous Gambit 2.2.30	103
Fig. III.2 : Variation des températures expérimentales mesurée à la surface du masque brut du barrage Ghrib	105
Fig. III.3 : Interface de « Analysis fitting » sur OriginPro.2018	106
Fig. III.4 : Courbes de la température mesurée et calculée par OriginPro.2018, à la surface du masque brut du barrage Ghrib	106
Fig. III.5 : Corrélacion entre les températures expérimentales et simulées à TH 1 cm du barrage de Ghrib	107
Fig. III.6 : Corrélacion entre les températures expérimentale et calculées à TH 6 cm du barrage de Ghrib	107

Fig. III.7 : Corrélation entre les températures expérimentale et calculées à TH 10 cm du barrage de Ghrib	108
Fig. III.8 : Profil des températures aux trois thermocouples (masque brut) du barrage de Ghrib	108
Fig. III.9 : Evolution de la température au sein du masque brut, du barrage Ghrib	109
Fig. III.10 : Simulation de la variation de la température au sein du masque brut à 12 :15 PM, barrage de Ghrib	109
Fig. III.11 : Corrélation entre les températures expérimentale et calculées à la surface du masque de barrage de Bouhnifia, période hivernale	110
Fig. III.12 : Corrélation entre les températures expérimentales et calculées à la surface du masque de barrage de Bouhnifia, période estivale	110
Fig. III.13 : Variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia, période hivernale	111
Fig. III.14 : Variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia, période estivale	112
Fig. III.15 : Evolution de la température au sein du masque brut, Barrage de Bouhnifia, période hivernale	113
Fig. III.16 : Simulation de la variation de la température au sein du masque brut du barrage de Bouhnifia à 12h, période hivernale	113
Fig. III. 17 Evolution de la température au sein du masque brut, Barrage de Bouhnifia, période estivale	113
Fig. III. 18 : Simulation de la variation de la température au sein du masque brut du barrage de Bouhnifia à 12 h, période estivale	114
Fig. IV.1 : Géométrie du dispositif d'optimisation d'une couche convective en béton poreux, barrage de Ghrib	118
Fig. IV.2 : Variation des températures des trois thermocouples protégés par une couche en béton poreux de 10 cm, barrage Ghrib	119
Fig. IV.3 : Evolution de la température au sein du masque protégé par une couche de 10 cm en béton poreux, barrage Ghrib	120
Fig. IV.4 : Simulation de la variation de la température au sein du masque protégé par une couche de 10cm en béton poreux à 12:15 PM, barrage de Ghrib	120
Fig. IV.5 : Evolution du flux radiatif solaire en fonction du temps à la surface du masque en béton bitumineux brut du barrage de Ghrib	122
Fig. IV.6 : Géométrie du dispositif d'optimisation d'une surface réfléchissante, barrage de Ghrib	123
Fig. IV.7 : Variation des températures du TH 1 cm protégé par une surface réfléchissante(SR) et brut, barrage de Ghrib	124
Fig. IV.8: Variation des températures du TH 6 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Ghrib	124
Fig. IV.9 : Variation des températures du TH 10 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Ghrib	124
Fig. IV.10 : Evolution de la température au sein de la structure (masque protégé par une surface réfléchissante), barrage de Ghrib	125
Fig. IV.11 : Simulation de la variation de la température au sein de la structure (masque protégé par une surface réfléchissante) à 12 :15 PM, barrage de Ghrib	125
Fig. IV.12: Différence de température entre les TH (1 cm) sans protection et protégé par BP et SR, barrage de Ghrib	127
Fig. IV.13 : Différence de température entre les TH (6 cm) sans protection et protéger par BP et SR, barrage de Ghrib	127

Fig. IV.14 : Différence de température entre les TH (10 cm) sans protection et protégé par BP et SR, barrage de Ghrib	128
Fig. IV.15 : Variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia, protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période hivernale	129
Fig. IV.16 : Variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia, protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période estivale	130
Fig. IV. 17 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période hivernale	130
Fig. IV. 18: Simulation de la variation de la température au sein du masque de barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période hivernale à 14 PM	131
Fig. IV. 19: Evolution de la température au sein du masque de barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période estivale.	131
Fig. IV. 20: Simulation de la variation de la température au sein du masque de barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période estivale à 14 PM	131
Fig. IV.21 : Variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia, protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période hivernale.	132
Fig. IV.22 : Variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia, protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période estivale	132
Fig. IV. 23 Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période hivernale	133
Fig. IV. 24 : Simulation de la variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période hivernale à 14 PM	133
Fig. IV. 25 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période estivale	134
Fig. IV. 26 : Simulation de la variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période estivale à 14 PM	134
Fig. IV.27 : Variation du flux radiatif solaire sur la surface du masque en béton bitumineux brut du barrage de Bouhnifia	135
Fig. IV.28 : Variation des températures du TH 1 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période hivernale.	136
Fig. IV.29 : Variation des températures du TH 1 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période estivale	136
Fig. IV.30 : Variation des températures du TH 6 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période hivernale	137
Fig. IV.31 : Variation des températures du TH 6 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période estivale	137
Fig. IV.32: Variation des températures du TH 10 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période hivernale	138
Fig. IV.33: Variation des températures du TH 10 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période estivale	138
Fig. IV.34 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une surface réfléchissante, période hivernale	139
Fig. IV.35 : Simulation de la variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une surface réfléchissante, période hivernale à 12 PM	140
Fig. IV.36 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une surface réfléchissante, période estivale	140
Fig. IV.37 : Simulation de la variation de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une surface réfléchissante, période estivale à 12 PM	140
Fig. IV.38 : Différence de la température de la surface du masque protégé par le béton armé et par béton poreux en hiver, barrage Bouhnifia.	142

Fig. IV.39 : Différence de température à 6 cm de la surface du masque protégé par le béton armé et par le béton poreux en hiver, barrage Bouhnifia	142
Fig. IV.40: Différence de la température à 10 cm de la surface du masque protégé par le béton armé et par le béton poreux en hiver, barrage Bouhnifia	142
Fig. IV.41 : Différence de la température de la surface du masque protégé par le béton armé et par le béton poreux en été, barrage Bouhnifia	143
Fig. IV.42 : Différence de la température à 6 cm de la surface du masque protégé par le béton armé et le par béton poreux en été, barrage Bouhnifia	143
Fig. IV.43 : Différence de la température à 10 cm de la surface du masque protégé par le béton armé et par le béton poreux en été, barrage Bouhnifia	144

Liste des tableaux

Partie I

Tableau I.1 – Composition du bitume	8
Tableau III.1: Performance des barrages en enrochement avec parement en béton bitumineux (ordre chronologique)	42
Tableau III.2: Essais durant la construction du masque en béton bitumineux	64

Partie II

Tableau I.1: Propriétés des matériaux utilisés	89
Tableau III.1 : Choix du maillage	105
Tableau III.2 : Choix du pas du temps	105
Tableau IV.1 : Propriétés thermiques des matériaux du milieu poreux.	118
Tableau IV.2 : Différence de température des thermocouples protégés par rapport à la température expérimentale sans protection (masque brut), barrage de Ghrib.	126
Tableau IV.3 : Différence de température des thermocouples protégés par rapport à la température expérimentale sans protection (masque brut), barrage de Bouhnifia	142

Nomenclature

Lettres grecs

γ	Longitude du lieu considéré	(°)
φ	Latitude	(°)
δ	Déclinaison du soleil	(°)
$\acute{\alpha}$	Angle d'inclinaison du masque avec l'horizontal	(°)
θ	Inclinaison du masque par rapport la verticale	(°)
λ	Conductivité thermique du matériau	(W/m °C)
λ_{air}	Conductivité thermique de l'air	(W/m °C)
ρ	Masse volumique du matériau	(kg/m ³)
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	(kg/m ³)
μ_{air}	Viscosité dynamique de l'air	(kg/m s)
ω	Pulsation	(rad/s)
ε_a	Émissivité de l'air pour un ciel couvert	/
ε_0	Émissivité de l'air pour un ciel clair	/
ε_s	Émissivité de la surface	/
α	Absorptivité de la surface	/
σ_d	Fraction d'insolation moyenne journalière	/
β_p	Coefficient de dilatation thermique	/

Nombre adimensionnel

Re	Nombre de Reynolds	/
Pr	Nombre de Prandlt	/
Gr	Nombre de Grashof	/
Pr	Nombre de Prandlt	/
Nu	Nombre de Nusselt	/

J	Numéro du jour de l'année à compté a partir du 1 janvier	/
ET	Equation du temps	(min)
TSV	Temps solaire vrai	(heure)
TU	Temps utile	(heure)
t_h	L'angle horaire du soleil	(°)
h_s	Hauteur angulaire du soleil	(°)
az	Azimut	(°)
I_H	Rayonnement direct reçu par une surface horizontale	(W/m ²)
D_H	Rayonnement diffus, reçu par une surface horizontale	(W/m ²)
G_H	Rayonnement global reçu par une surface horizontale	(W/m ²)
$I_{\dot{\alpha}}$	Rayonnement direct sur un plan incliné	(W/m ²)
$D_{\dot{\alpha}}$	Rayonnement solaire diffus sur le plan incliné	(W/m ²)
$G_{\dot{\alpha}}$	Rayonnement solaire globale sur le plan incliné	(W/m ²)
I_0	Constante solaire (1370)	(W/m ²)
A	Rayonnement réfléchi	(W/m ²)
G_w	Rayonnement atmosphérique	(W/m ²)
P_v	Pression partielle de vapeur d'eau	(mbar)
P_{vs}	Pression de vapeur saturante	(mbar)
H_R	Humidité relative	(%)
N	Fraction du ciel couvert	(%)
C_s	Constante de Stephan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8}$)	(W/m ² °C ⁴)
q_{rad}	Flux de chaleur transmis par radiation thermique	(W/m ²)
q_c	Flux de chaleur échangé par convection	(W/m ²)
q''_{soleil}	Flux radiatif solaire atteignant la surface	(W/m ²)
h_c	Coefficient d'échange convectif	(W/m ² °C)
U	Coefficient de transfert thermique entre l'extérieur et l'intérieur tiens compte de la résistance des matériaux	(W/m ² °C)
$C_{p\ air}$	Chaleur spécifique de l'air	(J/kg °C)
C_p	Chaleur spécifique du matériau	(J/kg °C)
T_{air}	Température de l'air	(°C)
T_s	Température à la surface	(°C)
T_{air}^*	Température de l'air modifiée prenant en compte le rayonnement solaire	(°C)

$T_{s\ moy}$	Température de surface moyenne	(°C)
ΔT_s	Amplitude	(°C)
z	Altitude	(m)
L	Longueur caractéristique du masque	(m)
x	Profondeur	(m)
t	Temps	(s)
V_{vent}	Vitesse du vent	(m/s)
a	Diffusivité thermique du matériau	(m ² /s)
T_L	Facteur de trouble de Linke	/
B	Coefficient de trouble atmosphérique	/
Rb	Facteur de transposition	/
r	Albédo	/

Introduction générale

La construction des barrages fait partie des activités les plus anciennes et les plus fondamentales du génie civil. Toutes les grandes civilisations ont été identifiées par la construction de réservoirs de stockage adaptés à leurs besoins, dans les plus brefs délais pour satisfaire les besoins d'irrigation découlant du développement et de l'expansion de l'agriculture organisée. Fonctionnant dans le cadre de contraintes imposées par les circonstances locales, notamment le climat et le terrain, la puissance économique des civilisations successives était liée à la maîtrise de l'ingénierie de l'eau. La prospérité, la santé et le progrès matériel sont de plus en plus liés à la capacité de stocker et de diriger l'eau.

Aujourd'hui, comme par le passé, les barrages en remblai continue d'être les plus grands barrages du monde, principalement parce que sa construction implique l'utilisation des matériaux obtenus à partir des travaux d'excavation requis, de la terre, des roches disponibles localement et les matériaux obtenus dans les zones d'emprunt situées à proximité du site du barrage. Selon la commission internationale des grands barrages (CIGB) sur la construction de grands barrages, parmi les quelque 1 000 barrages de grande hauteur construits ces deux dernières années, à peine 20 % sont des barrages en béton et les 80 % restants sont des barrages en remblais. Il est donc facile de reconnaître que la construction de barrages en remblai est une tendance récente dans le monde entier à la place des barrages en béton.

Le problème des infiltrations dans et sous les barrages en remblai est beaucoup plus dangereux que dans le cas d'un barrage en béton, car les remblais sont généralement construits avec des matériaux meubles et fondés sur des fondations mou qui est susceptible d'être affouillé et qui est également vulnérable au flux d'eau. Si elle n'est pas maîtrisée, l'infiltration peut éroder progressivement le sol du remblai ou de ses fondations, ce qui entraîne la rupture du barrage.

L'organe d'étanchéité d'un barrage en remblai assure la fonction première de l'ouvrage qui est de retenir de l'eau, Il existe plusieurs organes d'étanchéité tels que : noyau en terre, noyau en béton bitumineux, masque en béton bitumineux, masque en béton armé, écran interne en béton bitumineux et paroi moulée en béton ou en béton armé. Le choix de l'organe est peut être l'un des éléments les plus importants du processus de conception et de construction des barrages en remblais, car il peut influencer l'étude, le calcul et l'économie du barrage.

Le réchauffement climatique actuel est un problème qui préoccupe de plus en plus non seulement les scientifiques, mais également le grand public. Parmi les conséquences de ce phénomène climatique la dégradation des infrastructures comme les masques en béton bitumineux qui jouent un rôle très important dans l'étanchéité des ouvrages de stockage d'eau (barrages en remblais). On ne peut pas arrêter le réchauffement climatique progressif au cours des années à venir, mais cependant, on peut essayer de prévoir des protections thermique des

masques en béton bitumineux et ainsi adapter les structures existantes ou à construire pour limiter au mieux les effets de ce réchauffement.

1. Problématique :

La technologie d'étanchéité des réservoirs et des barrages par un masque amont en béton bitumineux a environ 70 ans et est très souvent utilisé en Europe (Alesani et Anchal en France, Eggberg et Genkel en Allemagne, Coosloo en Belgique...), ainsi que sur d'autres continents (Hochwurten à l'Australie, Konoyama Japon Asie et Ghrib, Bouhnia en Algérie Afrique...).

Les avantages importants d'un masque amont en béton bitumineux sont: la flexibilité de l'enrobé à base de bitume, l'accès facile pour vérifier et évaluer l'état du revêtement pour les travaux de réhabilitation locale et générale, si nécessaire.

Des contraintes principalement d'origine thermique peuvent se développer dans les masques en béton bitumineux soumis aux variations de température. Ces contraintes contribuent souvent à la détérioration de la rigidité et de la résistance structurale et peuvent engendrer des problèmes structuraux nécessitant souvent d'importants travaux de réhabilitation. En Algérie, les variations de température de l'air allant de +45°C pendant la période estivale à -4°C pendant la période hivernale, ont un impact important sur le comportement structural des masques en béton bitumineux. On assiste donc souvent à l'initiation et la propagation de fissures dû aux mouvements amont-aval selon les cycles thermiques.

L'action répétée des cycles gel/dégel pendant la période hivernale conduit à la détérioration du béton bitumineux exposé à la température ambiante et contribue par conséquent au processus de fissuration. Aussi, lorsque le béton bitumineux est fissuré, l'eau s'infiltré dans les fissures et les joints et peut engendrer des sous-pressions considérables.

Il est donc essentiel d'étudier et de bien comprendre le comportement thermique des masques en béton bitumineux. Des outils de modélisations numériques sont souvent utilisés pour effectuer ce type d'étude. Les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux ainsi que les conditions climatiques de l'environnement sont fournies comme données d'entrée. L'analyse thermique (transfert de chaleur) est ensuite réalisée à fin de déterminer les champs de température au sein des masques en béton bitumineux.

Les principaux paramètres responsables de l'endommagement thermique des masques en béton bitumineux sont :

- Les rayonnements solaires ;
- Les variations de température dans la masse du béton bitumineux.
- Les cycles de gel-dégel ;
- La géométrie du masque;
- La qualité du béton bitumineux et de la construction;
- Les caractéristiques physico-mécaniques du béton bitumineux.

2. Revue de la littérature :

Quelques études ont été élaborées dans ce sens afin d'étudier ces problèmes. Les résultats obtenus touchent surtout l'effet de la variation de la température ambiante sur les masques en béton bitumineux. Les résultats obtenus jusqu'à présent manquent de rigueur surtout en ce qui concerne l'évaluation des conditions aux limites exercées sur le masque.

La première étude menée à ce sujet a été réalisée en Allemagne en 1989 par Mohammed Chiblak dans le cadre d'une thèse en doctorat. L'enjeu de cette étude est d'expliquer le comportement du béton bitumineux sous l'effet des contraintes de cisaillement et leurs relations avec la déformation des masques en béton bitumineux. Parallèlement, son étude numérique a été vérifiée par des données de températures relevées expérimentalement sur des masques en béton bitumineux dans deux sites, Schombach en Allemagne et Draa et El-Ehsaa en Syrie. La suite des recherches de Chiblak en 2005 porte sur les propriétés des matériaux de construction, la conception des masques en béton bitumineux, le contrôle de la qualité et les conditions thermiques dans les zones semi-aride en Syrie.

Une seconde étude a été réalisée en Algérie, entre 2006 et 2012 par Djemili Lakhdar et Mohammed Chiblak, ils ont cherché d'établir une relation mathématique pour la température maximale sur la surface du masque en béton bitumineux utilisé dans la construction actuelle et future des barrages en terre dans la région semi-aride au Nord-Ouest d'Algérie (Barrage de Ghrib). En suite, les chercheurs ont étudié l'influence de certains facteurs (climatique et géométrique) à cette température. Les résultats obtenus ont montré que la température maximale à la surface du masque en béton bitumineux était proportionnelle à la température de l'air du site et dépend également du climat, de la géographie, du facteur de trouble de l'air et des facteurs géométriques. En 2012 Djemili et Chiblak, ont placé un échantillon confectionné sur un parement incliné 1/1 (pente du barrage Ghrib) et maintenu pendant plus de 48 heures dans une étuve à 70 °C. Cette expérience a permis de déterminer que l'échantillon a gardé sa forme initiale. Les résultats obtenus ont confirmé que le masque du barrage Ghrib peut résister à l'action de la température sans la nécessité de la protection thermique.

En 2013-2014, Bounaadja, Djemili et Chiblak, ont pratiqué les mêmes essais faites sur le masque du barrage Ghrib, cette fois-ci sur le masque du barrage de Bouhnifia, où ils ont trouvé que le masque en béton bitumineux du barrage de Bouhnifia résiste à une température de 70°C malgré l'absence de protection thermique.

La troisième étude est réalisée par Karl Adam et al (2016), qui ont étudié numériquement le flux thermique dans le béton bitumineux afin de déterminer la température dans le revêtement en béton bitumineux de la centrale hydroélectrique de Dlouhe Strane en République tchèque, le modèle numérique a été calé en utilisant les températures observées sur site. Deux scénarios représentatifs de l'été et de l'hiver ont été exécutés. En été la simulation montre que lors de l'ensoleillement, le parement en béton bitumineux est exposé à importante

quantité de radiation solaire, qui élève la température à sa surface et sur toute son épaisseur. De même en hiver, par temps de gel, le revêtement devient entièrement gelé. La température dans le substrat sous-jacent du talus en enrochement devient stable approximativement à la profondeur de 1,0 m avec une fluctuation d'environ $\pm 1,5$ °C.

3. Objectifs :

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'évaluer le comportement thermique des masques en béton bitumineux, soumis aux variations journalières de température en développant une méthodologie d'analyse thermique numérique appropriée.

Les objectifs spécifiques fixés sont :

- ✓ De développer une procédure de modélisation thermique transitoire, couplée qui tient compte de la radiation, convection et conduction à l'aide du logiciel FLUENT, permettant de déterminer le champ de la température au sein des masques en béton bitumineux à n'importe quelle profondeur.
- ✓ Élaborer un modèle numérique capable de calculer avec le maximum possible de précision les radiations solaires influençant le masque en béton bitumineux à chaque instant de l'année et à n'importe quel endroit, tenons compte des conditions géographiques et climatiques.
- ✓ Proposer des solutions pratiques, visant à protéger les masques en béton bitumineux, qui agissent sur le régime thermique sous le masque de façon à le rendre plus stable. On vise à réduire la quantité de chaleur absorbée durant l'été et à maximiser l'extraction de chaleur durant l'hiver. Les principales solutions proposées ont pour but d'éviter que le masque se réchauffe, soit par isolation thermique en utilisant les surfaces réfléchissantes, soit à l'aide des couches en béton poreux et en béton armé.

4. Méthodologie :

Afin d'atteindre les objectifs définis, le travail est organisé comme suit :

Tout d'abord, une recherche bibliographique a été effectuée sur les enrobés bitumineux et leurs utilisations dans les différents domaines hydrauliques et spécialement les barrages en remblais, comme des masques pour assurer leurs étanchéités. Une recherche a ensuite été effectuée sur tous les logiciels capables de réaliser des analyses de transfert de chaleur couplés (rayonnement, convection et conduction) en régime transitoire.

Une procédure de modélisation a été établie pour l'étude des structures, cette procédure définit les étapes à suivre dans les logiciels : définition de la géométrie et des conditions aux limites, définition du maillage, application des charges par GAMBIT, définition des pas de temps de calcul, et analyse de transfert de chaleur par FLUENT, afin de valider le logiciel sélectionné et de s'assurer de la cohérence des résultats,

Les résultats obtenus suite à ces analyses ont été validés par des mesures expérimentales.

Enfin, une analyse thermique a été effectuée pour le barrage Ghrib à Ain Defla et pour le barrage de Bouhnifia à Mascara. Pour chacun de ces barrages, les propriétés thermiques et

mécaniques du béton bitumineux ainsi que les conditions climatiques ont tout d'abord été déterminés à partir de la littérature existante ou des relevés sur les sites correspondants. Ensuite une optimisation par des solutions pratiques a été réalisée pour protéger le masque en béton bitumineux afin d'améliorer son rôle d'étanchéité, de durabilité et de longévité.

5. Organisation de la thèse :

Pour atteindre l'objectif exposé ci-dessus, cette thèse est structurée de deux grandes parties :

La première partie est réservée à la recherche bibliographique, composée de trois chapitres :

- *Le premier chapitre* : s'intéresse à l'utilisation du bitume dans les travaux hydrauliques ;
- *Le deuxième chapitre* : présente une revue de littérature sur l'étanchéité des barrages en remblais ;
- *Le troisième chapitre* : concerne les barrages à masque amont en béton bitumineux dans le monde et en Algérie.

La deuxième partie, traite la modélisation du transfert de chaleur dans les masques en béton bitumineux, elle est composée de quatre chapitres :

- *Le premier chapitre* est une description des différents types de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) et leurs composantes ;
- *Le deuxième chapitre* expose la réalisation des modèles numériques des masques en béton bitumineux des barrages de Ghrib et de Bouhnifia ;
- *Le troisième chapitre* formule la validation des modèles ;
- *Et le quatrième chapitre* présente une optimisation par des solutions pratiques, qui comporte, la simulation de chaque solution existante ou proposée, ainsi que les résultats et les discussions.

La conclusion générale exposera l'ensemble des avantages et inconvénients que l'on peut en tirer et la meilleure solution pratique à employer, pour protéger les masques en béton bitumineux dans les barrages en remblais, et en fin nous avons formulé quelques *recommandations* que nous jugeons efficaces et pratiquement réalisables.

Partie I

Chapitre I : Utilisation du bitume dans les travaux hydrauliques.

Chapitre II : Etanchéité des barrages en remblais.

Chapitre III : Les barrages à masque en béton bitumineux.

Chapitre I : Utilisation du bitume dans les travaux hydrauliques

I.1 Le bitume dans l'antiquité :

Le bitume est un matériau exploité depuis toujours pour ses qualités d'adhésivité et d'étanchéité. De l'Arche de Noé aux citernes d'Egypte, des jardins de Babylone aux navires grecs et romains, nombreuses sont les civilisations qui ont pu l'utiliser (*Lombardi, 2005*).

Selon l'Ancien Testament, c'est lui qui a été utilisé pour calfater l'Arche de Noé et le berceau de Moïse. A Babylone, l'étanchéité des terrasses, des palais et des jardins suspendus était assurée par du bitume. Les Egyptiens s'en servaient pour recouvrir les voies sacrées des temples, colmater les canaux, digues et citernes et... préparer les momies (*Lombardi, 2005*).

En Amérique du nord, les sables bitumineux de l'Athabasca tiennent leur nom de la rivière Athabasca qui passe au cœur de l'Alberta et qui laisse apparaître sur ses rives le sable bitumineux. Par le passé, ce bitume était utilisé par les tribus indiennes de la région pour imperméabiliser leurs canoës (www.eurovia.com/fr/liens-viraux-externes/le-bitume-histoire).

I.2 Un matériau toujours d'actualité :

Au XV^e siècle, les artistes graveurs l'utilisent pour reproduire leurs dessins à l'eau forte et les peintres pour lier leurs pigments. En France, dès la fin du XV^e siècle, des gisements d'asphalte sont exploités à Merckwiller -Pechelbronn, en alsace, et à Seyssel, dans l'Ain, pour l'étanchéité des fortifications et le graissage des essieux de canon.

Au début des années 1800, l'asphalte commence à servir de revêtement pour les trottoirs et les rues de Paris et de Londres (*USIRF, 2011*).

En 1824, c'est avec du bitume de Judée que Niepce réalise la première photographie de l'histoire : il place des pierres lithographiques recouvertes de bitume au fond d'une chambre obscure et obtient l'image fixée d'un paysage (*USIRF, 2011*).

Inerte, imperméable et insoluble dans l'eau, le bitume constitue un excellent isolant thermique et électrique, il est utilisé pour réaliser des chapes d'étanchéité en couverture de bâtiments (toiture, cuvelages), imperméabiliser les parois de retenues d'eau (citerne, canalisation, barrage, digue à la mer...) ou fabriquer des peintures, vernis et émulsions pâteuses mises en œuvre pour hydrofuger les parois en béton. C'est du bitume qui protège de la corrosion et de l'abrasion les 450 000 km de câbles sous-marins par lesquels transitent une grande partie des communications mondiales.

Le bitume joue aussi le rôle d'isolant phonique et thermique dans les habitations. Coulé dans l'épaisseur des planchers, il réduit la propagation du bruit et les pertes thermiques, au bénéfice du confort de vie et des économies d'énergie.

Dans l'industrie automobile, le bitume est utilisé pour amortir les vibrations. Dans certains modèles de voitures, on trouve jusqu'à 30 pièces différentes comportant des éléments amortisseurs bitumineux. (www.asphaltes.org/_img/Histoire_du_bitume)

On utilise aussi le bitume pour isoler les piles électriques, assurer l'étanchéité des ouvrages d'art, favoriser la germination et la croissance des plantes sur les surfaces maraîchères, ou encore optimiser les encres de journaux.

Matériau de base des routes et des voies de circulation urbaines comme les pistes cyclables ou les trottoirs, le bitume a permis une accélération et une amélioration constante de la mobilité et des échanges entre les hommes (*USIRF, 2011*).

I.3 Origine :

Les Grecs et les Romains, qui en connaissaient l'usage, l'avaient baptisé respectivement "asphaltos" et "bitumen". Les deux mots existent encore aujourd'hui sous des formes très proches (asphalte, asphalt, bitume, bitumen...) dans les langues occidentales modernes. En français, le mot bitume désigne à l'origine un produit dérivé du pétrole, présent à l'état naturel sous forme suintante (France, Venezuela, Trinidad...), dans des dépôts sous forme d'amas ou en imprégnation dans des roches poreuses (Madagascar, Pont-du-Château en France...).

L'asphalte désigne, également à l'origine, des roches calcaires, où le bitume est présent, généralement dans la proportion de 8 à 10 %, quelquefois davantage.

Asphalte et bitume sont donc à l'origine des produits naturels associés à l'huile de pierre (pétrole). Les bitumes et les asphaltes naturels ne sont plus guère utilisés, sinon occasionnellement en tant qu'additifs pour enrichir le bitume, désormais obtenu par raffinage du pétrole (*Lombardi, 2005*).

Le bitume utilisé de nos jours est obtenu par traitement de certains pétroles bruts, appelés "bruts à bitume", dont il constitue la partie la plus dense et la plus visqueuse. Sur les 1 300 bruts environ référencés dans le monde, seuls 10 % sont choisis par les pétroliers pour la fabrication du bitume. Le bitume est obtenu en fractionnant le pétrole brut par distillation atmosphérique puis "sous- vide".

C'est un mélange complexe d'hydrocarbures naturels non volatils de poids moléculaire élevé, appartenant en majorité aux groupes aliphatiques à chaînes linéaires ou ramifiées, naphténiques ou cycliques et saturés, il contient en moyenne 80 à 85 % de carbone, 10 à 15 % d'hydrogène, 2 à 3 % d'oxygène, et en moindre quantité, du soufre et de l'azote ainsi que divers métaux à l'état de traces, mais liés chimiquement aux molécules les plus lourdes.

A la température ambiante, il est très visqueux, presque solide, et présente deux caractéristiques importantes : c'est un agglomérant à fort pouvoir adhésif, en particulier sur les minéraux destinés aux ouvrages, et il est totalement imperméable à l'eau.

Ces propriétés sont exploitées dans la construction routière, sa principale utilisation, où il fournit le liant pour les enrobés, et dans diverses applications pour les travaux publics et l'industrie qui mettent principalement à profit son étanchéité pour les toitures, les terrasses ou les bassins (*Hunter et al., 2003*).

I.4 Béton bitumineux :

I.4.1 Composition :

Le béton bitumineux est défini comme étant un mélange d'un bitume et d'agrégats. Ces deux matériaux sont mélangés dans des quantités données afin de donner un béton bitumineux ayant les caractéristiques et les propriétés voulues. (*Lombardi, 2005*).

Dans les noyaux en béton bitumineux, le bitume joue le rôle de liant et assure l'étanchéité. Les agrégats jouent le rôle de squelette donnant au noyau sa rigidité et sa résistance lorsqu'il est soumis à des sollicitations. Bien évidemment, il existe un grand nombre de types de bitumes et d'agrégats possédant des caractéristiques différentes qui influencent les propriétés du mélange de béton bitumineux.

Un mélange de béton bitumineux comprend en règle générale entre 5,5 et 6,5 % de bitume. Ce qui permet d'obtenir un bon compromis entre la manœuvrabilité du matériau, sa résistance physique, son imperméabilité et sa rigidité. Un pourcentage plus faible rend le mélange plus résistant et plus rigide, mais aussi moins ductile et moins imperméable. Inversement, un pourcentage plus élevé rend le mélange moins résistant et moins rigide ainsi que plus ductile et plus imperméable (*Bitume Québec, 2008*).

I.4.1.1 Bitume :

Lors de ses premières utilisations, dans l'antiquité, le bitume était récupéré dans des nappes formées par des remontées à travers la roche fracturée. Puis, il fut extrait des pierres, dites pierres asphaltées, qui contenaient à peu près 20% de bitume. En chauffant ces dernières à une température suffisamment élevée, le bitume qu'elles contenaient se liquéfiait et pouvait être récupéré.

Cette méthode pourrait être vue comme le premier acte de raffinage du pétrole par l'homme. De nos jours, le bitume utilisé provient de la transformation du pétrole par l'industrie.

Un bitume est généralement composé de carbone, d'hydrogène, de sulfure et d'oxygène dans les proportions décrites dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 – Composition du bitume (*Greegan & Monismith, 1996*)

Carbone	70-85%
Hydrogène	7-12%
Sulfure	1-7%
Oxygène	<5%
Nitrogène	<1%

I.4.1.2 Agrégats :

Afin d'accroître la résistance de la structure, le meilleur contact possible entre l'agrégat et le bitume doit être assuré. Pour ce faire, il est recommandé de nettoyer l'agrégat et d'utiliser

des agrégats alcalins possédant une faible friabilité. Les agrégats jouent le rôle de squelette dans le matériau en lui donnant sa rigidité (*Wang et Hoeg, 2009*).

De plus, des agrégats possédant une porosité inférieure à 3% ne semblent pas voir leurs caractéristiques de compression, traction et flexion influencées par des cycles de gel-dégel et l'immersion dans l'eau. Lors de la conception d'un ouvrage en bitume, la porosité de référence visée est de l'ordre de 3%. En dessous de cette valeur, la perméabilité du matériau est suffisamment faible pour que l'eau n'ait pas d'action importante. Les infiltrations et la percolation hydraulique peuvent même être considérées comme nulles ou presque nulles.

Le béton bitumineux possède une bonne résistance même quand il est soumis à diverses conditions telles que l'immersion et le gel dégel. Pour des pourcentages de bitume supérieurs à 5,5 % la résistance du béton bitumineux, sous ces conditions, est proche de celle à l'air libre (*Wang, 2008*).

Ceci représente une caractéristique importante intéressante. Notamment pour des projets situés dans des zones ayant à subir des cycles de gel-dégel, ce qui peut être très dommageable pour la structure. En effet, le gel de l'eau contenue dans les pores d'un mélange (que ce soit de béton bitumineux, de béton Portland ou autre) génère une augmentation des pressions dans celui-ci due à l'augmentation du volume de l'eau. Ces pressions se dissipent lors du dégel de cette eau. C'est la répétition des cycles de gel-dégel qui est le plus dommageable pour un mélange et qui peut entraîner sa dégradation (fissures, éclatement local,...) (*Plaisant, 2013*).

I.4.2 Enrochement :

Le comportement du corps d'un barrage peut varier de façon significative en fonction du type de matériau choisi pour le construire. L'intérêt majeur, économiquement parlant, d'un barrage en remblai est de pouvoir utiliser les matériaux se trouvant à proximité du lieu de construction de celui-ci. La qualité et la quantité du matériau sont donc des données que doit prendre en compte le concepteur dans son choix du type et de la géométrie interne et externe du barrage.

Il convient de différencier ce qui est appelé enrochement et terre, qui peut également être utilisée pour construire des ouvrages. Une première définition fut proposée en 1948 : « la terre est un agrégat de grains minéraux qui peut être séparé facilement en le mélangeant à l'eau. Tandis que le roc est un agrégat naturel de minéraux unis par des forces de cohésion fortes et permanentes ».

Une différenciation plus précise doit néanmoins être faite entre ouvrages en terre et en enrochement. Car, si lors de la construction du premier, des pressions interstitielles peuvent se développer, ceci n'est pas le cas pour le second ; ceci, à condition que le pourcentage massique de particules fines qu'il contient soit inférieur à 30%. Autrement dit, un sol dont la granulométrie est inférieure à 75 mm peut être qualifié de « terre » tandis que si elle est supérieure, il sera qualifié « d'enrochement » (*Plaisant, 2013*).

I.5 Essais de labo sur les mélanges bitumineux :

Les essais des enrobés bitumineux se déroulent en étapes comme le montre la figure I.1, et seront détaillés dans les paragraphes : I.5.1 jusqu'à I.5.7.

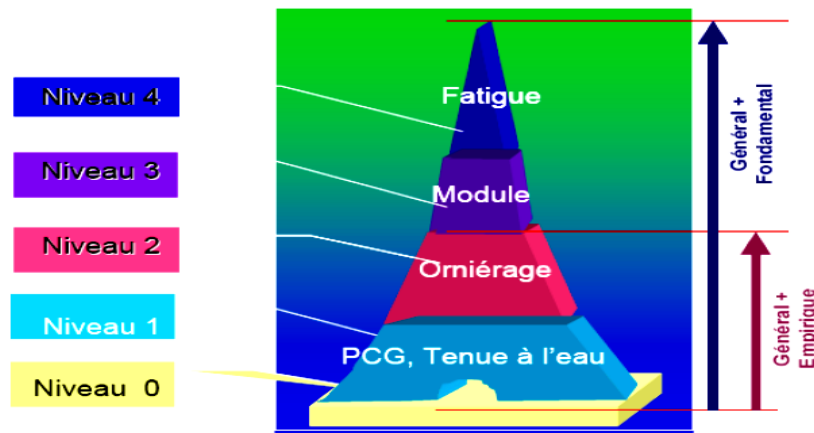


Fig. I.1 : Essais de laboratoire – Étude de formulation (CETE, 2010).

I.5.1 Premier essai ; La Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) :

- **Principe:**

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé, foisonné et à la température d'essai (130 °C à 160 °C environ) dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre (Fig. I.2). On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1° (externe) ou 0,82° (interne) et soumise à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage par pétrissage. On observe l'augmentation de compacité (diminution du pourcentage de vides) en fonction du nombre de tours (CETE, 2010).



Fig. I.2 : La presse de cisaillement giratoire (CETE, 2010).

- **Interprétation:**

Pour un nombre de girations donné, fonction du type d'enrobés, de la nature des granulats et de l'épaisseur de mise en œuvre, le formulateur peut prévoir le pourcentage de vides sur le chantier. Dans le cas de couches de roulement très minces, il s'agit plutôt d'approcher la macro texture que la compacité.

I.5.2 Deuxième essai, L'essai de tenue à l'eau ou essai de DURIEZ :

- **Principe:**

Le mélange hydrocarboné est compacté dans un moule cylindrique par une pression statique à double effet. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à température (18 °C) et hygrométrie contrôlées, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple (Fig. I.3).

- **Interprétation:**

Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange. La résistance à sec est une approche des caractéristiques mécaniques, et la compacité constitue un indicateur complémentaire à l'essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire.



Fig. I.3 : Essai de tenue à l'eau (CETE, 2010).

I.5.3 Troisième essai, L'essai d'orniérage :

- **Principe:**

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette

plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence: 1 Hz, charge: 5 KN, pression: 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C) (Fig. I.4).

- **Interprétation:**

La profondeur de la déformation produite dans le passage de roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornièrre à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau, et de sa classe.



Fig. I.4: Appareil de mesure de la profondeur d'ornièrre (CETE, 2010).

I.5.4 Quatrième essai : Essais de module :

- **Principe:**

La rigidité du mélange est déterminée par un essai de traction uni-axial (sur éprouvette cylindrique ou parallélépipédique) (Fig. I.5). La charge est appliquée dans un domaine de petites déformations, en contrôlant le temps ou la fréquence, la température, la loi de chargement.

- **Interprétation:**

Le module (rapport de la contrainte à la déformation) est calculé pour chaque essai élémentaire. Grâce à l'équivalence temps-température, on trace la courbe maîtresse du module à une température donnée. Cette représentation permet de connaître le comportement du mélange sur un large spectre de temps de charge ou de fréquences. La spécification porte sur le module à 15 °C et une fréquence de 10 Hz ou un temps de charge de 0,02 secondes.



Fig. I.5 : Mesure du module des enrobés bitumineux en traction directe : essai MAER (CETE, 2010).

I.5.5 Cinquième essai ; Essai de Fatigue :

- **Principe:**

Une éprouvette trapézoïdale est soumise, à une température et pour une fréquence de chargement fixées, à une déformation imposée. Lorsque la contrainte appliquée pour maintenir la déformation constante est diminuée de moitié, l'éprouvette est considérée comme endommagée au nombre de cycles considéré (Fig. I.6).



Fig. I.6: Appareil de mesure de la fatigue (CETE, 2010).

• **Interprétation :**

Sur un graphique *log/log*, les différents couples (niveau de chargement, nombre de cycles jusqu'à l'endommagement (ϵ_t)), se placent sur une droite de fatigue. A 10^6 cycles (N : nombre de cycles), le seuil de chargement relevé sur la droite est la valeur caractéristique de la résistance en fatigue (Fig. I.7):

* *Les contrôles de chantier :*

- ✓ Contrôle des constituants
- ✓ Formulation des mélanges
- ✓ Contrôles d'exécution

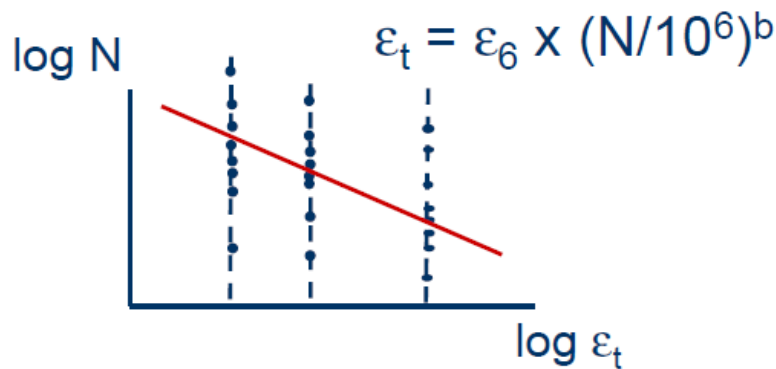


Fig. I.7 : Graphe de l'essai de la fatigue (CETE, 2010).

I.5.6 Essai de pénétrabilité :

- Mesure de la dureté des bitumes (Fig. I.8) ;
- Pénétration, exprimée en 1/10 mm, d'une aiguille calibrée dans un échantillon de bitume maintenu à température constante sous une charge de 100 g pendant 5 secondes
- Les classes des bitumes sont définies par leur pénétrabilité à 25°C.

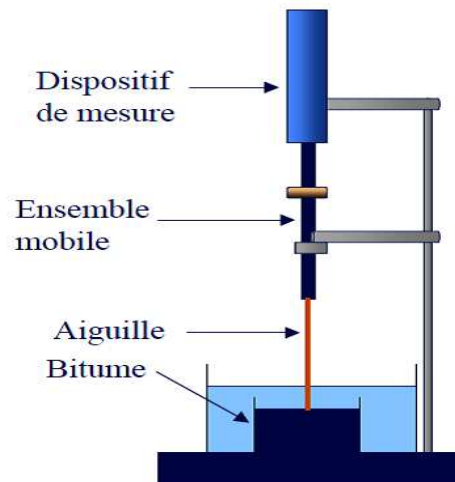


Fig. I.8 : Essai de pénétrabilité (CETE, 2010).

I.5.7 Température Bille Anneau (TBA) :

- Mesure du point de ramollissement (les bitumes n'ont pas de point de fusion franc) (Fig. I.9).
- Température à laquelle une bille d'acier calibrée s'enfonce d'une hauteur définie (25 mm) dans un anneau de bitume

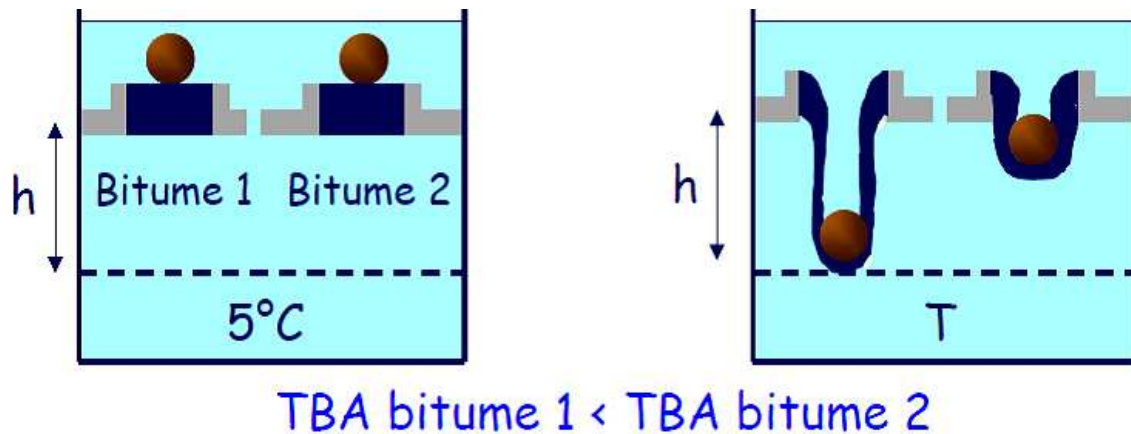


Fig. I.9: Essai de Température Bille Anneau (CETE, 2010).

I.5.8 Point de fragilité FRAASS :

- Fragilité du bitume à basse température (Fig. I.10).
- Température à laquelle une pellicule de bitume de 0.5 mm d'épaisseur déposée sur une lame d'acier se fissure lorsqu'elle est soumise à des flexions répétées avec une diminution de 1°C/min

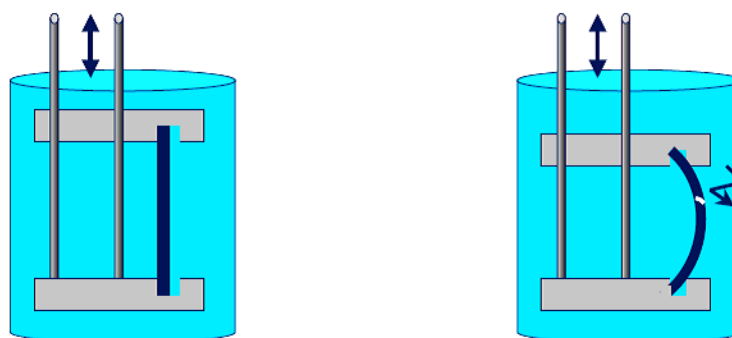


Fig. I.10 : Essai de Point de fragilité (CETE, 2010).

Signification physique des essais :

- Pénétrabilité → rigidité de l'enrobé ;
- TBA (Température Bille Anneau) → risque d'orniérage de l'enrobé ;
- FRAASS → risque de fissuration thermique (fissuration par le haut de revêtement).

I.6 Types d'application :

I.6.1 Application dans les supports (Fondations) :

* Fondation granulaire : La fondation doit être stable et la surface doit être exempte d'accumulations d'eau, sans granulats détachés, unie et résistante aux déformations provoquées par le passage des camions transportant les enrobés vers le finisseur. L'utilisation d'un liant d'imprégnation est recommandée afin de faciliter l'obtention de ces conditions optimales.

* Fondation granulaire décohésionnée : Le retraitement des matériaux décohésionnés à l'émulsion de bitume ou à la mousse de bitume — additionnés ou non d'un liant hydraulique tels que la chaux ou le ciment — permet d'augmenter la portance d'une fondation déficiente et de réduire la quantité de fines indésirables.

Le retraitement est effectué sur une épaisseur maximale de 250 mm. Le liant utilisé pour une fondation retraitée doit :

- Etre appliqué en quantité suffisante;
- Etre réparti de façon homogène sur toute l'épaisseur de la couche;
- Avoir subi la durée requise de mûrissement.

Il est recommandé d'appliquer une couche d'accrochage suivi d'un gravillonnage afin d'assurer le collage des couches d'enrobés avec la couche retraitée.

I.6.2 Application dans les revêtements :

Pour les nouvelles applications d'enrobés sur un revêtement bitumineux existant, la surface doit être unie et propre.

- Le rapiécage et le remplissage des fissures : Avant le recouvrement d'un revêtement bitumineux existant, les zones présentant des défauts associés à une faible capacité de support (les nids de poule, la fissuration multiple, etc.) doivent être éliminées et remplacées. Ces zones doivent être réparées en suivant les étapes de rapiécage et remplissage des fissures.
- La couche de correction : Il faut prévoir une couche de correction lorsque les surfaces sont fortement dégradées. Son utilisation redresse les défauts de profils longitudinaux et transversaux lorsque la surface du revêtement existant est déformée par des bosses ou des ornières. Il faut utiliser des enrobés adaptés au type de surface à corriger (Eronbé Corrigé EC-10 ou EC-5). Souvent, l'objectif visé est de mettre en place la couche la plus mince possible permettant de corriger les défauts.
- Le fraisage à froid (planage) : L'opération de fraisage consiste à désagréger et à enlever le revêtement de la structure sur une épaisseur déterminée à l'aide d'une fraiseuse ou planeuse. Le matériau ainsi décohésionné s'appelle du fraisât.

Le fraisage effectué sur une épaisseur suffisante permet également d'éliminer les patrons de fissuration et de réduire la réflexion des fissures existantes dans le nouveau revêtement. Le fraisage permet de créer l'espace nécessaire correspondant à l'épaisseur du nouveau revêtement.

- Le recyclage à froid : Le recyclage à froid consiste à utiliser un équipement spécialisé dénommé atelier de retraitement capable, en une seule opération continue de fraiser le vieux revêtement à la profondeur désirée, de traiter les fraisats de planage par l'ajout d'une émulsion de bitume et d'épandre les enrobés recyclés à froid sur la structure selon le profil spécifié. La profondeur d'un retraitement varie généralement entre 75 et 150 mm (*Bitume Québec, 2008*).

I.6.3. Applications routières :

Les matériaux bitumineux, employés depuis le début du XXe siècle pour le revêtement des chaussées très circulées (couche de roulement), ont vu leur utilisation étendue à partir des années 1960-70 à la constitution des couches d'assises (couche de liaison, couche de base).

Aujourd'hui, en construction neuve, les matériaux traités avec un liant bitumineux représentent pratiquement la totalité des couches de roulement des chaussées revêtues et ils offrent une solution de plus en plus prisée pour les couches d'assise des chaussées à moyen et fort trafic (Fig. I.11). De même, la totalité des opérations d'entretien et de rénovation des chaussées revêtues fait appel aux liants bitumineux (*Bitume Québec, 2008*).



Fig. I.11 : Travaux routier (*Bitume Québec, 2008*).

I.6.4 Applications industrielles :

Les utilisations industrielles du bitume, sont multiples et variées, elles font souvent appel à des produits spécifiques.

- Ouvrages d'art, trottoirs : Après la route, les ouvrages d'art et les trottoirs constituent le second domaine d'utilisation du bitume. Son étanchéité à l'eau et à l'air, son

pouvoir liant et sa souplesse en font un excellent matériau d'étanchéité des toitures et des ouvrages d'art. Sa souplesse en fait le matériau idéal pour le revêtement des trottoirs.

- Etanchéité par membranes bitumineuses : L'étanchéité des toitures terrasses et des ouvrages d'art (ponts, viaducs...) est souvent assurée par des membranes d'étanchéité réalisées pour la plupart à base de bitume. Les membranes ou chapes d'étanchéité sont fabriquées en usine. Elles se composent d'une armature (voile de verre, feutre polyester) surfacée principalement avec du bitume-polymère mélangé à une charge minérale très fine (filler). Certaines chapes sont revêtues, sur la face destinée à être exposée aux intempéries ou circulée, d'une protection mécanique (paillettes minérales, feuille d'aluminium ou de cuivre...).
- Isolation thermique et phonique des bâtiments : Incorporé dans certains isolants à base de laine de verre (bitume soufflé) ou dans certains panneaux de fibres de bois (bitume dur), le bitume participe à l'isolation phonique et thermique des bâtiments.
- Peintures, encres et vernis : Le bitume, en solution ou en émulsion, peut entrer dans la composition de peintures, de primaires d'accrochage et de vernis pour assurer la protection contre l'humidité ou la corrosion. De nombreuses encres noires renferment du bitume.
- Autres applications : Le bitume peut entrer dans de nombreuses autres applications, parmi lesquelles on peut citer :
 - Insonorisation de pièces d'automobiles (amortissement des vibrations) ;
 - Industrie du caoutchouc (facilite le démoulage) ;
 - Enduction de papier d'emballage (étanchéité) ;
 - Isolation électrique et piles électriques (résistivité électrique) ;
 - Condensateurs (constante diélectrique) ;
 - Face inférieure de moquettes (amortissement et collage) ;
 - Agriculture (germination accélérée grâce à un tapis d'émulsion biodégradable, le "mulch") ;
 - Pigeons d'argile (propriétés mécaniques) ;
 - Graisses spéciales utilisées dans des conditions de température et de pression très élevées (Laminoirs) (*Lombardi, 2005*).

I.7 Applications dans le domaine hydraulique :

Les performances du bitume en matière d'étanchéité sont connues depuis la plus haute antiquité. On peut voir encore aujourd'hui des ouvrages hydrauliques à base de bitume vieux de 3 000 ans, telles les digues du Tigre, à Assur, en Mésopotamie, encore en bon état.

Imperméables, insensibles à l'eau, résistant à la plupart des agents chimiques courants et aux micro-organismes, durables ; Les bitumes possèdent une grande aptitude à résoudre de nombreux problèmes d'hydraulique.

La souplesse des étanchéités bitumineuses leur permet de s'adapter aux tassements de leur support sans se fissurer ni perdre leurs propriétés. Pour les applications hydrauliques, les bitumes peuvent être utilisés purs ou sous forme de membranes bitumineuses préfabriquées, d'asphalte coulé ou d'enrobés. (*Van Asback, 1962*)

I.7.1. Domaine des barrages :

L'asphalte a longtemps été utilisé dans la construction de barrages: pour couler les fondations lors de l'écoulement des eaux souterraines se débarrasse du ciment portland particules de coulis; Comme revêtement pour conduits pénétrant dans le barrage, pour contrôler les infiltrations; Comme revêtement de protection sur des fondations exposées qui sont sujettes à l'air ou à l'extinction de l'eau; Et comme élément barrière à l'eau d'un barrage en remblai.

I.7.1.1 Enrobés étanches pour masques amont de barrage :

Le masque étanche rempli la fonction d'étanchéité d'un barrage en remblais (Fig. I.12), il est composé d'une couche support (binder) sur laquelle sont appliquées des couches de béton bitumineux étanche. (www.cea-coop.it/cataloghi.../CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig. I.12 : Masque en béton bitumineux du barrage Chabrouh (2007) Liban. (www.cea-coop.it/cataloghi.../CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

I.7.2 Enrobés étanches pour écran interne de barrage :

L'étanchéité d'un barrage peut être assurée à l'intérieur du barrage lui-même, sous la forme d'un écran étanche en enrobés bitumineux d'épaisseur comprise entre 0,60 et 1 m, noyé au milieu de la structure du barrage (Fig. I.13).

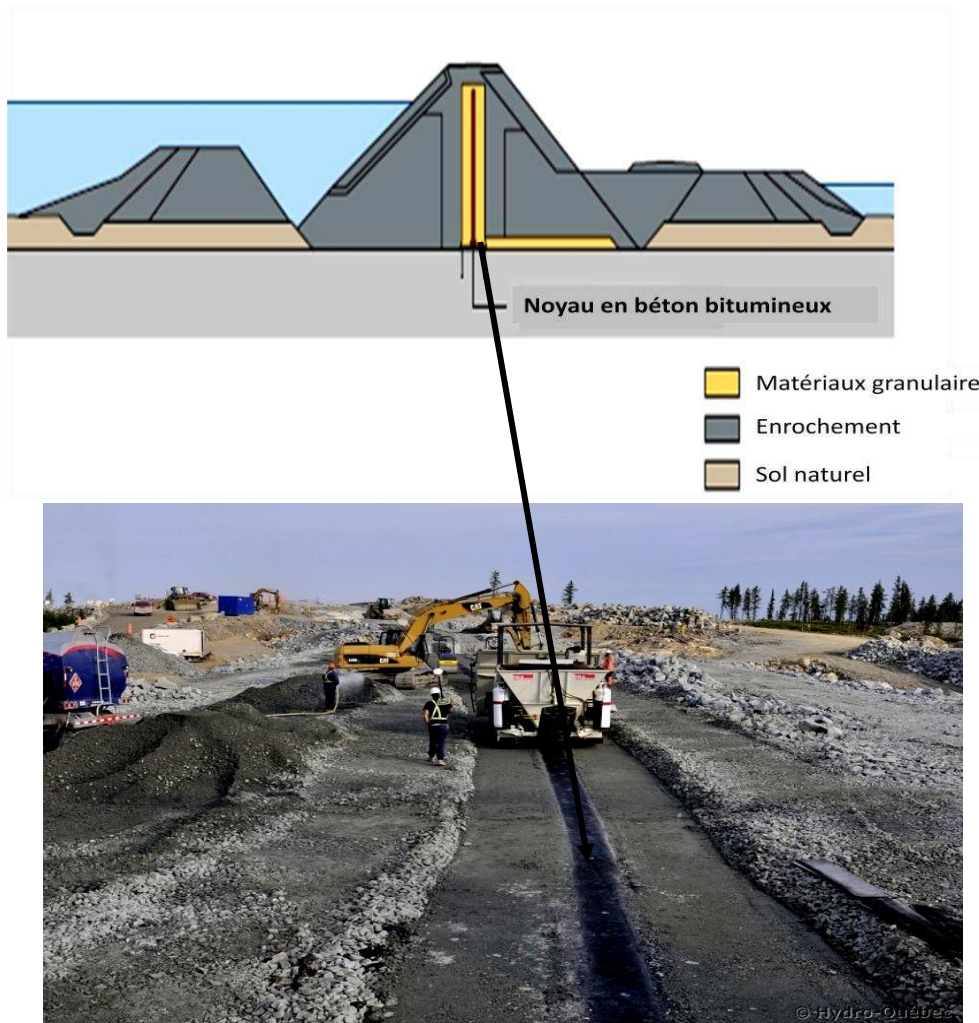


Fig. I.13 : Noyau en béton bitumineux du barrage de Nemiscau, Canada ,1982 (Wang, 2009).

I.7.3 Enrobés étanches pour revêtements de canaux :

Les enrobés bitumineux permettent aussi de réaliser l'étanchéité des canaux de navigation, d'irrigation ou d'amenée d'eau aux chutes hydroélectriques. L'un des grands avantages des enrobés bitumineux est que, grâce à leur plasticité, elles épousent étroitement la structure, même en cas de mouvement de celle-ci, par exemple en cas de glissement de terrain.

I.7.4 Géomembranes bitumineuses :

L'excellente résistance du bitume à de nombreux produits chimiques et aux micro-organismes permet d'utiliser des géomembranes bitumineuses au contact de divers polluants non-huileux (Fig. I.14).

C'est pourquoi elles sont utilisées pour étancher supports de ballast, barrages, canaux, réservoirs, bassins de lagunage d'eaux usées, bassins de stockage de boues industrielles, décharges contrôlées, etc.

Les membranes sont préfabriquées en usine en rouleaux de grande largeur (supérieure ou égale à 4 m). Elles sont constituées d'un géotextile en fibres de polyester non tissées, imprégné d'un mélange bitume-polymère fillérisé (*Lambert, 1997*).



Fig. I.14 : Protection d'un bassin par géomembrane bitumineuse (<http://www.soprema.fr/fr/article/dossier-thematique/l-etancheite-des-ouvrages-hydrauliques>).

I.7.5 Diguees et berges des rivières :

Les enrochements liés au bitume peuvent être utilisés comme protection des berges lorsque les actions hydrodynamiques sont fortes et que la protection doit assurer une fonction d'étanchéité ou de support des berges (par exemple dans le cas où les talus doivent présenter une forte pente).

Il est préférable d'utiliser le bitume pour lier les enrochements destinés à une protection des berges (Fig. I.15 et I.16), et ce par ce que le mastic bitumineux est moins vulnérable à l'altération et assure un meilleur contact avec les enrochements (*CETMEF, 2011*).

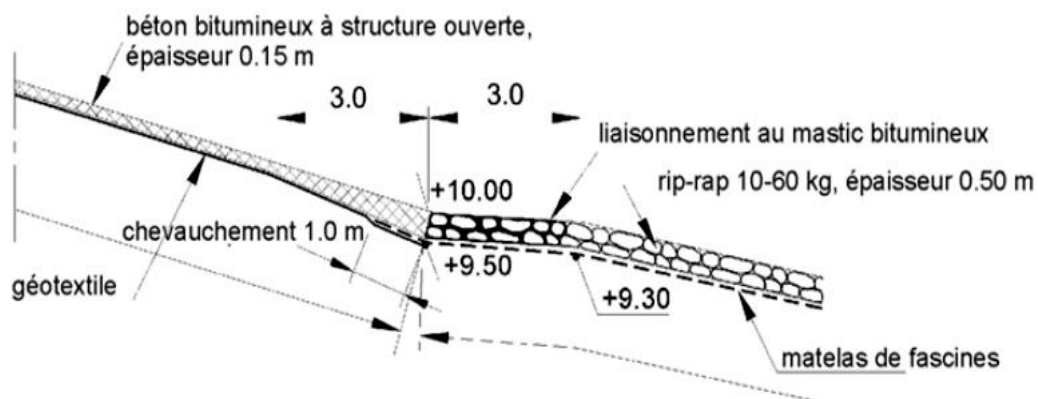


Fig. I.15 : Coupe longitudinale d'une berge protégée par les enrochements bitumineux (*Van Asback, 1962*)



Fig. I.16: Protection des berges par le béton bitumineux
(http://septdeniersweb.free.fr/son%20histoire/berge_01.htm)

I.7.6 Canaux de navigation :

Dans les voies navigables (Fig. I.17), le béton bitumineux est généralement utilisé de la façon suivante :

- **Béton bitumineux à structure ouverte**, qui consiste à un mélange de petits granulats et de bitume appliqué à chaud.
- **Enrochement appareiller liés au mortier**, qui constituent un revêtement dans lequel l'enrochement, placés a la main, sont pris dans du mortier de ciment.
- **Enrochement liés** (ou liaisonnés) au liant à base de béton bitumineux (*CETMEF, 2011*).



Fig. I.17 : Canal de navigation de Milano, Italie (1966-1968) (*Van Asback, 1962*).

I.7.7 Réservoirs :

Le rôle de l'étanchéité des réservoirs en terre superficiels destinés pour l'irrigation est d'empêcher à la fois les pertes par infiltration et la détérioration des murs latéraux (Fig. I.18 et I.19).

Généralement la couche d'étanchéité est un mélange de sable enrobé à chaux. L'agrégat de ce mélange consiste généralement en 65% de sable, mélangé à 35% de poussière de calcaire de 0-3 mm ; le bitume est chauffé à 125°C avant d'être mélangé avec l'agrégat sec non chauffé, dans un malaxeur. On ajoute 3 à 5 % de ciment pendant le mélange (Van Asback, 1962).

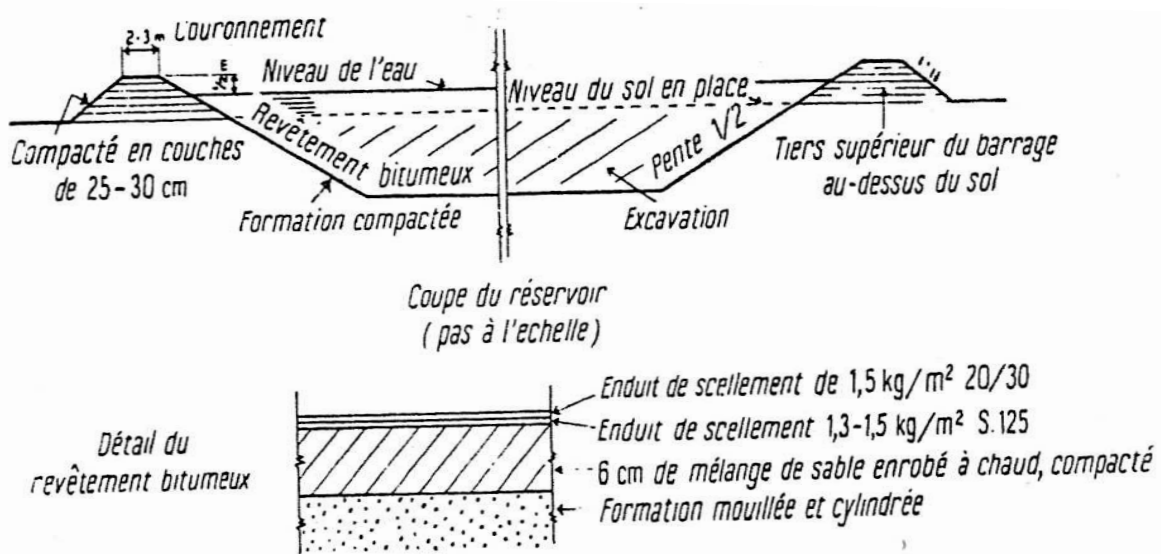


Fig. I.18 : Section et revêtement types d'un réservoir (Van Asback, 1962).



Fig. I.19 : Réservoir Sarconi en Italie, 1984 (www.cea-coop.it/cataloghi.../CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

I.7.8 Canaux d'irrigation :

Le canal d'irrigation doit assurer l'amenée des eaux de la source d'alimentation au point de livraison de la manière la plus efficace c'est à dire au plus bas prix et aux faibles frais d'exploitation (Fig. I.20 et I.21).

Sans perdre de vue ce but, la décision d'appliquer un revêtement à un nouveau canal à un canal existant nécessite une justification fondée sur l'économie de ce bien précieux qu'est l'eau ou sur la réduction des infiltrations qui peuvent envahir la région irriguée en empêchant la culture, endommageant les fondations des immeubles ,et dans des pays tropicaux entraînant des maladies. Les pertes par le transport dans les systèmes de distribution peuvent atteindre 60% (*Van Asback, 1962*).

Pour les canaux d'irrigation il y a deux types de revêtements bitumineux :

- Le revêtement de surface a l'aide d'enrobés a chaud au bitume, utiliser seulement en surface du sol, par émondage et compactage de l'enrobé au bitume, sur une épaisseur de plusieurs centimètres.
- Le revêtement par membrane bitumineuse enterrée, convient à tous les canaux, ils présentent un intérêt particulier pour les revêtements mécanique des petits canaux nouveaux.



Fig. I.20 : Etanchéité du canal d'irrigation de Caldwell (USA) par les enrobés bitumineux (<http://www.coletanche.com/fr/references/hydraulique/canaux/canal-black-canyon-irrigation-district>).

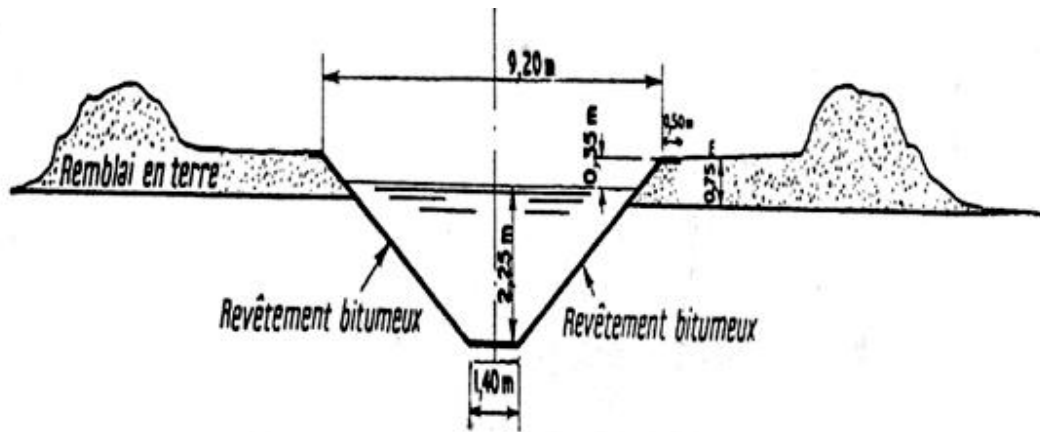


Fig. I.21: Coupe du canal d'irrigation de Beni Mtir . Maroc (Van Asback, 1962).

I.7.9 Brise-lame, épis et travaux portuaire :

L'utilisation des enrobés bitumineux dans les travaux portuaire a débuté au début de 20 siècle en Europe (Fig. I.22), sur la cote de Defland en Hollande. Cette cote est protégée par quelques 70 épis s'étendant dans la mer du Nord. Son but était de renforcer la structure des épis par une pénétration de mastic bitumineux entre les grands blocs protégeant leurs extrémités. Ils ont trouvé que le mastic avait la consistance voulue, il devait couler dans l'eau sous forme d'une masse chaude cohérente et pénétrer profondément dans les vides entre les blocs en les agglomérant (Van Asback, 1962).

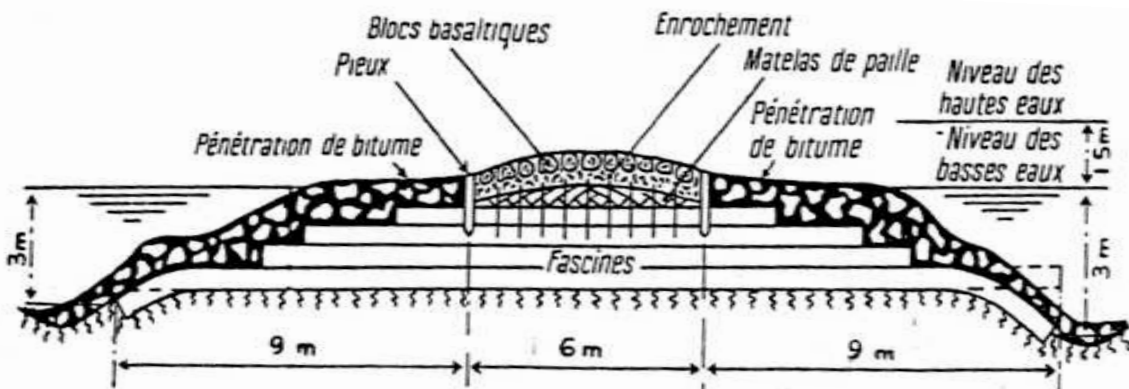


Fig. I.22 : Coupe transversale d'un épi a la cote de Shevieningen (Defland en Hollande 1938) (Van Asback, 1962).

La première utilisation importante du bitume dans les brise-lames se trouve dans les môles Ijmuiden (1963 - 1967). Les brises lames en enrochement, même soigneusement construit peuvent être endommagées par l'action des vagues.

Ces dommages, s'ils sont légers, peuvent être réparés. On peut obtenir une construction plus stable et plus durable en déversant du mastic bitumineux sur les pentes et le couronnement de la brise lames. Le mastic pénètre à l'intérieur et remplit les joints entre les pierres de couverture jusqu'à une profondeur considérable avant de se refroidir, formant ainsi une chape plus ou moins plastique, dans laquelle l'eau ne peut pas pénétrer.

Lorsque les dommages sont plus sérieux et comprennent le remplacement de certaines pierres de couverture, cette même méthode permet d'utiliser de plus petites pierres, simplifiant ainsi le travail et rendant inutile l'équipement lourd (Fig. I.23). Quand on l'applique aux nouveaux brise-lames, la méthode présente comme autre avantage la possibilité de réduire la quantité de pierres, du fait que l'on peut adopter des pentes plus raides (*Van Asback, 1962*).

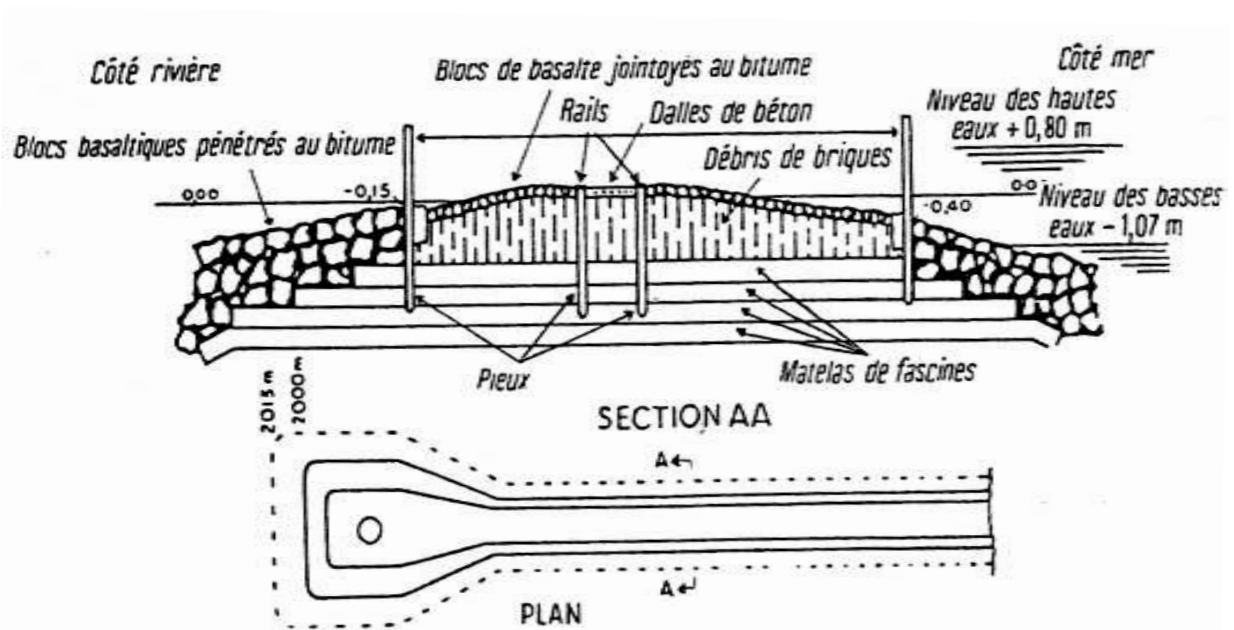


Fig. I.23 : Coupe du brise-lames nord, Hook Van Hollande (*Van Asback, 1962*).

Conclusion :

Le bitume est un produit utilisé par l'homme depuis l'antiquité ; il a permis de nombreuses avancées comme la peinture, l'isolation, la construction des routes, etc.

Le bitume continuera d'être un matériau difficilement remplaçable, notamment dans les domaines de la construction, de l'isolation ou de l'étanchéité. De nombreuses applications dépendent de lui : la construction, l'entretien et la connexion des différents types d'infrastructures de mobilité, l'aménagement et l'accessibilité des espaces publics urbains, l'isolation énergétique, l'économie de matières premières. Autant de sujets qui justifient que les industries concernées continuent d'œuvrer pour faire connaître et reconnaître les qualités et le potentiel de ce matériau ancestral.

Chapitre II : Etanchéité des barrages en remblais

Introduction :

Un ouvrage d'accumulation présentant un haut potentiel de danger, il est de ce fait primordial d'en assurer sa sécurité. En effet, une rupture peut entraîner des pertes en vies humaines ainsi que d'énormes dommages aux biens. Les coûts d'un tel accident peuvent atteindre des montants importants.

Le problème de l'étanchéité du massif se pose chaque fois que le calcul des infiltrations en superstructure indique des pertes inadmissibles. Ces pertes peuvent soit entraîner la ruine de l'ouvrage par formation de renard, soit encore, sans nuire à sa sécurité, être gênantes pour l'exploitation du barrage (*Djemili, 2006*).

II.1 Choix du type de l'organe d'étanchéité:

Quand le projeteur a fait choix pour un site donné d'un ouvrage du type digue en remblais, c'est en ayant constamment présents à l'esprit les problèmes qu'allaient poser les organes assurant l'étanchéité du massif. Les moyens pour se prémunir contre toute infiltration à travers le massif sont nombreux et lorsque nous examinons bien le problème nous s'apercevons qu'il existe toujours au moins une bonne solution qui assure l'étanchéité du massif. Le choix entre un tel ou un tel organe nécessite une étude technico-économique (*Djemili, 2006*).

II.2 Différents types d'organes d'étanchéité des digues en remblais :

On prévoit un organe d'étanchéité dans un barrage en remblais lorsque les matériaux constituant le remblai ne sont pas suffisamment imperméables pour empêcher de grandes pertes d'eau par infiltration.

On rencontre plusieurs types d'organes d'étanchéité, ceux réalisés en matériaux locaux et ceux en matériaux artificiels.

II.2.1 Noyaux :

II.2.1.1 Noyau en argile compacté :

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

Vers le sommet, le noyau doit être monté au dessus des plus hautes eaux et pratiquement, et compte tenu des remontées capillaires, jusqu'à la tête du barrage. Il doit être protégé de la dessiccation a sa partie supérieure pour éviter toute fissure de retrait qui risquerait de se révéler catastrophique. Cette protection peut être assurée par une couche de sable ou de préférence, en traitant le sommet du barrage en chemin avec une chaussée en enrobe bitumineux. Latéralement, nous disposons de part et d'autre du noyau un drain filtre, vers l'aval pour recueillir les eaux de percolation, vers l'amont pour absorber les eaux de ressuyage Après vidange. Il assure la continuité de l'étanchéité en raccordant celle-ci à la fondation imperméable ou au dispositif d'étanchéité des fondations (*Rolley, 1977*).

Voici quelques considérations relevant de l'expérience acquise par les spécialistes :

- Si le noyau a une épaisseur de 30 à 50 % de la hauteur de la retenue on peut avoir toute garantie ; un tel projet est valable quel que soit le type de sol et la hauteur de l'ouvrage ;
- Un noyau d'une épaisseur de 15 à 20 % de la hauteur de la retenue est à considérer comme peu épais mais peut encore être satisfaisant a condition qu'un bon système de drainage soit prévue ;
- Un noyau d'une épaisseur égale ou inférieure a 10 % de la hauteur de la retenue est considérer comme inhabituel et ne pourrait être toléré que si des fuites importantes ne sont pas de nature à mettre la stabilité du barrage en péril (*Kaare et Hoeg, 1993*).

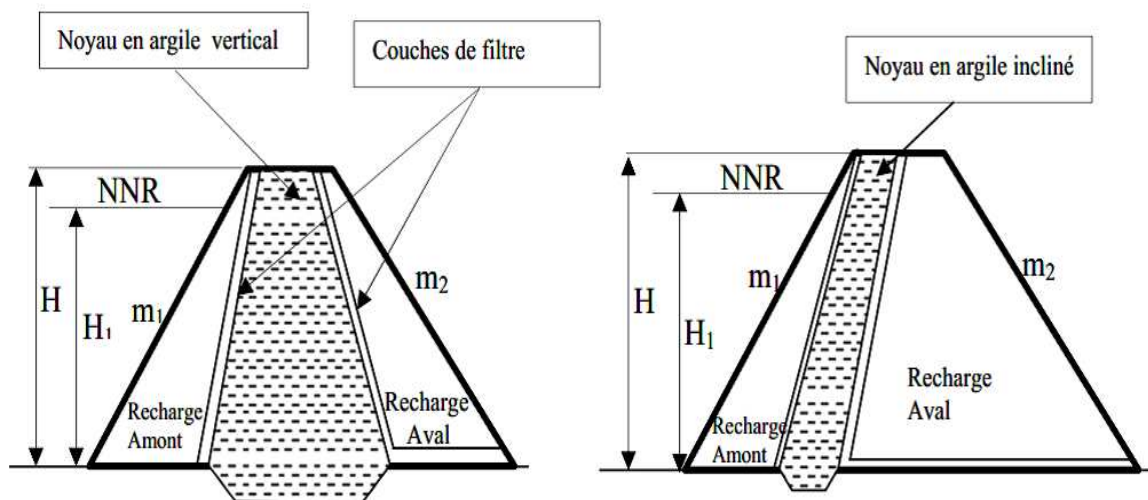


Fig. II.1 : Etanchéité par noyau en argile compacté (*Messaid, 2009*)

II.2.1.2 Noyau en béton bitumineux :

L'étanchement des barrages en terre au moyen de noyau bitumineux a pris une très grande importance dans le monde entier et dans toute les zones climatiques, cet élément d'étanchéité (mieux que les autres) satisfait, en effet, aux exigences de sécurité les plus strictes grâce à sa déformation, sa bonne résistance à l'érosion et au vieillissement, et surtout grâce au mode de construction sans joints (Fig. II.2) (*Plaisant, 2013*).

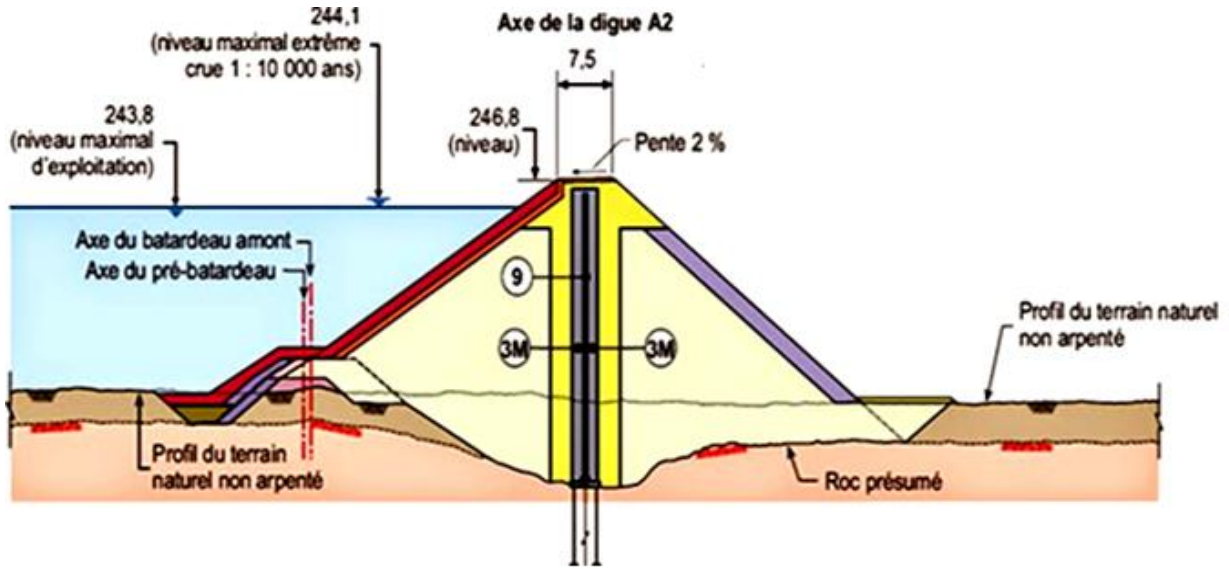


Fig. II.2 : Barrage à noyau en béton bitumineux (pdf-pro.blogspot.com/2014/09/les-barrages-types-de-barrages.html)

II.2.2 Paroi moulée :

La technique de la paroi moulée utilisée, quand on ne dispose pas de matériau argileux pour faire un noyau compacté, on peut réaliser une excavation à partir de la surface.

La tranchée excavée étant maintenue stable par remplissage au moyen d'une boue bentonitique directement chargée en ciment et qui fait prise en quelques jours, donnant naissance à une paroi étanche de perméabilité de l'ordre de 10^{-8} m /s ; ce mur est suffisamment plastique pour subir d'importantes déformation sans se fissurer.

Les parois peuvent être descendues sans difficulté jusqu'à des profondeurs dépassant 50m dans des terrains alluvionnaires dont les éléments ne dépassent pas 20 à 30 m. sur le plan pratique on réalise le remblai du barrage, puis on exécute la paroi moulée en béton d'argile à partir de sa crête (Fig. II.3) (Rolley, 1977).

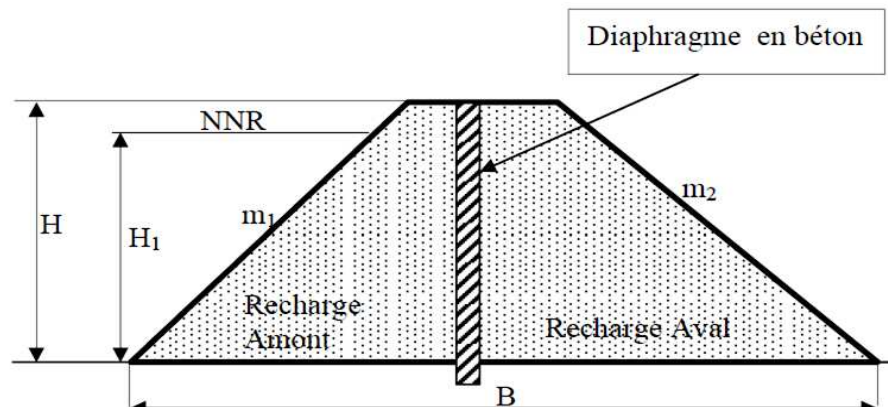


Fig. II.3 : Paroi moulée (Messaid, 2009)

II.2.3 Masque amont :

Avant 1925, beaucoup de barrage en terre étaient pourvu d'un mur vertical en béton ou d'une dalle en béton reposant sur le talus amont. Le motif en était le peu de confiance que l'on avait dans le rôle d'étanchéité à long terme d'un barrage en terre. Beaucoup de ces masques se sont fissurés et ont donné lieu des infiltrations qui, lorsqu'un système de drainage n'avait pas été prévu, ont donné lieu à des accidents.

Depuis 1930, il a été prouvé qu'un massif de sol à fine granulométrie pouvait donner pleine satisfaction au point de vue de la perméabilité de sorte que l'usage de masque en béton a été généralement abandonné pour des barrages en terre.

Par contre, des barrages en enrochement sont actuellement pourvus de masques imperméables constitués en béton armé, en acier ou en béton bitumineux. Il y a des circonstances où l'emploi de tel masque est plus rapide et moins coûteux que l'emploi de noyau argileux.

On n'a toutefois qu'une expérience limitée de ces ouvrages (*Rolley, 1977*).

Dans les barrages à masque, l'étanchéité est assurée par un organe placé à la surface du parement amont ; le remblai ne joue plus que le rôle de support et se trouve, en principe, à l'abri de l'eau de la retenue.

II.2.3.1 Les barrages à masques amont :

Le plus grand avantage de ce barrage est qu'il offre la plus grande sécurité au glissement par rapport à tous les autres types de barrage en terre ou en enrochement. D'ou, pour une même sécurité ; les talus peuvent être plus raides. Ceci résulte des considérations suivantes :

- ✓ Si l'on prévoit une couche drainante immédiatement derrière le masque, celui-ci prévient toute infiltration dans le barrage et donc toute cause de pression interstitielle est supprimée. Ceci permet d'utiliser au maximum les caractéristiques de cisaillement du rocher tant qu'en aval ;
- ✓ Le barrage offre la plus grande masse possible pour résister à la pression d'eau ;
- ✓ La résultante de la pression d'eau sur le masque est dirigée vers le bas est augmente la pression de contact barrage-fondation

En outre on note les avantages suivants (*Anonyme, ?*):

- ✓ En opposition avec les noyaux d'étanchéité situés à l'intérieur du massif, les masques placés sur le talus amont peuvent être inspectés même si le réservoir ne pouvant être vidé, il faut travailler sous eau. Le repérage est la répartition de débit de fuite à travers des noyaux d'argile sont difficile est coûteux ;
- ✓ Les masques peuvent aussi assurer une protection contre les vagues ;
- ✓ Contrairement au cas de noyaux d'argile ; le masque n'est pas soumis à une érosion progressive sous l'action de fuites localisées ;

- ✓ Si l'on aménage la couche drainante sous-jacente en section séparées et si l'on construit une galerie de drainage visitable, on peut localiser facilement les fuites : cette procédure est difficile voire impossible pour d'autres types de barrages ; si l'on utilise des masques en matériaux bitumineux ; il est possible de les prévoir auto-colmatant.

Par ailleurs certaines circonstances favorisent l'emploi de masques sur talus amont à savoir (*Anonyme, ?*):

- ✓ Quand le barrage repose sur une *fondation de rocher dur* et si l'on dispose d'enrochement résistant, le talus amont peut être prévu beaucoup plus raide que s'il faut y apporter un noyau argileux : le talus peut être mis en œuvre avec une pente aussi grande que le permet le massif ;
- ✓ Quand du *matériau à faible perméabilité* n'est pas disponible à proximité ou à faible distance du barrage ;
- ✓ Quand il faut s'attendre à *des vagues importantes* et que les déchets de carrière ne sont pas disponible dans des conditions économiques ;
- ✓ Quand on s'attend à *des tassements différentiels importants* qui peuvent créer des fissures au sein du massif : un masque souple peut éliminer tout incident ;
- ✓ Quand l'ouvrage doit être construit dans de *mauvaises conditions climatiques* ou lorsque les périodes sèches sont trop courtes pour mettre convenablement en œuvre des matériaux fins, le masque peut être une solution économique ;
- ✓ Quand les *ouvrages d'évacuations d'eau* sont fort coûteux, leur longueur et donc leur prix peuvent être diminués en même temps que la largeur du barrage.

Toutefois les barrages à masque amont présentent les inconvénients suivants (*Anonyme, ?*):

- ✓ La durée de vie : Vu que de tel types de barrages sont de constructions assez récente, on n'a pas encore pu tester la durée de vie et cela d'autant plus que les matériaux utilisées sont soumis à l'usure du temps : détérioration du béton, vieillissement du béton bitumineux, corrosion de l'acier ;
- ✓ Le cout plus élevé : Le cout dépend de plusieurs facteurs : type de matériaux, épaisseur, hauteur du barrage, emplacement. Toute autre chose égales, le cout d'un masque en acier est plus grand que celui du masque en béton de ciment ou bitumineux. Plus intéressant devient le prix relatif du masque ;
- ✓ L'expérience limitée : Vu qu'un nombre assez limité de barrage de tels types on été construit ;
- ✓ Le risque de fuite suite au premier remplissage : Des débits de fuite importants peuvent être décelés lors du premier remplissage (fissure dans le béton, rupture de soudure dans l'acier, ...etc.) et on est parfois obligé de vider le réservoir pour procéder à des réparations ;
- ✓ Le danger de fissuration aux pieds du masques : Lorsque la base du barrage a tendance à se déformer, des ruptures au droit de la liaison masque-fondation peuvent

se produire .Pour éviter cet incident, il faut ou bien attendre l'achèvement des travaux de la digue avant de procéder à la liaison ou prévoir une liaison flexible.

II.2.3.2 Les différents types des masques amont :

➤ Masque en béton de ciment :

Le type de masque amont le plus ancien est le masque en béton de ciment. Ce type de masque ne convient pas aux barrages en terre, relativement souple, du fait de la rigidité du masque qui suit les déformations du barrage. En outre les masques en béton de ciment sont sensibles aux agressions extérieures et notamment à celle de l'eau dont les caractéristiques chimiques doivent être prises en compte. Ce type de masque est utilisé sur les barrages en enrochements (*Rolley, 1977*).

La solution préconisée est celle de la dalle découpée par des joints munis de lames d'étanchéité. Les joints sont parallèles et perpendiculaires aux lignes de plus grande pente du parement. Ces joints, outre leur rôle pour limiter les effets du retrait du béton, permettent au masque de résister à une série de déformations de flexion et de compression.

- ✓ Une flexion générale correspondant au déplacement du massif vers l'aval ;
- ✓ Des flexions locales produites par les irrégularités de tassement. Le massif a tendance à ne reposer que sur quelques joints au lieu d'être entièrement appliqué à la surface du massif.

On diminue au maximum les irrégularités en réalisant à l'amont des enrochements arrimés dans lesquels les vides sont remblais au lieu de pierre de différentes tailles.

Pour chaque bande parallèle à la ligne de plus grande pente, une flexion de flambement due aux variations de température apparaît lorsque la retenue est vide, pour minimiser cette déformation, il ne faut pas faire des bandes trop longues, et ménager des joints de dilatation.

Les contraintes de flexion ayant une intensité proportionnelle à l'épaisseur du masque celui-ci devra avoir l'épaisseur minimale compatible avec les conditions d'exécution en particulier en ce qui concerne les distances entre les bords et les armatures

En plus de ces déformations de flexion, il se manifeste une compression parallèle au masque causée par le tassement du massif, ce tassement à un composant parallèle au parement amont et dirigée vers la fondation.

Cette compression n'apparaît évidemment que s'il ya frottement entre le massif et le masque connaissant le coefficient de frottement masque /massif on peut évaluer l'ordre de grandeur des contraintes de compression qui en résultent cette valeurs est élevée on cherche à la diminuer en s'arrangeant pour que le coefficient de frottement soit faible pour éviter les flambements et les contraintes élevées de flexion qui en résultent, on prévoit souvent un parement amont à fruit variable et concavité tournée vers l'amont.

De toute façon, pour résister à ces efforts le béton du masque doit être armé avec 2 couches d'armature, l'épaisseur est de l'ordre de 1% de la hauteur maximale, sa valeur minimum étant de 20 cm, le pourcentage d'acier varie de 0,5 à 1%.

La dalle n'étant jamais étanche, il est nécessaire de prévoir un système de drainage, une solution consiste à placer un drain de 8cm de diamètre tous les 1,50 m, derrière le masque, les eaux étant évacuées par un gros collecteur à la base dans le mur parafouille.

Une dalle de béton armé est réparable, les fissures doivent être rapidement, rebouchées pour éviter la corrosion des armatures, il existe des produits bitumineux ou plastique spécialement conçus pour obstruer les fissures.

En général il se compose de dalles préfabriquées ou coulées sur site avec des joints de dilatation qui atténuent l'effet des déformations du béton (Fig. II.4).

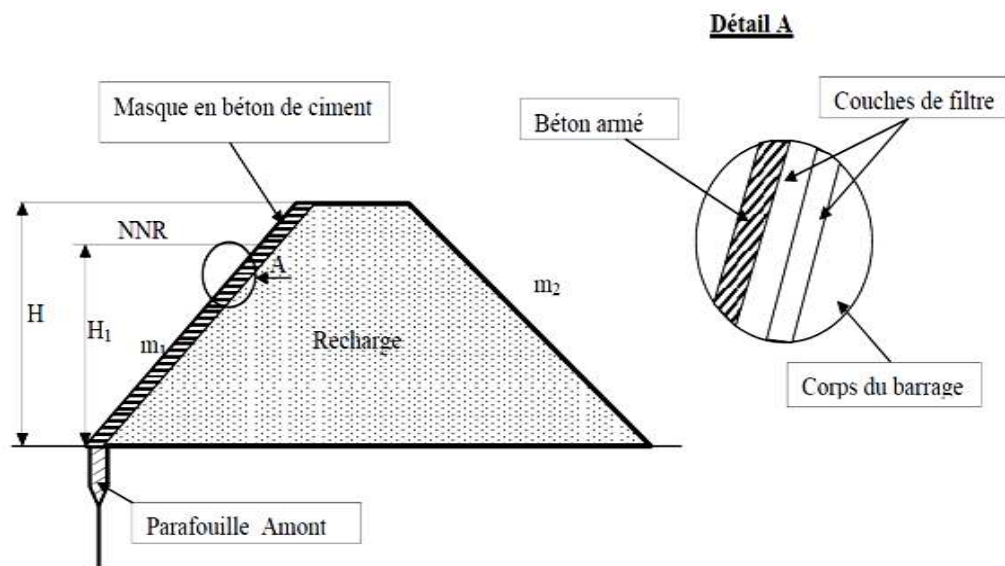


Fig. II.4 : Masque en béton de ciment (Messaid, 2009)

➤ **Masque en béton bitumineux :**

Le masque en béton bitumineux est en générale très efficace du point de vue de l'étanchéité est d'autre part suffisamment élastique et plastique pour suivre les déformations du massif qui le forme sans se dégrader. Il est néanmoins sujet au fluage et doit être protégé contre le vieillissement est assez aisément réparable en cas de déchirure. , La pente du talus amont ne doit pas être inférieure à 1/1,5 en vue de permettre la mise en place du masque, de limiter les contraintes sur celui-ci et la tendance au fluage, il est conseillé de prévoir une pente de 1/2 pour faciliter la mise en place.

Le masque en béton bitumineux le plus complet se compose d'une couche de béton bitumineux filtrant (binder) de 4 à 5 cm d'épaisseur, d'une couche de binder drainant de 10 à 12 cm d'épaisseur ,de deux couches de béton bitumineux étanche de 6 cm d'épaisseur chacune, et d'une couche de finition de peinture de protection thermique superficielle (Fig. II.5).

En ce qui concerne la composition des différentes couches, on pourra se réfère aux compositions ci après, à titre indicatif (*Glebov et Popchenko, 1969*):

- ✓ Binder filtrant formé d'enrobe bitumineux de perméabilité voisine de $(10^{-4}$ à $10^{-5})$ m/s, gravillons concassée (calcaires de préférence) de 2 /10 mm (56%), de sable de 0 /2 mm (44%).
- ✓ Bitume de 60 /70 d'indice de pénétrabilité, de 4 à 5% du poids granulat.
- ✓ Binder drainant de perméabilité de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} m/s.
- ✓ Gravillons concassés (calcaire de préférence) de 2 /20 mm (85%), sable de 0/2mm (15%).
- ✓ Bitume de 60 /70, (3%) du poids de granulat.
- ✓ Béton bitumineux étanche de perméabilité de l'ordre de 10^{-9} m/s.
- ✓ Gravillon concassés (calcaire de préférence) de 0 /12mm (85%).
- ✓ Sable 0 / 5mm, roulé (15%).
- ✓ Filtre total (élément fins de moins de 1mm) contenu dans les gravillons et le sable (13%)
- ✓ Bitume 60/70 8,5 à 9% du poids de granulat.
- ✓ Le brai vinyle, mélange de brai de cokerie, de plastifiant et de chlorure de polyvinyle, permet de remplacer les 2 couches étanches bitumineuses par un revêtement monocouche de 7 à 9 cm d'épaisseur.

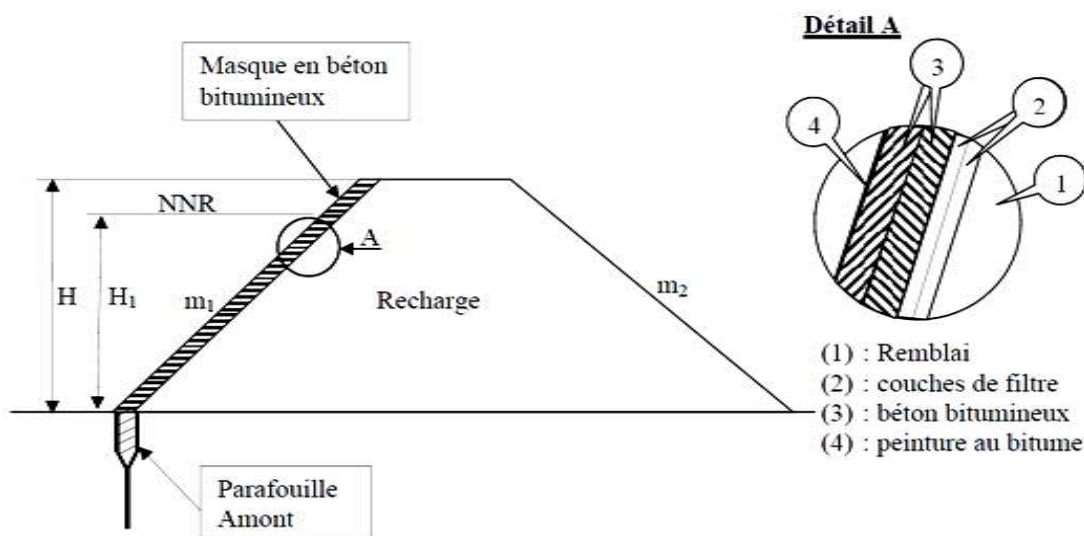


Fig. II.5 : Masque amont en béton bitumineux (*Messaid, 2009*)

➤ **Masque en tôle d'acier :**

La tôle d'acier est très résistante mécaniquement, suffisamment déformable et complètement étanche, les problèmes de corrosion pouvant être surmontés (peinturer bitumineuse, protection cathodique, nuance d'acier peut ou pas oxydable), cette solution peut être intéressante, elle est néanmoins très chère (Rolley, 1977).

Il existe des barrages américains équipés d'une telle protection depuis plus de 60 ans l'expérience prouve que la corrosion y est très faible.

La structure est formée de plaques d'épaisseur minimum de 6 mm, de 3 m de large suivant la ligne de plus grande pente, sur 8 m de longueur. Ces plaques sont ancrées dans le massif par leur milieu, réunies par des joints de dilatation, parallèles aux lignes de plus grande pente et raidies la même direction par des fers plats soudés.

Le talus amont est préparé comme pour recevoir un masque de béton armé.

➤ **Masque en membrane souple :**

Les membranes souples (Fig. II.6) constituent des procédés d'étanchéité relativement récents qui peuvent s'accommoder des déformations parfois importantes du massif support. Certaines d'entre elles offrent une assez bonne résistance chimique et mécanique, toutefois elles sont généralement sensibles aux poinçonnements et aux chocs pouvant provoquer des déchirures, ce qui conduit à interdire les supports à grains anguleux et à limiter la vitesse de l'eau à leur contact, certaines membranes, en particulier les membranes bitumineuses, sont sensibles au développement de végétations à partir de racines ou de graines sous les revêtements, ce qui impose des précautions particulières (Rolley, 1977).

Les principaux produits utilisés sont les élastomères et notamment le butyle de caoutchouc, les matières plastiques et les produits bitumineux.

• **Le butyle- caoutchouc :**

Est un matériau intéressant en raison de sa résistance mécanique élevée, sa grande élasticité, de son inertie chimique à peu près complète et de sa très grande imperméabilité, c'est un caoutchouc synthétique vulcanisé, il se présente en feuilles en 3 mm d'épaisseurs, 1 mm, 1,5 mm et 2 mm, et sous forme de rouleau de 1 m à 1,80 m de large sur 20 à 50 m de long, les feuilles peuvent être soudées en usine sous formes de lés plus importants adaptés au projet (Rolley, 1977).

La mise en place est relativement aisée : les feuilles ou surfaces préfabriquées sont déroulées sur le support préalablement expurgé des éléments durs et anguleux, et soudées, soit à froid au moyen de bandes adhésives et de colle soit par vulcanisation au moyen d'un appareil de chantier spécial, la soudure par vulcanisation a une meilleure résistance mécanique, la soudure à froid et doit être pratiquées de préférence.

Malgré la bonne résistance mécanique du butyle, il est recommandé de protéger la feuille d'étanchéité contre les agressions mécaniques extérieures par un revêtement de sable et enrochements ou de dallâtes de béton préfabriquées, néanmoins les réparations locales sont relativement aisées si le revêtement butyle est accessible et on peut, dans certains cas, éviter la protection mécanique.

Il existe d'autres films ou feuilles minces en élastomères ou matières plastiques, d'épaisseur comprise entre 0,5 et 2 mm. Ces feuilles, très souples, sont souvent armées, elles sont fragiles et doivent toujours être mises en œuvre avec beaucoup de soins et être protégées extérieurement dans la plupart des cas.

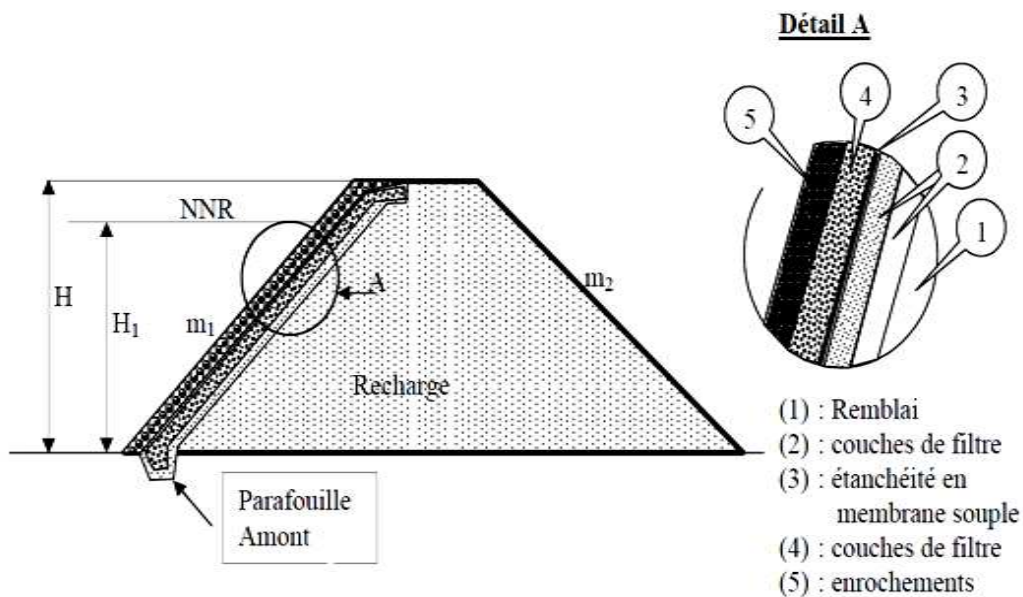


Fig. II.6 : Masque en membrane souple (Messaid, 2009)

- **Les membranes en bitume enterrées :**

Sont réalisées par épandages de bitume à chaud directement sur le talus, en plusieurs couches. La résistance de la membrane est renforcée par armature tissus de verre, feutres synthétiques placée entre les couches de bitume. La membrane de 6 à 10 mm d'épaisseur est protégée par une recharge en matériaux terreux ou en tout venant. Les membranes en bitume sont souvent utilisées pour étancher les bassins de retenue. Les pentes des berges à étancher ne doivent pas être supérieures à 1 /2.

- **Les membranes bentonitiques :**

C'est une méthode plus ancienne, mais efficace, assez bon marché, et encore utilisée pour étancher les fonds de retenues, s'obtient, soit en couche de bentonite pure, à raison de 4 kg/m², soit en mélange avec le sol naturel s'il y prête, ou avec du sable, elle doit être protégée par une recharge.

Étant donné les faibles caractéristiques mécaniques de la bentonite, son emploi en couche pure est déconseillé sur les pentes, sauf si elles sont extrêmement faibles sur des talus à

pente faible, il est conseillé d'utiliser plutôt un mélange de bentonite et de sable, ayant un angle de frottement interne suffisant.

Il existe des procédés récents qui consistent à utiliser des mélanges de polymères synthétiques gonflables à l'eau et de bentonite. On obtient ainsi une meilleure liaison de l'étanchéité et du sol support ce qui donne une bonne imperméabilisation.

II.2.3.3 Le Parafouille :

La liaison entre le masque étanche et le rideau d'étanchéité des fondations se fait par l'intermédiaire d'un parafouille et doivent être traité avec beaucoup de soin.

Il faut éviter les raccords perpendiculaire, et aménager des surfaces de raccordement tangentiels et arrondies en prévoyant des surépaisseurs de béton bitumineux au niveau des raccords, et un ouvre joint de surface de part et d'autre de ces raccords, (Fig. II.7) le couvre joint peut être constitué par exemple de deux couches de toile de verre imprégnées de bitume et collées par un bitume chaud sur une largeur de 2 à 3 m, en cas de fuite au niveau du raccord masque – parafouille, le gradient hydraulique vers le drain et le massif perméable étant élevé il peut se former rapidement un renard important (Rolley, 1977).

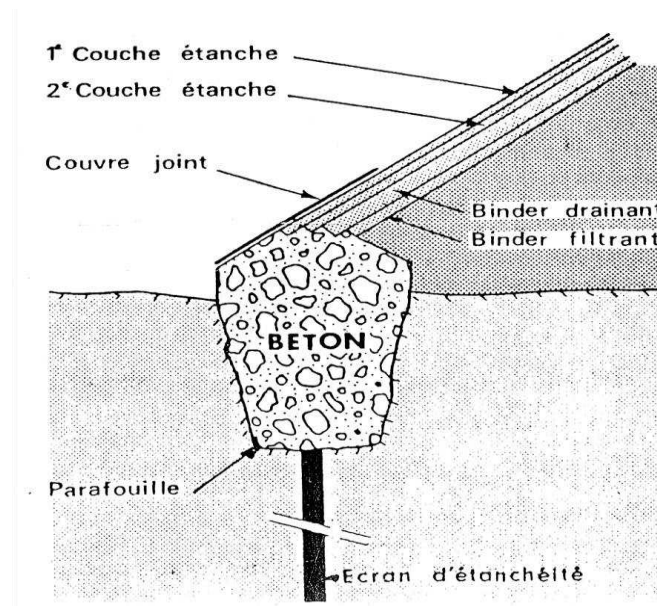


Fig. II.7 : Raccordement d'un masque étanche au parafouille (Rolley, 1977).

Ce raccordement doit être plus ou moins articulé. Si la fondation est très rigide (rocher), le parafouille est fixe et le masque suit le massif dans ses déformations. Si la fondation est compressible, le parafouille a tendance à s'enfoncer et à se déplacer vers l'amont.

On comprend pourquoi, si le masque est trop rigide, l'étanchéité est difficile à réaliser, et si une fuite se produit, le gradient vers le drain et les enrochements est énorme (trajet très court).

En cas de fondation alluvionnaire, une telle fuite peut entraîner, en un temps très bref, la ruine complète de l'ouvrage. A chaque fois qu'on le peut, il y a intérêt à mener le para fouille jusqu'au rocher sain.

Dans le cas des ouvrage importants, le para fouille est un organe complexe avec galeries de visite ou débouchent les drains (Fig. II.8) (Rolley, 1977).

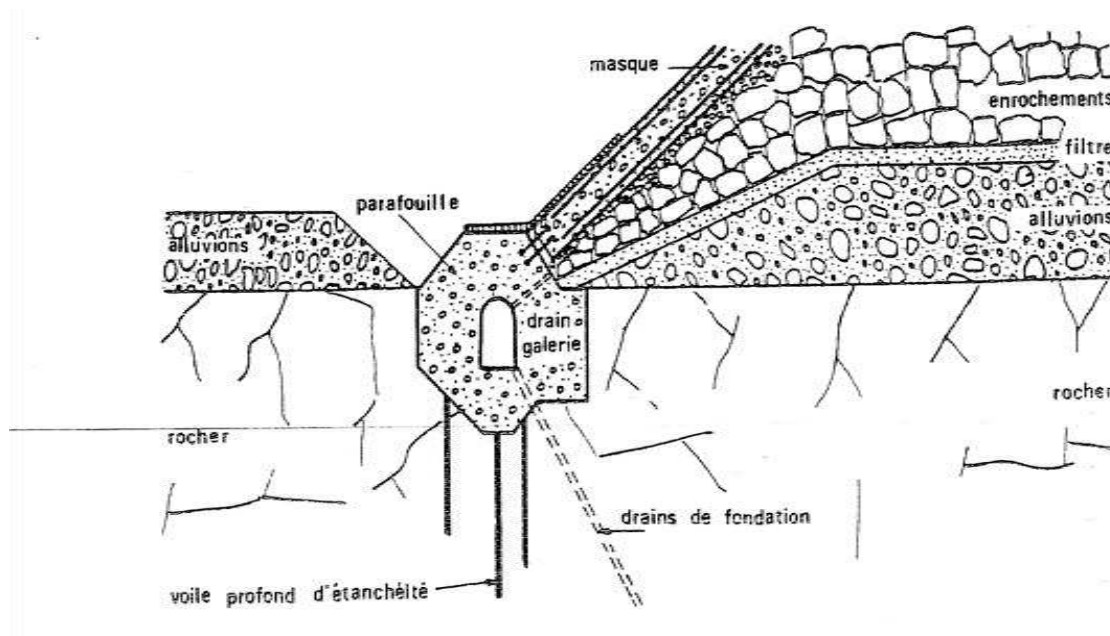


Fig. II.8: Para fouille avec galerie de visite (Rolley, 1977).

II.2.4. Les géomembranes :

Les géomembranes sont des produits étanches, minces, souples, continus dont l'épaisseur est de 1 mm au minimum ; Les produits commercialisés sont très variés ; Les principales catégories sont :

- Les géomembranes bitumineuses (Fig. II.9) : bitumes soufflés ou modifiés par ajout de polymères ;
- Les géomembranes plastomères : PVC (polychlorure de vinyle), PEHD (polyéthylène haute densité)...
- Les géomembranes élastomères : butyl, EPDM (éthylène propylène diène monomère)...

Une bonne conception et une pose soignée permettent d'assurer une bonne tenue dans le temps de ce produit dont les premières applications datent de la fin des années 60.

Les géomembranes sont fabriquées en usine et livrées en rouleaux (appelés lés) de quelques mètres de largeur ou en panneaux préassemblés en atelier de 200 à 1 000 m². Les raccordements des lés ou des panneaux sont réalisés sur le site par soudure ou par collage.

Cette opération doit être réalisée avec un grand soin en respectant certaines règles selon les produits (exemple : limites de température). Sur un parement de barrage, les joints

horizontaux sont à proscrire à cause de leur plus faible résistance vis-à-vis des efforts de traction susceptibles de se développer (*Cazzuffi et al., 2012*).

En ce qui concerne le support de la géomembrane, deux éléments sont à considérer :

- Le risque de poinçonnement, de déchirure, dû à un support trop agressif, soit dès la pose, soit ultérieurement sous l'effet du poids de l'eau ; en plus d'une recherche d'amélioration de la surface du support granulaire, il est souvent ajouté un géotextile de protection, indépendant ou bien associé en usine à la géomembrane ;
- Le risque de sous-pressions lors d'une vidange dû à des fuites toujours possibles et à un matériau de remblai insuffisamment perméable ; une couche bien drainante continue sous la géomembrane et des exutoires à la base du remblai permettent l'évacuation des eaux au pied aval du barrage.



Fig. II.10: Mise en place d'une géomembrane bitumeuse (<http://www.cfg.asso.fr/les-membres/presentation/activite/3>).

Conclusion :

Le caractère plus ou moins perméable des matériaux des barrages en remblai impose la nécessité d'un organe étanche qui permet le stockage de l'eau et assure l'étanchéité totale du barrage.

Ce chapitre constitue une synthèse documentaire sur l'étanchéité des barrages en remblais, objet du présent travail, ou on a exposé l'ensemble des différents types d'organes d'étanchéité d'anciennes et nouvelles méthodes utilisés dans les barrages en remblais.

Le choix de l'organe d'étanchéité à basé sur plusieurs critères comme le débit de fuite, les pressions interstitielles, et essentiellement l'étude technico-économique.

Chapitre III : Les barrages à masque en béton bitumineux

Introduction :

De nos jours, l'étanchéité des barrages en remblais est effectuée par le bitume. Ce type d'étanchéité également se révèle être avantageux dans le cas des grands barrages et pour l'eau d'irrigation, l'eau potable et de l'eau pour des usages industriels. Les revêtements à base de bitume sont également appropriés pour le remplacement ou superposant les anciens scellements faits de matériaux en béton ou minérales, qui sont devenus moins efficaces pour une raison ou une autre.

Le béton bitumineux assure l'étanchéité des barrages, et il peut être utilisé sur toute inclinaison du barrage en remblais où il a la capacité de prendre le mouvement de la fondation sans aucune perte de l'étanchéité, en raison de sa flexibilité suffisante. Les couches du béton bitumineux ont assez de durabilité en raison de la faible teneur en air dans les couches compactes, ce qui réduit l'effet du climat à ces couches (*Fadel, 2005*).

III.1 Historique :

L'ouvrage le plus ancien, connu à ce jour, construit en utilisant du béton bitumineux (mélange de bitume et de granulats) afin de pouvoir stocker de l'eau est un réservoir situé dans la vallée de l'Indus (proche de l'actuel Pakistan) et qui daterait de presque 5 000 ans. Ce réservoir serait encore aujourd'hui fonctionnel (*Wang et Hoeg, 2011*). Le bitume qui fut alors utilisé était récupéré au niveau de la surface de l'écorce terrestre.

L'utilisation du bitume dans la construction des réservoirs ainsi que dans d'autres ouvrages met en évidence deux faits : le premier est que le bitume, en tant que matériau étanche, est utilisé depuis des millénaires et le second, que ce matériau possède de très bonnes propriétés de longévité.

L'emploi du bitume s'est rapidement répandu à travers le monde. Il fut utilisé tour à tour dans la construction de puits, de canaux, de réservoirs, de salles de bain, de bassins de rétention d'eau, de protection des berges, et de brise-lames afin de prévenir l'érosion des terres (*Van Asback, 1962*). Le constant, dans toutes les utilisations, qui ont été faites, réside dans l'emploi de ce matériau pour ses caractéristiques imperméables et sa résistance aux différentes sollicitations (mécaniques et climatiques).

Ce n'est qu'au milieu du vingtième siècle que l'on voit apparaître l'utilisation régulière du bitume dans des ouvrages en remblais, de type digue ou barrage. Plus exactement, la première réalisation d'un tel ouvrage utilisant un masque en béton bitumineux remonte à 1923 en Zambie, avec la construction du barrage de Mulungushi (Fig. III.1), Le barrage est de 46 m

de hauteur, a été construit avec les micaschistes friables. Le masque en béton bitumineux à une épaisseur de 100 mm jusqu'à la crête du barrage, Il a été formé par un mélange de gravier et de bitume. Selon Legge (1970), peut-être il est devenu fragile par l'influence de la haute température ambiante et du soleil qui prévalent dans cette région avant que les pluies commencent, et n'était donc pas capable de fléchir la charge sous l'eau tout en étant soumis à des tassements importants (Justo, 1991).

Des mesures correctives ont consisté principalement dans le déversement du matériau imperméable à l'eau et sur la face amont (Fig. III.1). L'opération a duré quatre ans (jusqu'en 1929), à la fin de laquelle certains 115000 m³ de matériaux ont été sous-évalués et les fuites arrêtées. Le niveau d'eau avait, alors, à chuté suffisamment pour exposer la partie supérieure de la couverture d'argile. Un parement en béton armé a été construit sur elle, qui a prolongé quelque mètre sous la couverture.

Après la réparation du barrage, il a fonctionné de manière satisfaisante, sans aucun signe de fuite importante, pendant au moins 40 ans (Justo, 1991).

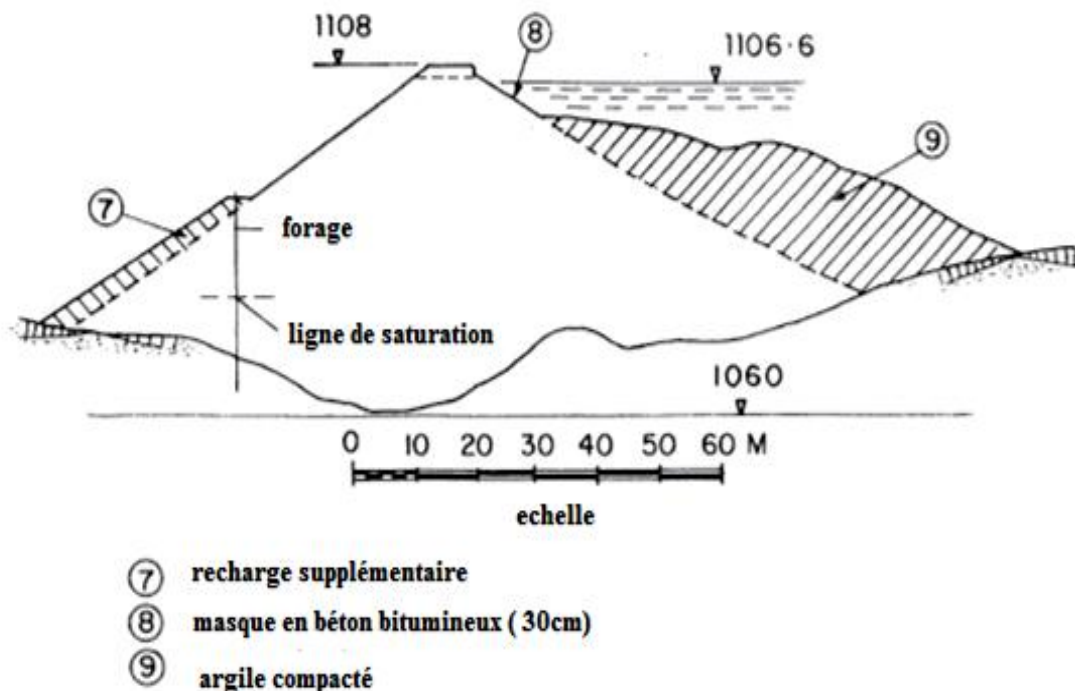


Fig. III.1 : Coupe transversale du barrage Mulungushi (Zambie) après réparation (Legge, 1970).

III.2 Evolution des barrages à masque en béton bitumineux dans le monde :

Il y a environ 367 barrages en remblais avec un masque amont en béton bitumineux, Ils ont été assemblés dans le monde. La figure III.2 montre le pourcentage des barrages munis des masques en béton bitumineux réparti sur les continents. La plupart des barrages ont été construits en Europe continentale, où la technologie du béton bitumineux a été initialement développée, et utilisé principalement dans des endroits où il y a une absence de terre naturelle étanche (Justo, 1991).

Plus de 50 dossiers ont été trouvés de barrages construits (Tab. III.1). Les réparations les plus fréquents comprenaient le recouvrement de mastic qui a été suivies par des réparations locales de face ou de réparation du béton bitumineux de plus grande couche inégale et des joints de contact avec la plinthe.

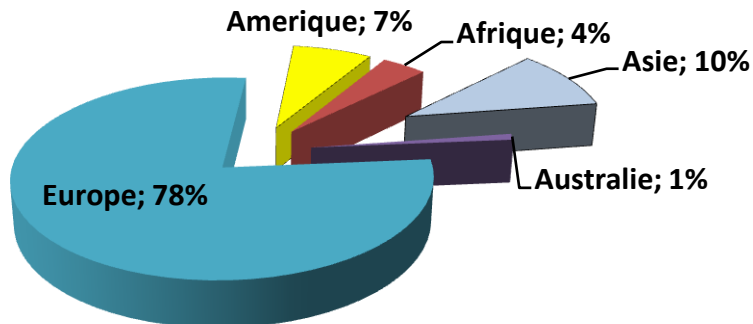


Fig. III.2 : Allocation de barrages à masque amont en béton bitumineux dans le monde (Justo, 1991).

Tableau III.1: Performance des barrages en enrochement avec parement en béton bitumineux (ordre chronologique) modifier (Justo, 1991).

Nom du pays et année d'exploitation	Hauteur (m)	Pente (m/m)	Construction	Performance
Mulungushi (Zambie) 1923	46	2	Déversement	1925 : Une fissure apparue parallèle à la pente, plus large au niveau de la crête
Bouhniafia (Algérie) 1937	53	0.8-1	Manuel, mât de charge	Détérioration du revêtement externe. Fissuration progressive et glissement de 1938 à 1970 (couche de 35 cm coulissante)
Genkel (Allemagne) 1952	43	2.25	Vibration, rouleau et compactage	Fissures près de berme
Ghrib (Algérie) 1953	72	0.71	Manuel, mât de charge	1953 : Quelques plaques du béton armé glissées vers le bas: couche imperméable en bon état. 1963 : Séparation de plaques du béton bitumineux; conception pour la reconstruction
Iril emeda (Algérie) 1954	75	1.6	Compactage, rouleau et vibration	Problèmes satisfaits
Perlenbach (Allemagne) 1954	18	1.75		Renouvellement de la couche d'étanchéité et joints en 1985
Sarno (Algérie) 1954	28	2-2.5		

Henne (Allemagne) 1955	58	2.25	Compactage, Vibration	Excellent, léger décollement de mastique.
Riveris (Allemagne) 1955	45	2		Bon état
Montgomery (USA) 1957	37.5	1.7	Déversement	Certains joints ouverts proche de la crête.
Wahnbach (Allemagne) 1957	45.6	1.6	Compactage et vibration	Aucune réparation ou maintenance
Steinbach (Allemagne) 1963	40	1.75	Rouleau	Aucun dommage
Venema (Norvège) 1963	51	1.7	Vibration, Rouleau	Aucun dommage
Bigge (Allemagne) 1964	56	1.6	Vibration, compactage	
Eggberg (Allemagne) 1964	31.5	1.75	Rouleau	Aucun dommage.
Sainte cecile d'andorge (France) 1967	42	1.7		Très bon comportement du revêtement étanche
Almandra (Espagne) 1968	30	1.75	Vibration sans pression	
Otsumata (Japon) 1968	52	1.7		Bon état
Alesani (France) 1969	65	1.6		Aucune fissure. Certaines fuites dans le dernier joint de la galerie.
Coo lower (Belgique) 1969	30	2		
Santillana II (Espagne) 1969	46	1.7	Vibration, Rouleau	Surface du masque fissurée, certains flux, excellent résultat
Dungonnell (Royaume unie) 1970	17	1.7		Certains joints de couche forment des rides de 10mm de profondeur après une sécheresse prolongée
Ogliastro (Italie) 1970	22.2	2-2.4	Vibration, Rouleau	
Konoyama (Japon) 1971	33	1.8		Ouvertures au niveau des joints, bon état après la réparation
Salagou (France) 1971	63	1.5		Aucun dommage
Dorlay (France) 1972	44	1.7		Excellent
Guajaraz (Espagne)	48	1.75	Vibration,	Bien

1972			Rouleau	
Scotts peak (Australie) 1972	46	1.7	Vibration, Rouleau	Fissure subhorizontale au contact du gravier et l'enrochements, et apparition d'un trou de 1 m de long et 0,5 m de large. érosion interne de gravier de butée.
Obernau (Allemagne) 1972	64	1.2		
Miyama (Japon) 1973	75.5	1.5		Bien
Tataragi (Italie) 1973	64.5	1.8		Bien
Vallon Doll (France) 1973	45	2		Ecoulement local de 6 cm au pied de boucle du béton armé
Winscar (Royaume unie) 1974	53	1.7	Vibration et rouleau	Fissures de surface avec le ponceau
Licheyu (Chine) 1977	57	1.75	dynamitage directionnelle	Fissures des joints avec la plinthe a 36.6 m. Grands fléchissement relatif à 15 cm
El Siberio (Espagne) 1978	82	1.6	Vibration, Rouleau	Plinthe déplacé 6 cm vers le bas est brisé. Deux fissures ont continué 1,8 m dans le bitume.
Prims (Allemagne) 1978	62	1.75	Rouleau	Aucun dommage
Shibianyu (Chine) 1978	85	1.8	Dynamitage directionnelle	Apparition des grottes, et fissures.
Grossee (Australie) 1980	57	1.5		Défaillance et dépression. Défauts en contact avec la plinthe. Réparation complète de la partie inférieure est nécessaire 63%.
Hochwurten (Australie) 1980	55	1.65		Le contact avec la plinthe est endommagé. Dépressions et fissures. Parement imperméable à 75%
Verney (France) 1982	42	1.2		
Negratin (Espagne) 1985	75	1.6	Vibration	Aucun dommage
Anchal (France) 1986	25	2		
Sabigawa (Japon) 1988	90.5	2		

Radoina (Yougoslavie) 1989	42	0.8	Compactage	Aucun dommage
Martin Gonozaló (Espagne) 1989	55	1.5	Vibration, Rouleau	Aucun dommage.
Huesna (Espagne) 1990	71	1.6	Vibration et rouleau	Excellent
La galobe (France) 2000	33		Vibration, Rouleau	
Oued Elguettara (Lybie) 2003				
Al sourani (Syria) 2004	41.3	1.25	Compactage	
Chabrouh (Liban) 2007	63	1.7	Vibration, compactage	

• **Défaillance des masques en béton bitumineux :**

Les données ont été organisées en termes de régime avant la période de reconstruction (Fig. III.3). Les défauts étaient ceux qui ont eu lieu au cours des cinq premières années d'exploitation. Ceux qui ont été causés principalement par des raisons technologiques et de mauvais entretien du masque en béton bitumineux.

Les dommages moins graves ont été représentés par des fissures locales, ou des glissements. Les défaillances sont survenues plus après vingt ans de fonctionnement, le maximum de réparations a eu lieu après la période de 30 à 35 ans qui est la durée de vie du béton bitumineux (*Jaromir et Buchtovi, 2005*).

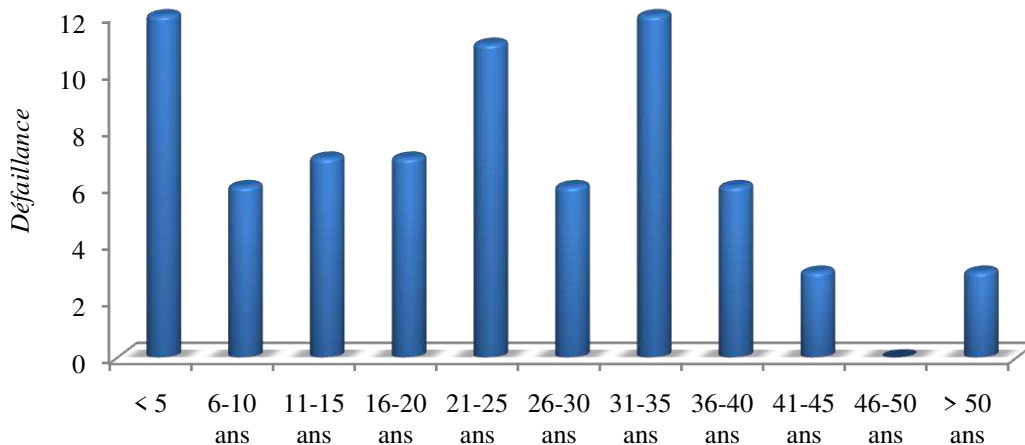


Fig. III.3 : Défaillance des masques en béton bitumineux avant la période de reconstruction (*Jaromir et Buchtovi, 2005*).

Le bitume utilisé en matière d'étanchéité a une durée de vie d'environ 30 ans généralement, mais la durée de vie du mastic bitumineux est environ 15 ans. Dans les endroits où le mastic souffre d'une action de glace ou de soleil et d'une oscillation fréquente du niveau d'eau dans la retenue, la durée de vie diminue habituellement à 5 ans.

D'une manière similaire, une analyse a été faite avec les régimes où aucune donnée de reconstruction n'avait été disponible (Fig. III.4) (*Jaromir et Buchtovi, 2005*).

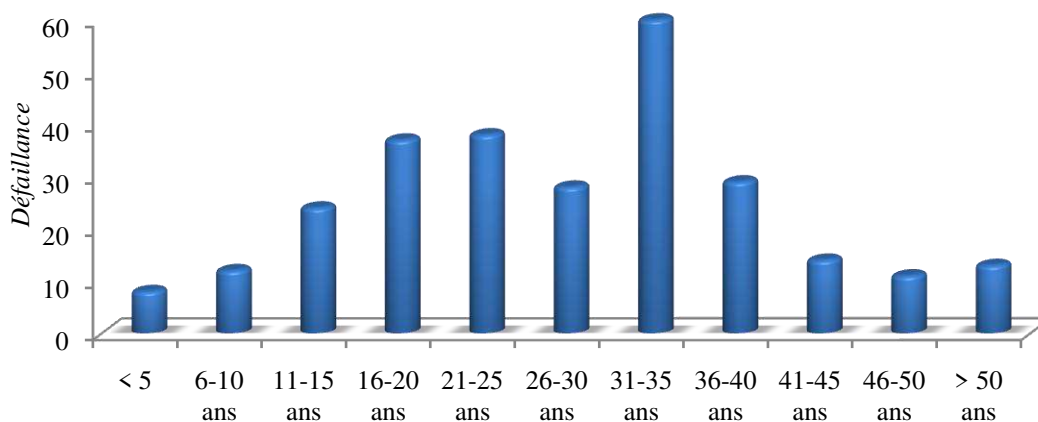


Fig. III.4 : Défaillance des masques amont en béton bitumineux sans données de reconstruction (*Jaromir et Buchtovi, 2005*).

III.3 Types des revêtements des masques en béton bitumineux:

Le revêtement bitumineux des barrages reste la technologie privilégiée pour tous les types de barrages en remblais, en raison de son efficacité prouvée, sa fiabilité et sa durabilité. Cette technologie basée sur une large utilisation du bitume avec ses différentes formes d'applications (émulsions, béton, mastic), qui prouve sa longévité et sa validité, malgré les grands progrès technologiques des dernières années. Les revêtements bitumineux sont largement utilisés dans les travaux qui impliquent des ressources sensibles comme l'eau (Fig. III.5).



Fig. III.5: Barrage d'Oued El Guattara. Lybie, 2003 (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

Il y a deux types de revêtements utilisés aujourd'hui, que nous avons appelés types A et B, nous allons les décrire à partir de la couche en contact avec la face: en barrages modernes pierres de petite taille (couche de transition).

La structure de type sandwich (type A) a été appliquée, dans au moins 23 barrages et réservoirs en enrochements, et constituée, dans le cas le plus complet, des couches suivantes (Fig. III.6):

1. Un traitement d'amorçage avec un liant bitumineux ou de ciment de la plate-forme afin d'assurer l'adhérence de la surface de la couche de transition du barrage, et pour fournir une surface de travail adaptée pour supporter l'équipement de la mise en place et le compactage de la couche suivante. Elle est appelée couche d'accrochage ou de stabilisation.
2. Une couche de nivellement faite de gravillons enrobés ou enrobés bitumineux, de 3 à 8 cm d'épaisseur. Il a également la fonction de liaison entre la plate-forme et de la couche suivante.
3. Une couche imperméable secondaire de béton bitumineux dense, de 4 à 7 cm d'épaisseur.
4. Une couche de drainage, généralement en enrobé bitumineux graduée, de 6 à 12 cm d'épaisseur.
5. Une couche de liaison de béton bitumineux ou enrobé. Quand il a existant entre 2 et 6 cm.
6. Une couche imperméable primaire de béton bitumineux dense, de 6 à 12 cm d'épaisseur.
7. Une couche d'étanchéité de mastic appliqué à chaud (2 à 4 mm), utilisé pour sceller les pores de surface, une telle couche de scellement empêche les changements dans les propriétés du bitume par oxydation à l'air et par le rayonnement solaire ainsi que l'attaque de glace (Schönian, 1990).

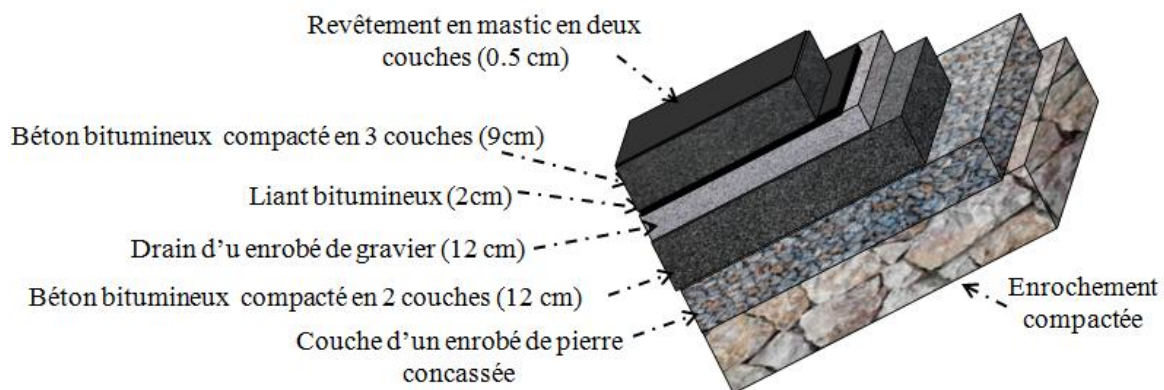


Fig. III.6 : Revêtement Type A du barrage de Genkel (Allemagne) (Justo, 1991).

Le revêtement de type B peut avoir la même structure que celle de type A, excepter la couche imperméable secondaire, avec les particularités suivantes:

1. Le nivellement du bitume peut être d'une épaisseur de 3 à 10 cm quand il existe ;
2. La couche de drainage existe seulement dans quelques barrages en enrochements (Vallon Doll, Legedadi, Valea de Pesti, Sainte Cecile D'Andorre).

3. Le liant bitumineux perméable est de 2.5 à 12 cm d'épaisseur, et peut ne pas exister (barrage de Guajaraz en Espagne, Valea de Pesti en Roumanie et Ron Hausen en Allemagne).
4. Le nivellement ou la couche de liaison existent toujours.
5. La couche imperméable doit être de 7 à 12 cm d'épaisseur. Les joints entre les voies de finition adjacents devraient être légèrement réchauffés et encore compactés par des pilons chauffés.

Dans certains cas, la structure de type B peut être extrêmement simple (Fig. III.7).

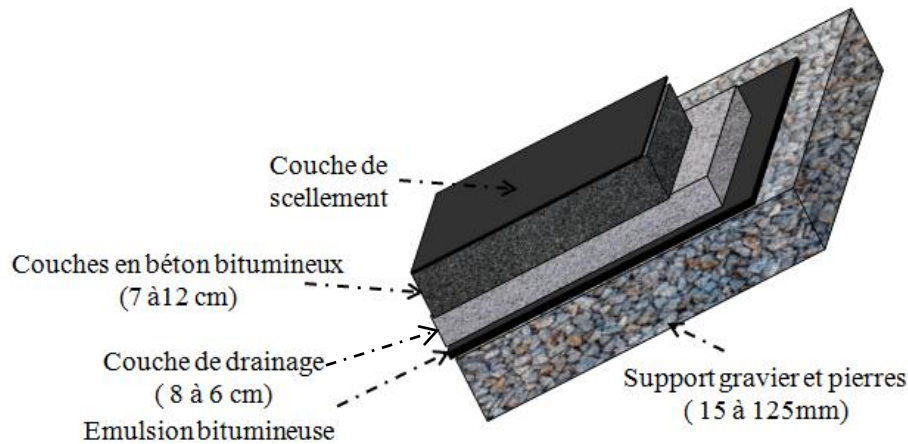


Fig. III.7 : Revêtement Type B du barrage en enrochements de Huesna (Espagne) (Justo, 1991).

III.4 Les grands barrages à masque en béton bitumineux :

Parmi les grands barrages à masque en béton bitumineux, Ghrib, Bouhnifia en Algérie et Radoina en Yougoslavie, avec des parements amont plutôt raide (de pente 1/0.7 à 1/ 0.8). Le premier entre eux, c'est bien le barrage de Ghrib, à une hauteur de 72 m et construit en 1935, est un point de repère dans l'histoire de la construction des barrages (Justo, 1991). Avec une face imperméable composée d'une couche de béton bitumineux de 9 à 12 cm d'épaisseur, supportée par une couche de béton poreux de 12 à 20 cm d'épaisseur et couvert par des dalles en béton armé poreux comme une défense contre les rayons du soleil et les chutes de pierres.

Dans la plupart de ces barrages les dalles de béton ont progressivement glissé vers le bas et ont finalement été retirés.

Le barrage d'Ighil Emda, 75 m de haut, a été construit en 1954 avec revêtement similaire, mais avec des enrochements compactés, une pente moins raide (1: 1.6) et non poreux renforcé la protection du béton.

L'Allemagne, commence en 1952, avec le barrage en enrochement de Genkel, 43 m de haut, une série de barrages en enrochements bien compacté avec une face en béton bitumineux (type A) formé par une structure sandwich (Fig. III.8) constitué d'une couche de drainage en béton bitumineux comprise entre deux couches denses en béton bitumineux. La

raison de cette structure particulière est la collecte des eaux d'infiltration et de faire des mesures au niveau de la galerie de drainage (Fig. III.9).

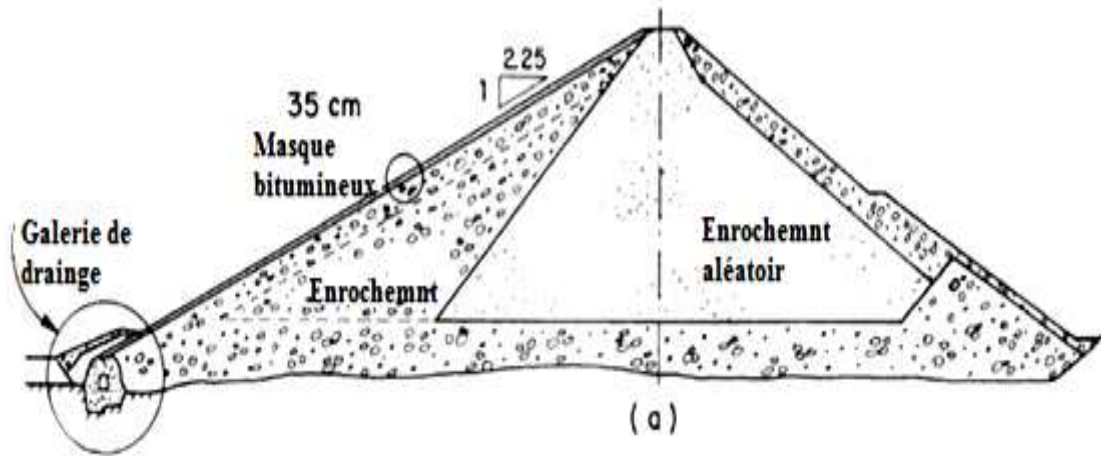


Fig. III.8 : Barrage de Genkel. Section typique avec détails du masque (Sherard et al., 1963).

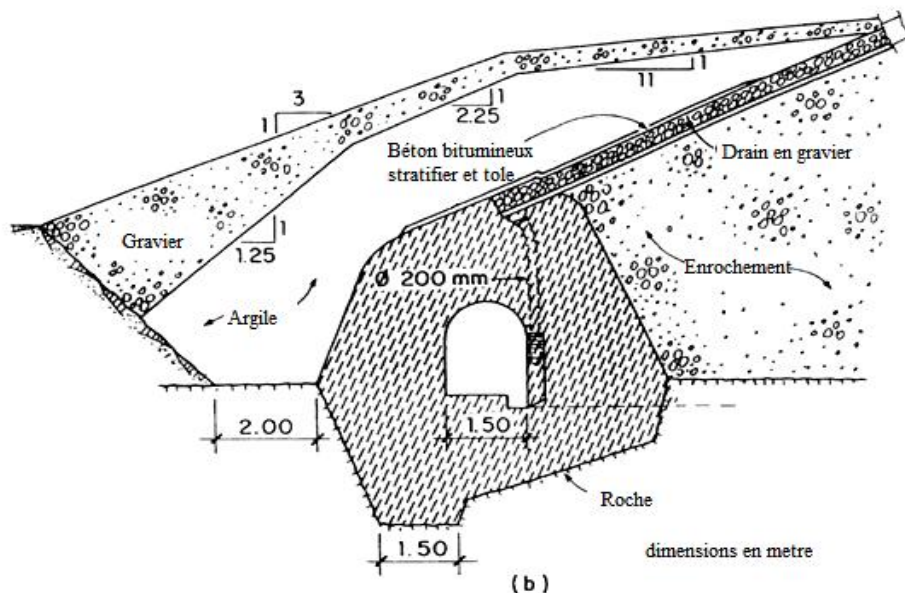


Fig. III.9 : Détails de la galerie de drainage au pied amont du barrage de Genkel (Sherard et al., 1963).

Vers 1954, les Allemands commencent un second type de visage béton bitumineux (type B), dans lequel une couche de liaison, suivie d'une couche imperméable en béton bitumineux dense, se superpose à une couche de nivellement. La série est initiée avec le barrage de Perlenbach, suivi par Kessenhamm, Ulmbach, Eggberg, Ronkhausen, Wehra, Weilerbad, Kronenburg et le réservoir supérieur Langenprozelten (1975) (Justo, 1991).

Le barrage de Montgomery de 34.5 m de hauteur, construit en 1957 dans l'U.S.A, est le premier barrage avec succès en enrochements déversé. Ce barrage est le premier barrage qui utilise le type B dans la construction du masque, dans ce type les gradients de déplacement de la face sont assez petits.

En 1977 et 1978, les parements en béton bitumineux sont appliqués sur deux barrages en enrochement chinois, le barrage de Shibianyu (85 m) et le barrage de Licheyu (57 m), les deux barrages ont subi des dommages importants et des fuites qui semblent avoir été réparées avec succès.

Le record des barrages en remblais à masque en béton bitumineux, selon nos recherches, est le barrage de Sabigawa d'une hauteur de 90.5 m, construit au Japon en 1988.

Il est, à l'heure actuelle, une tendance à l'utilisation des pentes raides en amont, jusqu'à 1/1,5. Comme exemples, le barrage de Martin Gonzalo(1990), en Espagne, de 55 m de haut, en Autriche Grosse (1980), 57 m de haut, et en France Salagou (1971), 63 m de haut (*Justo, 1991*).

III.5 Expérience algérienne :

L'expérience de l'utilisation des masques d'étanchéité amont en béton bitumineux est peu répandue en Algérie, elle est surtout présente au niveau du Barrage de Ghib (1926-1938), Bouhnifia (1930-1941) et Sarno (1947-1954) et Ighil Emda (1947-1954) (Fig. III.10).

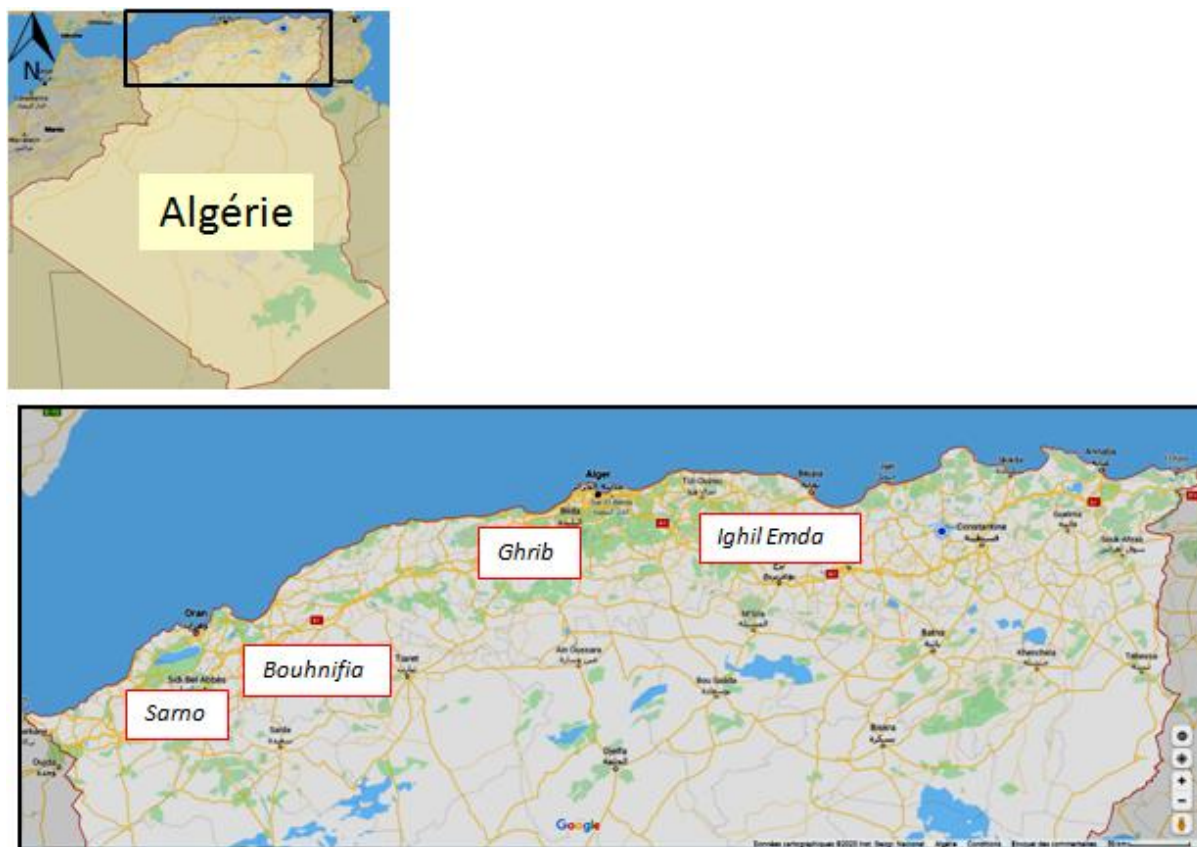


Fig. III.10 : Situation des barrages à masques amont en béton bitumineux en Algérie (*google maps*).

III.5.1 Barrage de Bouhnifia (wilaya de Mascara) :

Le barrage de Bouhnifia (Fig. III.11) est construit entre 1930 et 1941 sur l'Oued El hammam qui prend sa source dans les monts de Daïa et se termine dans les marais de la

Macta. Il s'agit d'un ouvrage en enrochements avec masque amont en béton bitumineux. Le masque assure sans défaillance son rôle d'étanchéité, le débit annuel moyen de l'oued atteint $106 \text{ m}^3/\text{s}$ (ANBT, ?).



Fig. III.11 : Le barrage de Bouhnifia , Mascara (http://encyclopedie-afn.org/Barrage_-_Bouhnifia).

II.5.1.1 Les principales caractéristiques du barrage :

- Surface du bassin versant: 7850 km^2 ;
- Altitude de la retenue normale : 295 m ;
- Capacité totale initiale : 73 hm^3 ;
- Longueur en crête : 464 m ;
- Largeur du couronnement : 5 m ;
- Fruit du talus amont variable de : $0.8/1$ à $1/1$;
- Fruit du talus aval : $5/4$;
- Largeur du massif à la base : 137 m ;
- Cube d'enrochements : 765000 m^3 ;
- Capacité de la cuvette : 72106 m^3 .

III.5.1.2 Structure du masque étanche :

- Le parement amont est constitué par des blocs choisis et rangés de façon à former des gradins, ceux-ci sont recouverts d'une maçonnerie de 0.40 m d'épaisseur qui régularise la surface du parement. Les têtes des moellons sont complètement enrobées dans un béton de ciment poreux drainant qui présente une surface plane sur laquelle repose le masque étanche (Fig. III.12).
- Une couche drainante en béton poreux de 0.12 m d'épaisseur ;
- Une première couche étanche de 0.06 m d'épaisseur, en béton bitumineux. Cette couche est armée d'un grillage métallique à simple torsion qui est accroché à un chevêtre en béton armé encastré dans les tranches supérieures du massif. Ce grillage était mis en tension avant épandage du béton bitumineux.
- Une deuxième couche étanche de 0.06 m d'épaisseur, en béton bitumineux identique à la première mais ne comportant pas d'armature. La liaison des deux couches bitumineuses est assurée par un enduit de bitume fluxé à l'essence. C'est pour permettre un meilleur

compactage du béton bitumineux que le masque a été réalisé en deux couches distinctes liées l'une à l'autre de façon aussi intime que possible.

- Une couche de protection (avant masque) contre les efforts mécaniques et les effets thermiques est constituée de trente-sept panneaux indépendants séparés par des joints nus suivant les lignes de plus grandes pentes. La largeur des panneaux est de 11 m dans le profil courant, l'avant masque est formée en béton de 0.12 m d'épaisseur (ANBT, ?).

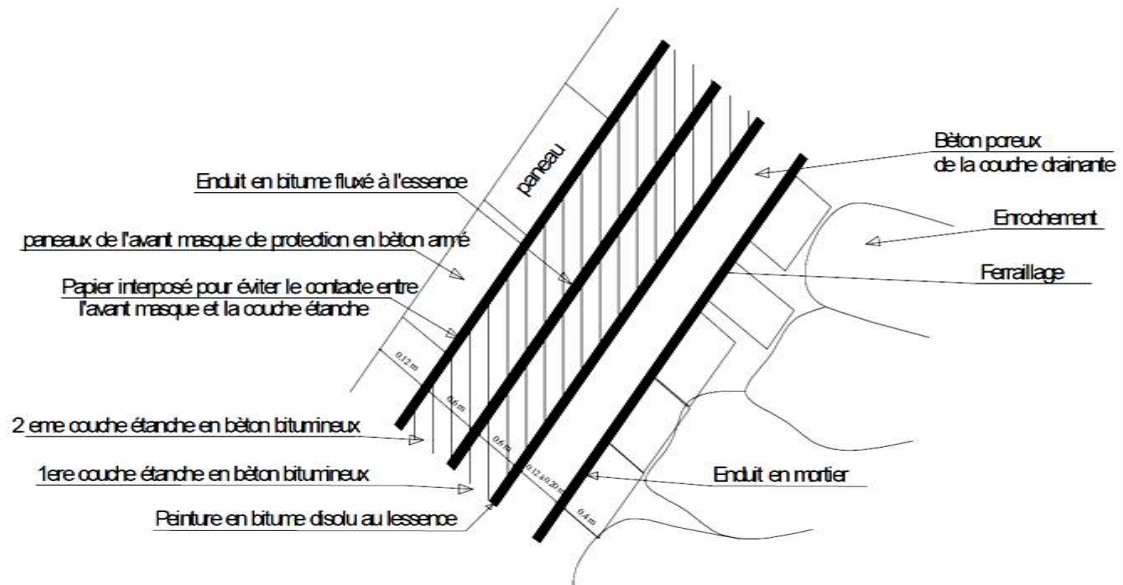


Fig. III.12 : Coupe du masque en béton bitumineux de barrage de Bouhnifia (Bounaadja, 2009).

III.5.2 Barrage du Sarno (wilaya de Sidi bel abbés):

Le barrage du Sarno (wilaya de Sidi bel abbés) (Fig. III.13) est construit entre 1947 et 1954 sur l'Oued du même nom, affluent de la Mekerra qui prend sa source dans les monts de Daia et se termine dans les marais de la Macta. Le barrage du Sarno, est une digue en terre homogène avec masque amont en béton bitumineux. Le masque donne entière satisfaction, puisque à retenue pleine, les fuites sont négligeables (ANBT, ?).



Fig. III.13: Barrage du Sarno, wilaya Sidi belbés (<http://popodoran.canalblog.com/archives/2015/06/12/32207930.html>).

III.5.2.1 Les principales caractéristiques du barrage :

- Superficie du bassin versant : 264 km² ;
- Hauteur du barrage : 28 m ;
- Largeur du couronnement : 6 m ;
- Longueur en crête : 610 m ;
- Fruits du talus amont : 2/1 et 2.5/1 ;
- Fruits du talus aval : 3/2 et 2/1 ;
- Largeur totale du massif à la base : 120 m ;
- Cube de terre : 280000 m³ ;
- Cote de la retenue normale: 424.50 m ;
- Cote des plus hautes eaux normales : 426.50 m.

III.5.2.2 Le masque étanche :

La digue n'a pas été conçue pour être étanche par elle-même, cette fonction devant être assurée par un masque étanche en béton bitumineux disposé sur le parement amont, ce masque a été posé sur une couche drainante, la première solution envisagée constituée d'un drain général en béton de ciment a été abandonnée car il est apparu illogique de placer sur un barrage souple, une couche rigide qui casserait dès les premiers tassements. On a donc réalisé une couche drainante en béton bitumineux poreux de 10 cm d'épaisseur mise en place sur le corroi après une simple pulvérisation de cut back destiné à former une couche d'accrochage (Fig. III.14), sur ce drain souple a été appliquée une couche étanche de 8 cm d'épaisseur (ANBT, ?).

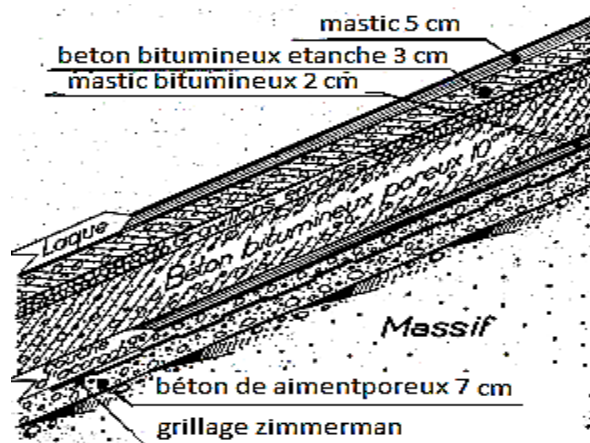


Fig. III.14 : Coupe du masque en béton bitumineux du barrage Sarno (ANBT, ?).

III.5.3 Barrage d'Ighil Emda (wilaya de Bejaïa) :

Le barrage d'Ighil Emda (wilaya de Bejaïa) (Fig. III.15) est construit au confluent de deux Oueds, l'Oued Berd et l'Oued Embarek qui forment l'Oued Agrioun à 2 km au Sud de Kherrata, 18 km de la côte du golfe de Bejaïa . C'est un barrage en terre créant une retenue de 160 millions de m³ destiné à produire de l'énergie électrique (Comité Français des Géo synthétiques, 1991).

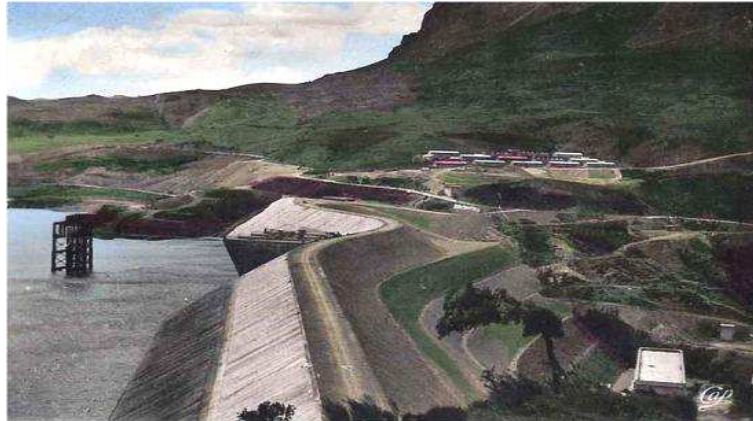


Fig. III.15 : Barrage d'Ighil Emda, Bejaia (<http://photos-kherrata-sahel.e-monsite.com/album/kherrata-le-lac/barrage-d-ighil-emda.html>).

III.5.3.1 Caractéristiques techniques du barrage :

- Longueur en crête: 710 m ;
- Hauteur maximale: 75 m ;
- Largeur du massif de la base: 265 m ;
- Fruit de la banque en amont: 1 / 1.6 ;
- Fruit de la banque aval: 1 / 1.5 ;
- Capacité du bassin: $160 \times 10^6 \text{ m}^3$.

III.5.4 Barrage de Ghrib (wilaya d'Ain Defla) :

Le barrage de Ghrib (wilaya d'Ain Defla) (Fig. III.16) est situé sur le cours supérieur de l'Oued Chélif. Il accumule les eaux du bassin supérieur en vue de l'irrigation des plaines situées en aval et accessoirement de la production de l'énergie électrique. L'ouvrage est constitué par une digue d'enrochement arrimé. Construit entre 1926 et 1938 le barrage du Ghrib a été l'un des premiers ouvrages en enrochement réalisé avec un masque amont en béton bitumineux. Ce masque a rempli convenablement son rôle d'étanchéité souple.



Fig. III.16 : Barrage de Ghrib, Ain Defla
(<http://www.algermiliana.com/medias/images/84729769-o>)

III.5.4.1 Caractéristiques techniques du barrage:

- Capacité initiale : 280 hm³ ;
- Apport moyen: 148.5 hm³ ;
- Envasement annuel : 3.20 hm³/an ;
- Volume régularisé : 105 hm³ ;
- Hauteur au dessus du point le plus bas des fondations: 105 m ;
- Hauteur au dessus du talweg : 72 m ;
- Largeur maximale de l'emprise : 150 m ;
- Longueur: 270 m ;
- Côte de retenue normale (R.N) : 427.5 m ;
- Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E) : 432.50 m.

III.5.4.2 Le masque étanche :

Le masque est en béton bitumineux de 12 cm d'épaisseur moyenne reposant sur une couche de béton poreux de 8 cm d'épaisseur formant placage d'adhérence sur la maçonnerie de moellons de grosses dimensions du parement amont.

Le masque en béton bitumineux était protégé sur toute sa surface extérieure par une deuxième couche de béton poreux de 10 cm d'épaisseur, armé d'un grillage métallique, dit grillage Zimmerman.

Le béton superficiel était découpé sur toute son épaisseur par des joints de 1 centimètre limitant des dalles rectangulaires de 3 m de large et de 2 m de longueur (Fig. III.17) (ANBT, ?).

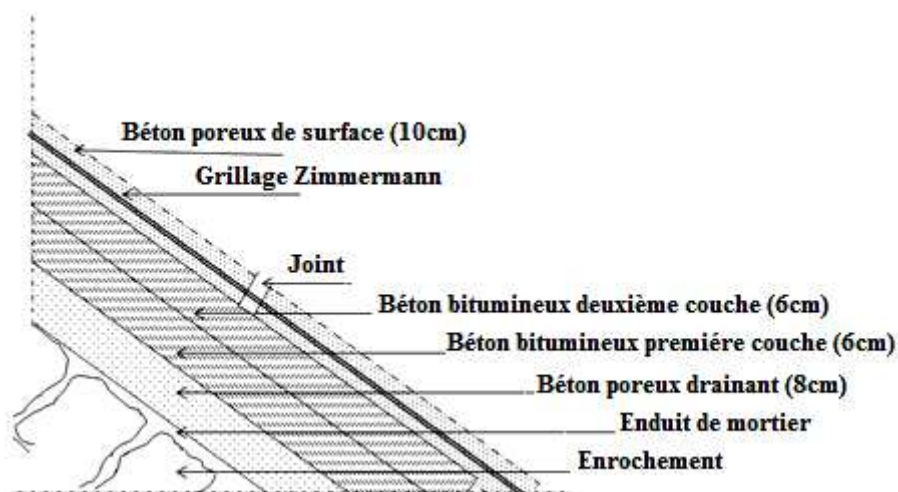


Fig. III.17 : Coupe du masque en béton bitumineux du barrage Ghrib (Djemili, 2006).

III.6 Avantages des masques en béton bitumineux:

1. **Faible volume du barrage:** toute la section transversale du barrage peut être utilisée dans le calcul de la stabilité des barrages, ce qui permettra d'économiser considérablement le volume de remplissage.
2. **Economie du matériau de remplissage:** le matériau de remplissage peut être d'une basse qualité puisqu'il est en contact avec la retenue d'eau et que la crête est sec, ce qui doit être pris en considération.

3. **Contrôle du revêtement:** le parement amont peut toujours être observé du côté amont au-dessus des niveaux d'eau - en fonction du fonctionnement du réservoir.
4. **Surplus de sécurité:** si un moyen de vérification de l'efficacité du revêtement est nécessaire - c'est-à-dire dans les zones densément peuplées situées en aval du barrage – une couche de drainage peut facilement être prise en sandwich à des coûts raisonnables entre deux couches de béton bitumineux imperméable.
5. **Contrôle des fuites:** si une galerie d'inspection pour le jointoiment ultérieur du sous-sol est prévue, l'eau vidée peut être conduite dans cette galerie et vérifiée (*Schonian, 1990*).
6. **Détection des fuites:** si des points de fuite sont détectés, ils peuvent être facilement localisés en divisant la couche de drainage en sections verticales. Si le propriétaire accepte une perte mineure d'eau temporaire, les travaux de réparation peuvent être reportés jusqu'à ce que des niveaux d'eau bas soient atteints en fonctionnement normal. Dans le cas contraire, des mesures de réparation sous-marine peuvent être exécutées (*Schonian, 1990*).
7. **Contrôle de fuite sans galerie d'inspection:** s'il n'y a pas de galerie d'inspection, le circuit de drainage d'asphalte peut être divisés en plusieurs sections à partir desquelles l'eau de fuite est évacuée à l'extrémité du barrage par des tuyaux en plastique individuels jusqu'à l'extrémité aval du barrage, et elle est vérifiée et mesurée dans des chambres de commande (*Schonian, 1990*).
8. **Réparation facile et rapide:** puisque le revêtement est découvert, les inspections visuelles sont faciles et tout travail de réparation nécessaire peut être effectué sans avoir besoin d'un travail préliminaire approfondi. En outre, ces économies ainsi que les économies résultant de l'élimination des temps d'arrêt peuvent bien justifier le coût de la couche de drainage et la deuxième couche imperméable (*Schonian, 1990*).
9. Les parements en béton bitumineux permettent de mécaniser la construction et de réduire les coûts de main-d'œuvre et de matériaux d'un facteur 1.5 à 2, par exemple, en remplaçant l'écran de béton armé pour l'évacuateur de crues à Montgomery, aux États-Unis, par un écran en béton bitumineux, les coûts ont été réduits de moitié et la construction achevée en un an avant le calendrier, en plus desquels environ 6000 tonnes de béton bitumineux ont été posées en deux mois; Kazgidroproekt (Bureau des projets hydrauliques du Kazakhstan) a calculé qu'une telle substitution au barrage de protection dans le département de Medeo permettrait d'économiser 1 million de rubis (*Glebov et Popchenko, 1969*).

10. Une caractéristique des parements de béton bitumineux est leur haute imperméabilité due aux propriétés imperméables de ce béton et le fait qu'il peut être posé sans joint. Par exemple, au déversoir de la centrale électrique de Sankt Pantaleon en Autriche ($Q = 340 \text{ m}^3 / \text{s}$, $H = 10 \text{ m}$), les pertes de filtration par un revêtement de canal avec une surface de $350\,000 \text{ m}^2$ ont été maintenues en dessous de $0,08\%$. La fuite à travers l'écran de béton bitumineux ($H = 64 \text{ m}$) au barrage de Ghrib en Algérie s'élevait à seulement $0,03$ litres / pluie par mètre linéaire de barrage (*Glebov et Popchenko, 1969*).
11. Les parements en béton bitumineux offrent une résistance élevée à la fissuration et se déforment en même temps facilement pour s'adapter au tassement ou au soulèvement dans les sols de fondation. Aux barrages, Ghrib et Ighil Emda en Algérie, au barrage de Val de Gajo au Portugal et aux structures de digues en Allemagne de l'Ouest, les couvertures ne se sont pas fissurées malgré l'implantation irrégulière de la fondation (50 cm). Un béton bitumineux fait face dans un canal dans la steppe de Golodnaya résiste avec succès à un soulèvement de fondation de $50\text{-}71$ millimètres (*Glebov et Popchenko, 1969*).
12. Même lorsque les parements en béton bitumineux comparativement minces sont posés, ils offrent fiabilité, résistance à l'eau et durabilité. Ceci est confirmé par les études de la digue de Hollande, construite à partir de blocs de pierre avec du béton bitumineux il y a 100 ans. Les canaux de Donzere - Madragon et de Montelimar en France portent des débits de plus de $1850 \text{ m}^3/\text{s}$, mais les revêtements en béton bitumineux de seulement 6 cm d'épaisseur n'ont pas besoin de réparation pendant $14\text{-}17$ ans. En Norvège et en Allemagne de l'Ouest, les étangs ont subi des tempêtes catastrophiques de la mer du Nord avec des hauteurs de vagues de $4,5 \text{ m}$, tandis que des structures en autres matériaux se sont effondrées. Aujourd'hui, tous les barrages du delta sont recouverts de béton bitumineux pour donner un revêtement à deux couches de 20 cm d'épaisseur. Le bitumage de la digue de Dunkerque en France devrait pouvoir supporter des ondes de 6 m . Les ingénieurs français et allemand affirment que les coûts d'entretien et de réparation ne seront pas supérieurs à 5% du total (*Glebov et Popchenko, 1969*).
13. Les calculs de la stabilité thermique des revêtements, sur la base des caractéristiques rhéologiques, montrent que même les bétons bitumineux plastiques ne gonflent pas de plus de $1 \text{ cm} / \text{an}$, et les types plus résistants avec des squelettes minéraux compacts et exempts de bitume en excès ne gonflent pas plus de $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ cm} / \text{an}$. Un examen du masque en béton bitumineux au barrage Ghrib en Algérie après 20 ans a montré que la couverture avait changé de forme seulement au-dessus du niveau de l'eau; les tests par ultrason ont révélé une augmentation de 10% de la rigidité due au vieillissement du bitume. Des résultats similaires ont été enregistrés dans le cas des travaux de digues de Helmsander en Allemagne de l'Ouest (*Glebov et Popchenko, 1969*).

III.7 Construction :

Le matériau de construction qu'est le bitume doit pouvoir conserver ses qualités pendant des années ou des dizaines d'années. C'est pourquoi il exige autant de soins lors de sa fabrication et pendant sa construction dans les différents domaines.

La plupart des masques en béton bitumineux ont été faites une fois que le remblai a été terminé. Malgré, en cas de longues pentes (au-dessus de 100 m) ou lorsque les périodes de construction d'été dans les zones froides sont courtes, les couches de béton bitumineux peuvent sans trop de difficulté, être construite par étapes. La technique de jointoiment des revêtements à ces étapes sont facilement maîtrisé par des entrepreneurs expérimentés (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

III.7.1. Machines :

Les machines fonctionnant sur la face sont les mêmes que ceux qui effectuent des travaux routiers, mais modifiées pour être en mesure de fonctionner sur une pente. Ils sont fixés à des câbles ancrés par treuil chariots spécifiques qui se déplacent sur la partie supérieure du barrage. Les opérateurs doivent être formés pour travailler dans ces conditions difficiles (Fig. III.18) (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig.III.18: Vue globale des machines opérant lors revêtement (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

Liste des principaux mécanismes utilisés pour fonctionner sur une pente:

- 1 Treuil principal camion: (Fig. III.19)
- 2 Treuils camions-secondaires;
- 1 Machine de finition;
- 1 Dumper;
- 1 Rouleau vibrant remorqué [6 tonnes];
- 1 Rouleau vibrant [25 tonnes];

- 1 Rouleau vibrant [4,0 tonnes];
- 1 Machine de re-compactage conjointe.



Fig. III.19: Le treuil principal camion sécurise le module de finition, le dumper et le rouleau (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

III.7.2 Phases de fonctionnement standard :

Les phases de fonctionnement des procédures standard ont été consolidées et affinées par des années d'expérience et de nombreux projets réalisés avec succès.

❖ *Préparation de la couche de base :*

La structure d'étanchéité en béton bitumineux est posée sur la dernière couche du remblai. Toutes les couches de la structure imperméable, réalisées après la construction du remblai, doivent être en couches et compactés sur la pente du parement amont du barrage. Le remblai a été réalisé progressivement en hauteur de 50 cm.

En ce qui concerne les constructions de routes, le sol a été déployé horizontalement, et le rognage nécessaire pour donner au barrage une pente régulière est effectuée après compactage, cela implique une compaction imparfaite de la pente sur laquelle la structure étanche sera réalisée.

Pour cette raison, la première opération à effectuer est le laminage préliminaire de la base, elle est généralement réalisée avec un rouleau vibrant tracté de 6 tonnes actionné par un treuil au-dessus du barrage, cette opération permet de poser la continuité structurelle nécessaire pour réaliser la structure (Fig. III.20) (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig.III.20 : Laminage préliminaire de la couche de base (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

❖ **Emulsion pour l'adhésion sur la base et entre les couches de béton :**

Une émulsion de bitume est pulvérisée sur la base pour faciliter l'adhérence de la couche de liant (Fig. III.21). Le type d'émulsion est choisi pour une pénétration optimale dans la base. Le réglage de l'émulsion ne doit pas être trop rapide ou une couche de bitume pourrait matérialiser la création d'une couche fluide entre les couches ou il peut adhérer à la machine d'exploitation sur la pente.

Les paramètres ne doivent pas être à ralentis, depuis des pentes très raides, on pourrait apporter encore le mélange le plus visqueux à couler au fond du barrage. Le meilleur type d'émulsion pour ce genre d'opérations est une émulsion acide et rapide.

Le dosage dépend du type de base, on peut aller jusqu'à $1,5 - 2,0 \text{ kg / m}^3$ pour les literies de roche ouverts, et moins pour les fines. Afin d'éviter le mouvement descendant de la couche, il faut que la mise en place des couches d'adhésion soit rapide et en quantités minimales. (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig.III.21 : La pulvérisation (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

❖ **Revêtement bitumineux et compactage :**

L'enrobé bitumineux est versé dans un récipient au-dessus du talus [pas possible dans des conditions de froid parce que le matériel serait refroidit trop rapidement, différents arrangements, tel que des conteneurs fermés sont nécessaires].

Une fois effectué les essais de température et de contrôle du matériel, une excavatrice prendra le mélange et le placera dans un dumper. Le dumper, fixé avec des câbles ; ainsi que tous les équipements fonctionnant sur la pente, descend le parement et alimente le module de finition (Fig. III.22) (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig. III.22 : Dumper alimentant le finisseur (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

La superposition est réalisée par un module de finition vibratoire modifié pour fonctionner sur une pente. Les contrôles avant et pendant le compactage doivent être fréquents pour assurer la bonne épaisseur de la couche.

Le laminage suivant doit être effectué par deux rouleaux vibrants. Le câble de remorquage, peut descendre la pente en diagonale et compacte le béton derrière le finisseur après stratification [il est possible d'attacher un petit rouleau derrière le finisseur].

Les rouleaux de 2,5 tonnes et 4 tonnes passe plus fréquemment que sur une route par rapport a une pente, la force de compactage n'est pas perpendiculaire à la face et les couches scellées ont besoin d'un niveau de compactage de matériau pour obtenir une valeur de vide résiduel très faible (Fig. III.23) (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig. III.23 : Compactage primaire par un rouleau vibrant à 2,5 tonnes (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

❖ **Traitement des joints :**

La forme la plus classique est celle en raison de l'interruption des travaux pendant un temps suffisant pour laisser la couche se refroidir [reprise du travail, mauvais temps et des événements inattendus]. A la reprise du travail le bord de la couche refroidie est chauffé avant la stratification suivante (Fig. III.24). Ensuite, l'articulation est commandée par une jauge à vide pour vérifier son étanchéité à l'eau. Si le contrôle n'est pas satisfaisant, pilier le joint avec des machines spéciales, ce dernier suit toute la longueur du joint, il est préchauffer et re-compacter par des machines spéciales. Le contrôle de la jauge à vide est répété. Ce contrôle est un contrôle de routine à réalisé sur les joints thermo-soudés et, en général, sur les points occasionnels du parement (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig.III.24: Chauffage et re-compactage d'une couche (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

❖ **Raccordement au pied du barrage:**

La dernière partie de la superposition qui concerne la connexion des couches bitumineuses de bord inférieur du barrage [béton de la tranchée de coupure et / ou de la plinthe]. Cette connexion est réalisée avec le bitume placée dans la couche de contact entre les deux matériaux, et avec une géo-grille - préparée avec un pansement à base de bitume - positionnée entre les deux couches. La géo-grille doit absorber les tensions tangentielles qui pourraient détacher le revêtement du mur de coupure. Pour éviter de devenir une couche de détachement, le filet doit avoir de grandes mailles (Fig. III.25) (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig.III.25 : Application de géo-grille et compactage en suite(www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

❖ **Couche de protection :**

La dernière opération consiste de protéger la dernière couche d'étanchéité par couche de protection. Cette couche doit protéger la surface du masque des rayonnements ultraviolets, des gammes à haute température, des attaques des agents chimiques et du processus d'érosion. La couche protectrice est une émulsion bitumineuse spéciale, réalisée industriellement avec des additifs appropriés pour optimiser l'utilisation sur des pentes et de résister à des plages à haute température. Selon le type, il peut être mélangé sur place avec du coulis de ciment ou il peut être mélangé au préalable industriellement. Cette couche doit être régulièrement renouveler [tous les 5 ans] avec un entretien ordinaire simple et rapide, prolonge le cycle de vie du revêtement bitumineux (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

III.7.3 Tests en cours :

Les essais en cours sont comme pour les travaux routiers effectués sur les revêtements à partir des matériaux. Le carottage du béton est un test fréquent et particulier est décrit précédemment sur le site test de perméabilité avec une jauge à vide. Au cours de la

stratification, des contrôles approfondis sur les matières premières, du mélange et couche de béton bitumineux doivent être effectuées (Tableau III.2).

Tableau III.2: *Essais durant la construction du masque en béton bitumineux* (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

Site de collecte	Test	Fréquence	Norme
Agrégat	Analyse granulométrique	Hebdomadaire	ASTM C 136
Filler	Densité spécifique	Hebdomadaire	ASTM C 127/128
	Analyse granulométrique	Bimensuel	ASTM D 546
Bitume	Pénétration	Bimensuel	ASTM D 5
	Point de ramollissement	Selon les besoins	ASTM D 36
Usine de mélange	Densité	Journalier	ASTM D 1188
	% des vides	Journalier	V A
	Teneur en bitume	Journalier	ASTM 2172
	Analyse granulométrique	Journalier	ASTM C 136
	Stabilité de Marshall et débit	Journalier	ASTM D 1559
	Perméabilité	Hebdomadaire	Shell VA
	Résistance à l'écoulement sur la pente (stabilité)	Hebdomadaire	VA
Finition masque	Essai sous vide pour couche supérieure et inférieure	Journalier	
Revêtement bitumineux	Vérifier la température du mélange dans la bétonnière	Chaque fourniture de mélange bitumineux	
	Vérifier la température de mélange au cours de travail	Chaque début de revêtement et tous les 20 mètres	
	Contrôle de l'épaisseur	Chaque début de revêtement et tous les 5 mètres	

❖ *Maintenance des revêtements bitumineux :*

L'opération d'entretien ordinaire principale à réaliser sur les revêtements bitumineux est le renouvellement régulier de l'étanchéité de la couche de surface (Fig. III.26). Habituellement, le cycle de vie des ouvrages, si elle est réalisée correctement, est de plus de 50 ans.

Mais les dommages auraient été causés au dessous des couches de masque, en raison d'un entretien manqué, les défauts de construction, les ruptures, les tremblements de terre importants ou simplement dus à l'usure, après des décennies d'exploitation ; Dans ce cas, si les dommages ne sont pas graves, procéder aux réparations locales à l'aide de mastic bitumineux, puis passez par la restauration d'une nouvelle couche (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).



Fig. III.26: Fraisage du revêtement endommagé (www.cea-coop.it/...pdf/CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).

III.8 Avenir des masques en béton bitumineux :

Le revêtement de béton bitumineux est un excellent élément imperméable aux barrages en remblais, en raison de sa souplesse, de sa rapidité de construction, de ses propriétés d'auto-guérison et de sa facilité de réparation (*Ditter et Haug, 1989*).

Nonobstant son avenir est très lié au prix du pétrole (*Ditter et Haug, 1989*).

Dans les années 1950, un revêtement en béton bitumineux était beaucoup moins cher qu'un béton armé. Dans les années 1980, le coût d'un revêtement de béton bitumineux en Espagne était le double du prix d'un pont en béton armé (*Wang et Hoeg, 2011*).

En 1988, en Italie, les matériaux bitumineux étaient en première position parmi les différents types d'éléments imperméables en amont des barrages en remblais (*Schonian, 1990*).

Les revêtements en béton bitumineux sont entièrement compatibles avec l'eau potable (*Schonian, 1990*).

Le choix entre le béton bitumineux et le béton armé dépendra principalement de l'importance des pertes d'eau et de la capacité de déformation de l'enrochement. Lorsque les pertes d'eau sont importantes et que seuls les enrochements de faible qualité sont à portée de

main, le béton bitumineux sera probablement un meilleur choix en raison de son étanchéité et de sa souplesse (*Justo, 1990*).

Conclusion :

Les barrages en remblais à masque amont en béton bitumineux sont de plus en plus utilisés à travers le monde, et reste parmi les technologies privilégiées, en raison de son efficacité, de sa fiabilité, de sa durabilité éprouvée, de la rapidité de construction, les propriétés d'autoréparation et la facilité de réparation.

Ce chapitre est consacré à une recherche et une analyse sur l'étanchéité des barrages en remblais par les masques en béton bitumineux, qui ont permis d'acquérir des connaissances plus approfondies sur ce type de masque, de résumer les dommages potentiels, les défaillances et les conséquences, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Partie II

Chapitre I : Transfert de chaleur.

Chapitre II : Modélisation du transfert de chaleur dans les masques
en béton bitumineux.

Chapitre III : Validation du modèle.

Chapitre IV : Optimisation de l'effet de la protection thermique sur le
masque par des différentes solutions pratiques.

Chapitre I : Transfert de chaleur

Introduction :

Les températures et les conditions atmosphériques ont de multiples impacts sur les ouvrages hydrauliques. Ces impacts sont principalement liés aux changements des températures au sein d'une structure et de ses fondations et aux phénomènes de gel-dégel. Les températures de l'air influencent directement les températures dans la structure, alors que les conditions atmosphériques (rayonnement solaire, rayonnement UV, nuages, etc.) peuvent accentuer ces phénomènes (*Rychen, 2013*).

La température de l'air et le rayonnement sont deux facteurs souvent liés, par exemple des températures élevées sont souvent associées à un fort rayonnement solaire ; La plupart du temps l'on peut constater un léger décalage entre les cycles de rayonnement et les cycles de températures. En effet, des valeurs maximales de rayonnement sont en principe atteintes avant celles des températures (cas où la température correspond à une réaction du rayonnement). Néanmoins, cette interaction n'est pas toujours vérifiée, surtout en raison de l'effet des nuages. Par exemple en période hivernale on peut très bien assister à des phénomènes de rayonnement élevé et de basses températures de l'air (*Rychen, 2013*).

Le masque en béton bitumineux est régi par divers modes de transferts thermiques. La convection et le rayonnement sont les modes prédominants de transfert de chaleur dans la surface du masque. La conduction s'explique par le fait d'une différence de température entre la surface du masque en béton bitumineux et sa profondeur.

I.1 Bilan énergétique du masque en béton bitumineux :

Du point de vue thermique, les conditions d'environnement auxquelles le masque en béton bitumineux est soumis continuellement au long des phases de construction et de réparation, tout aussi que pendant leur durée de vie, peuvent être combattues par une connaissance approfondie de la distribution de la température dans chaque couche composante. Les fluctuations de température de l'air, journalières et saisonnières, l'intensité de la radiation solaire, les matériaux qui composent les couches du masque, leur géométrie, les conditions de surface et les précipitations influencent significativement la stabilité du masque en béton bitumineux (*Djemili, 2006*).

Le cumule d'énergie de la surface du masque en béton bitumineux diffère considérablement de celui du sol naturel grâce aux propriétés différentes de l'absorption des radiations solaires. Les couches bitumineuses absorbent de larges quantités de radiations pendant la journée, ce qui produit le chauffage à la surface du masque qui se transmet rapidement aux couches inférieures produisant l'augmentation de la température à l'intérieur de celles-ci, (Fig. I.1).

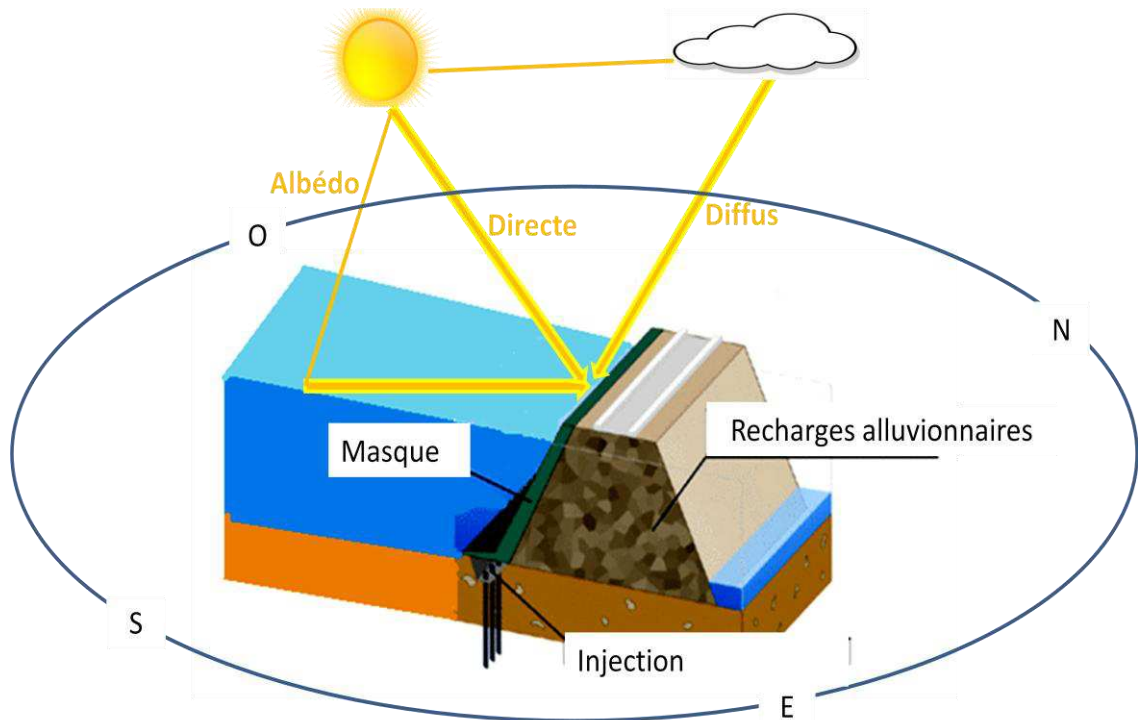


Fig. I.1 : Les composantes solaires autour d'un masque en béton bitumineux.

Une compréhension correcte du comportement du cumul d'énergie et sa détermination correcte aide le processus de prendre les décisions quant aux technologies de construction des masque en béton bitumineux et à l'étude du phénomène de la chaleur – un problème sérieux de l'environnement.

Les propriétés mécaniques du béton bitumineux changent considérablement avec la température. Le transfert thermique de surface produit des gradients de contrainte élevés près de la surface du masque, les cycles diurnes de température peuvent induire des fissures de fatigue et les cycles de gel-dégel peuvent causer des fissures (*Mauduit et al., 2013*).

Les principaux modes de transfert de chaleur sont le rayonnement solaire incident, le rayonnement thermique et les ondes longues entre la surface du masque en béton bitumineux et le ciel, la convection due au transfert de chaleur entre la surface du masque et le fluide (air ou eau) qui est en contact avec la surface, et la conduction dans le masque, comme le montre la figure I.2.

Les différents échanges thermiques qui interagissent entre la surface du masque en béton bitumineux et l'environnement, sont (*Djemili, 2006*):

- 1- Le rayonnement solaire direct (I) ;
- 2- Le rayonnement solaire diffus (D) qui forme avec les rayons directs le rayonnement solaire global ($G = I+D$) ;
- 3- Le rayonnement solaire réfléchi de la surface du masque et qui s'éloigne (A) ;

- 4- Le rayonnement émis par le masque et transmis dans le milieu (q_{rad}) ;
- 5- Le rayonnement de l'atmosphère (G_w) ;
- 6- L'échange calorifique entre le masque et la masse atmosphérique (convection: q_c) ;
- 7- L'énergie absorbée par le masque (conduction: q_{con}).

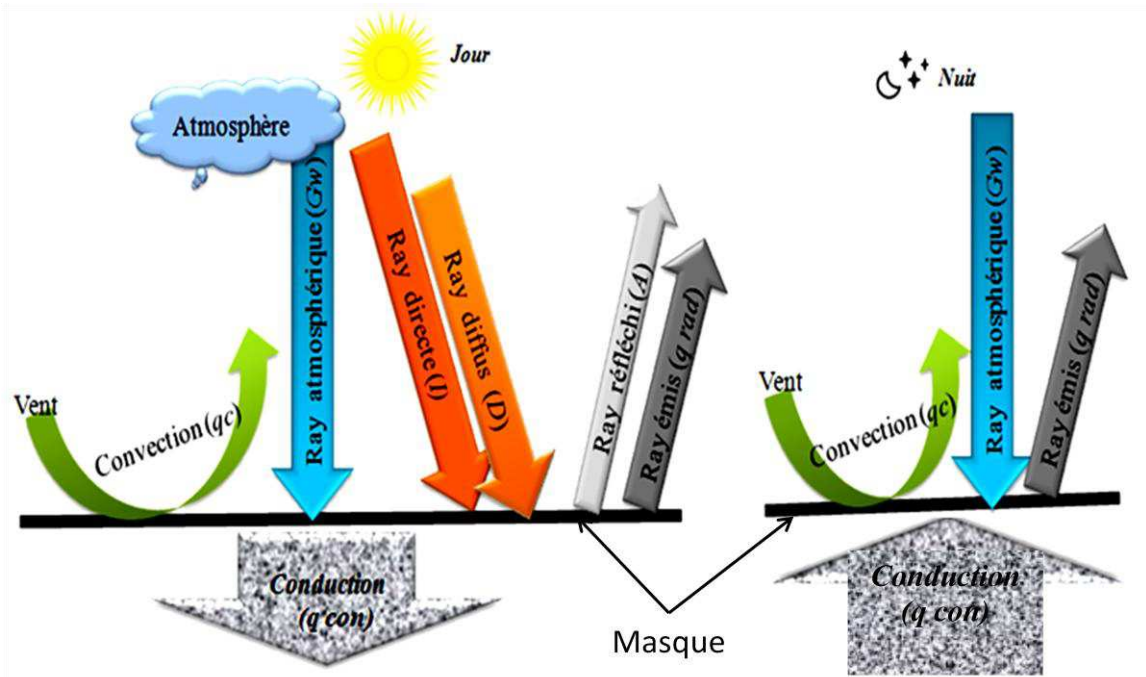


Fig. I.2 : Schéma explicatif du bilan énergétique autour du masque (Djemili, 2006).

I.2 Modes de transfert de chaleur :

La surface du masque est soumise à différentes formes de transfert de chaleur par rayonnement, par convection et par conduction.

➤ Transfert de chaleur par rayonnement :

Tous les matériaux rayonnent sans arrêt de l'énergie dans toutes les directions, à la suite du mouvement continu de vibration de leurs molécules situées en surface. Alors que le rayonnement solaire comporte essentiellement des radiations de courtes longueurs d'onde émises à très hautes températures. Par exemple, le rayonnement solaire est capable d'échauffer la terre bien que le milieu traversé soit à une température plus basse que la terre. (Perrot, 2011).

➤ *Transfert de chaleur par convection :*

Dans le processus de convection, la chaleur se déplace comme toujours des zones chaudes vers les zones froides. Lorsque les molécules d'un fluide froid, tel que l'eau ou l'air, viennent au contact d'une paroi chaude, une partie de l'énergie de vibration animant les molécules superficielles du solide se communique aux molécules voisines du fluide.

La quantité de chaleur ainsi transmise est proportionnelle à la différence de température entre la paroi et le fluide (*Bouvenot, 1981*).

On peut distinguer deux types de convection :

Convection naturelle ou libre : Le fluide est mis en mouvement sous les effets :

- De différences de masses volumiques résultant des différences de températures sur les frontières ;
- D'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

Convection forcée : Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).

➤ *Transfert de chaleur par conduction :*

Ce mode de transfert réside dans la propagation de la chaleur de molécule à molécule dans un ou plusieurs corps contigus, opaques et solides. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines. Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones froides.

I.2.1 Transfert de chaleur par rayonnement :

Le rayonnement solaire est l'énergie émise par le processus de fusion de l'hydrogène contenu dans le soleil; cette énergie n'atteint pas la surface terrestre de manière constante, sa quantité varie au cours de la journée, en fonction des saisons et dépend de la nébulosité, de l'angle d'incidence et de la réflexion des surfaces.

Tous corps opaque ou partiellement opaque porté à une température $T > 0$ °C rayonne de l'énergie dans toutes les directions, cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas de support matériel. Ce rayonnement n'est pas chaud en lui-même mais lorsqu'il est absorbé par un corps opaque ou partiellement opaque, son énergie peut se transformer totalement ou partiellement en chaleur.

La connaissance du rayonnement solaire est essentielle pour les masques en béton bitumineux, dans la perspective d'une meilleure étude des effets de cette dernière sur la dégradation progressive du parement et sa défaillance subséquente. Cependant le

développement de ces organes d'étanchéités (spécialement pour le masque en béton bitumineux) ne pourra se faire sans la connaissance approfondie du rayonnement solaire. La figure I.4 explique bien les différentes formes de rayonnement solaire (Aboufoul, 2014).

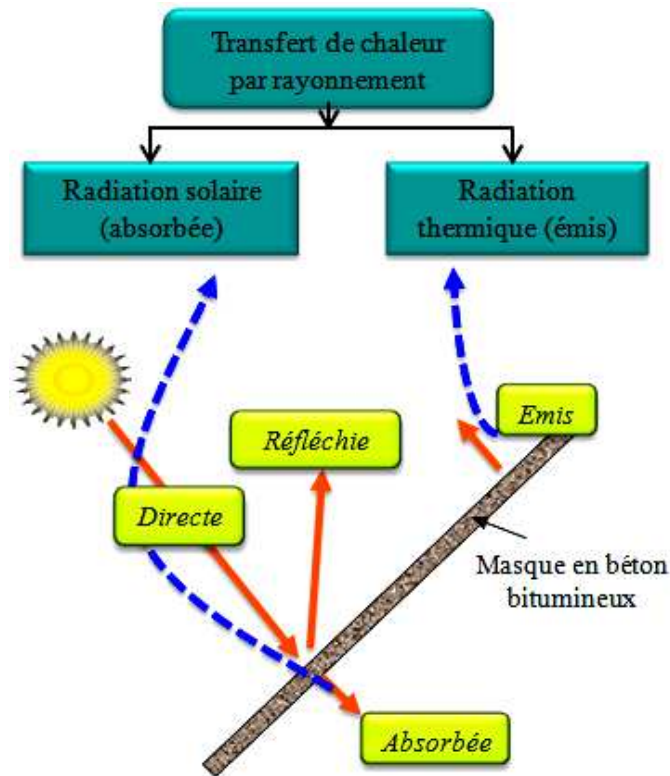


Fig. I.4: Transfert de chaleur par rayonnement (Aboufoul, 2014).

I.2.1.1 Transfert de chaleur par radiation solaire :

❖ Rayonnement solaire :

La surface du masque reçoit une certaine quantité de rayonnement solaire, à savoir un *rayonnement solaire global*. Cette quantité de rayonnement global est la somme de deux composantes de rayonnement solaire.

Le premier est le *rayonnement direct*, celui-ci est défini comme étant le flux énergétique transmis dans un angle solide limité au disque solaire. Il a la direction du rayonnement solaire incident.

Le second est le *rayonnement diffus*. Il s'agit de la part du flux solaire provenant de l'hémisphère céleste duquel on a extrait le disque solaire. Ce rayonnement n'a pas de direction privilégiée.

Une partie du rayonnement solaire n'atteint pas la surface terrestre en tant que tel. Il s'agit de la part de *rayonnement absorbé* (Tadili et Bargach, 2005).

❖ Rayonnement atmosphérique :

L'énergie absorbée par les constituants de l'atmosphère est essentiellement convertie en énergie radiative de grande longueur d'onde. En effet, cette énergie provoque un échauffement des molécules. Etant donné que tout corps rayonne proportionnellement à la quatrième puissance de sa température (loi de Stephan-Boltzmann), les molécules émettent à leur tour de l'énergie radiative et donnent ainsi naissance au *rayonnement atmosphérique*.

❖ Rayonnement terrestre :

Pour la même raison que le rayonnement atmosphérique, la surface considérée émet un rayonnement de grande longueur d'onde (infrarouge) vers la voûte céleste pour engendrer le *rayonnement terrestre*.

I.2.1.1. Les différentes formes de rayonnement solaire :

➤ *Facteurs influençant l'intensité du rayonnement solaire :*

La révolution de la terre autour du soleil, l'inclinaison de l'axe des pôles de la terre, la rotation de cette dernière et, à l'échelle terrestre, le climat, la pollution ainsi que des facteurs propres au site sont autant de facteurs qui influencent considérablement le rayonnement solaire. Nous détaillons chacun de ces paramètres ci-après.

❖ **Grandeurs temporelles :**

Le rayonnement solaire varie avec le temps. Cette notion de temps peut admettre différentes définitions:

- Le *temps solaire vrai (TSV)*: il s'agit du «temps vrai», celui qui correspond à la position réelle du soleil à l'instant et au lieu considérés. Lorsque la hauteur du soleil est maximale, le temps solaire TSV est fixé comme étant égal à 12 h;
- Le *temps légal (TL)*: il s'agit du temps communément appelé heure locale;
- Le *temps universel (TU)*: il s'agit du temps légal du méridien de Greenwich (longitude 0,00°) (Perrot, 2011).

Au niveau du Méridien de Greenwich, le temps légal est égal au temps universel mais n'est pas égal au temps solaire. En effet, en fonction du jour de l'année, le soleil passe au méridien du lieu tantôt avant, tantôt après le midi solaire, cette variation est due à deux caractéristiques du mouvement de la terre et du soleil:

- L'inclinaison de l'axe de rotation de la terre sur le plan de son orbite;
- La trajectoire elliptique de l'orbite terrestre.

✓ **Equation du temps :**

La variation annuelle de l'écart entre le midi solaire et le midi moyen est appelée *équation du temps (ET)* (min). Il est à noter qu'elle est périodique d'une année à l'autre et qu'elle présente un maximum de plus de 14 min début février et un minimum de -16 min début novembre. L'équation du temps est déterminée par la relation simplifiée suivante (*Jannot, 2003 ; Khoudrane, 2014*):

$$ET = - [0.0002 - 0.4797 \cos(\omega'J) + 3.2265 \cos(2\omega'J) + 0.0903 \cos(3\omega'J) + 7.3509 \sin(\omega'J) + 9.912 \sin(2\omega'J) + 0.3361 \sin(3\omega'J)] \quad (\text{I-1})$$

Avec :

ET : Equation du temps (min) ;

J : Numéro du jour de l'année a compté a partir du 1 janvier ;

ω' : Constante égale à 0.984 ;

Pour une longitude égale à 0.00° le temps solaire vrai est donné par la relation (*Jannot, 2003 ; Khoudrane, 2014*):

$$TSV = TU - ET \quad (\text{I-2})$$

Pour une autre longitude, cette relation devient:

$$TSV = T_{\text{légal}} - 1 + \frac{ET}{60} + \frac{\gamma}{15} \quad (\text{I-3})$$

γ : Longitude du lieu considéré ($^\circ$).

❖ **Coordonnées du soleil :**

✓ **Coordonnées géographiques:**

Ce sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (Fig. I.5).

☞ **Latitude φ :**

C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considère. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égal à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° .

☞ **Longitude γ :**

C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. On a choisi pour méridien (origine 0°), le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte le signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et le signe (-) les méridiens situés à l'Ouest.

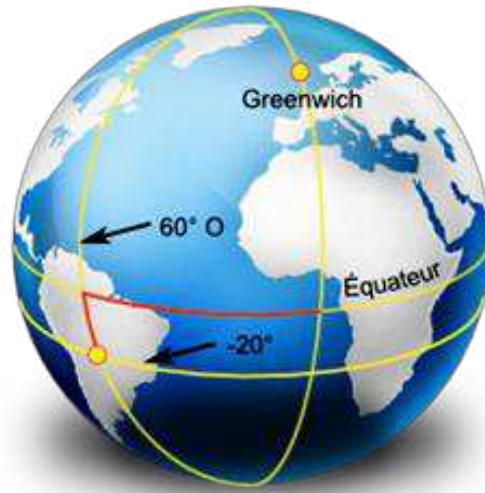


Fig. I.5 : Coordonnées géographiques. (www.cosmodixi.fr/lexique/c.php)

✓ **Coordonnées horaires :**

☞ **Déclinaison du soleil δ :**

C'est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial (Fig. I.6), elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$, elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation (Jannot, 2003 ; Khoudrane, 2014):

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin[(360/365)(J + 284)] \quad (\text{I-4})$$

J : Le numéro du jour de l'année a compté à partir du premier Janvier.

☞ **L'angle horaire du soleil t_h :**

L'angle horaire t_h (Fig. I.6), représente l'arc compris entre le rayonnement solaire incident et le plan méridien du lieu, la valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de 15° par heure, elle est exprimée en fonction du temps solaire vrai (TSV) par la relation suivante (Jannot, 2003 ; Khoudrane, 2014):

$$t_h = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (\text{I-5})$$

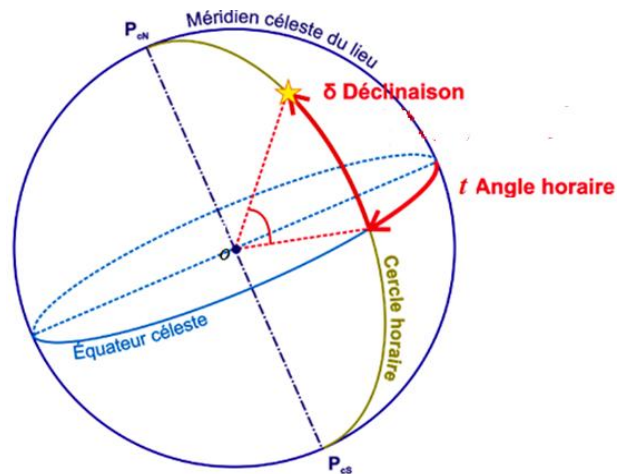


Fig. I.6 : Coordonnées horaires (<http://www.meridienne.org/index.php?page=coordonnees-horaires>).

✓ **Coordonnées horizontales :**

☞ **Hauteur angulaire du soleil h_s :**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal (Fig. I.7) calculée par la relation suivante (www.cosmodixi.fr/lexique/c.php):.

$$\sin h_s = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t_h \quad (\text{I-6})$$

φ : Latitude du lieu ;

t_h : Angle horaire ;

δ : Déclinaison du soleil.

☞ **Azimut az :**

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (Fig. I.7), on peut le compter positivement de 0° à $+180^\circ$ vers l'Ouest et négativement de 0° à -180° vers l'Est (*Jannot, 2003 ; Khoudrane, 2014*) :

$$\sin az = \frac{\cos \delta \cdot \sin t_h}{\cos h_s} \quad (\text{I-7})$$

Avec :

t_h : Angle horaire ;

δ : Déclinaison du soleil ;

h_s : Hauteur du soleil.

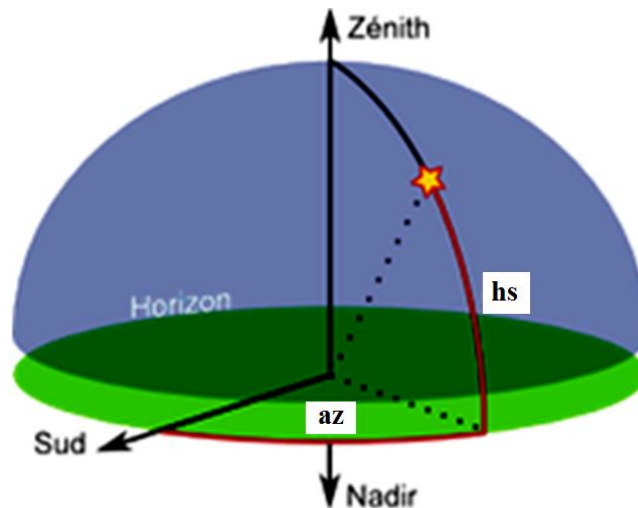


Fig. I.7 : Coordonnées horizontale (www.cosmodixi.fr/lexique/c.php).

✓ **Nébulosité :**

La nébulosité est par définition la fraction de la voûte céleste occultée en un lieu et à un instant donné par tout ou partie des nuages. L'importance du couvert nuageux est particulièrement déterminante dans la quantification du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère. En effet, le rayonnement direct est d'autant plus faible que la nébulosité est importante, elle influence également considérablement le rayonnement diffus.

Dans notre approche, nous considérons la condition nuageuse de *ciel serein*: le ciel est dépourvu de nuage;

➤ **Facteurs du site :**

☞ **Latitude et longitude du lieu :**

La quantité de rayonnement solaire reçue en un point donné de la terre dépend de la latitude du lieu considéré. L'angle d'incidence du rayonnement solaire est donc dépendant de la position géographique de ce lieu.

En ce qui concerne la longitude, son influence est fonction du méridien.

☞ **Altitude :**

En toute généralité, le rayonnement solaire s'intensifie avec l'altitude.

☞ **Masse d'air optique :**

L'épaisseur d'air traversée par le rayonnement solaire est plus importante lorsque le soleil est à l'horizon que lorsque celui-ci est au zénith, cette variation horaire de l'épaisseur d'air traversée par le rayonnement solaire est englobée dans la notion de masse d'air optique.

I.2.1.2. Rayonnement solaire :✓ Notations

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- Le **rayonnement direct** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le **rayonnement diffus** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, il n'a pas de direction privilégiée.
- Le **rayonnement global** est la somme du rayonnement direct et diffus.

✓ Calcul du rayonnement solaire direct :☞ **Plan horizontal :**

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme du rayonnement direct et diffus donné par (Jannot, 2003 ; Khoudrane, 2014)

$$G_H = I_H + D_H \quad (\text{I-8})$$

Où

I_H : Le rayonnement direct reçu par une surface horizontale (w/m^2);

D_H : Le rayonnement diffus provenant du ciel, reçu par une surface horizontale (w/m^2);

G_H : Le rayonnement global reçu par une surface horizontale (w/m^2).

Le rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal peut être déterminé par (Miloudi, 2012) :

$$I_H = I_0 \exp\left(\frac{T_L}{0.9+9.4 \sin(h_s)}\right) \quad (\text{I-9})$$

Avec

I_0 : Constante solaire égale à 1370 w/m^2 ;

T_L : Facteur de trouble de Linke, calculer par la relation suivante (Miloudi, 2012):

$$T_L = 2.4 + 14.6B + 0.4(1 + 2B)\ln(Pv) \quad (\text{I-10})$$

Où :

B est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend une des valeurs :

B = 0.02 pour un lieu situé en montagne ;

B = 0.05 pour un lieu rural ;

B = 0.10 pour un lieu urbain ;

B = 0.20 pour un lieu industriel (atmosphère polluée).

Pv est la pression partielle de la vapeur d'eau, qui se calcule par :

$$Pv = Pvs * H_R \quad (\text{I-11})$$

Avec :

H_R : Le taux moyen d'humidité relative (%).

P_{vs} : La pression de vapeur saturante, donnée par la formule qui suit (*Jannot, 2003 ; Khoudrane, 2014*) :

$$P_{vs} = 2.165 * (1.098 + \frac{T_{air}}{100})^{8.02} \quad (I-12)$$

Où : T_{air} est la température de l'air en °C.

☞ **Plan incliné :**

Le rayonnement direct sur un plan incliné est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est possible de l'estimer par la formule suivante (*Tadili et Bargach, 2005*) :

$$I_{\alpha} = I_H \times Rb \quad (I-13)$$

I_H : Rayonnement solaire incident reçu sur une surface horizontale face aux rayons solaires ;

Rb : Facteur de transposition quotidien calculé à partir de la relation (*Tadili et Bargach, 2005*) :

$$Rb = \frac{\cos(h_s - \alpha) \cos(\delta) \cos(t_h) + \sin(h_s - \alpha) \sin(\delta)}{\cos(h_s) \cos(\delta) \cos(t_h) + \sin(h_s) \sin(\delta)} \quad (I-14)$$

✓ **Calcul du rayonnement diffus :**

☞ Plan horizontal :

L'éclairement solaire diffus D_H sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles.

On peut calculer le rayonnement diffus sur un plan horizontal, à partir de la formule suivante (*Jannot, 2003 ; Khoudrane, 2014*) :

$$D_H = 54.8 \sqrt{\sin h_s} [T_L - 0.5 - \sqrt{\sin h_s}] \quad (I-15)$$

Avec :

h_s : Hauteur angulaire du soleil ;

T_L : Facteur de trouble de Link.

☞ Plan incliné :

Le rayonnement solaire diffus D_{α} arrive sur le plan incliné après avoir été diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, il n'a pas de direction privilégiée, de ce fait, l'orientation du plan (l'azimut) n'a pas d'importance, seule son inclinaison α avec l'horizontal contribue dans sa valeur (*Tadili et Bargach, 2005*) .

$$D_{\alpha} = D_H \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \quad (\text{I-16})$$

α : Angle d'inclinaison du masque avec l'horizontal ;

D_H : Rayonnement diffus sur un plan horizontal.

✓ **Calcul du rayonnement global :**

☞ **Plan horizontal :**

Le rayonnement solaire global sur une surface horizontale au sol est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus sur la même surface.

Ainsi, pour le rayonnement par ciel serein, le rayonnement global est donné par la relation (I.8).

☞ **Plan incliné :**

Le rayonnement solaire global sur un plan incliné au sol évalué par la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus sur le même plan.

Le rayonnement global sur un plan incliné, est calculé par la relation suivante ([Jannot, 2003](#) ; [Khoudrane, 2014](#)):

$$G_{\alpha} = I_{\alpha} + D_{\alpha} \quad (\text{I-17})$$

✓ **Calcul du rayonnement réfléchi:**

Le rayonnement solaire réfléchi, c'est une fraction de l'albédo, est une valeur comprise entre 0 et 1 : un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde sans en réfléchir aucune, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait, qui réfléchirait toutes les longueurs d'onde, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1.

Le rayonnement solaire réfléchi sur un plan incliné, sera calculer a partir de la relation suivante ([Kerkouche et al., 2013](#)) :

$$A = r \cdot \frac{G_H (1 - \cos \alpha)}{2} \quad (\text{I-18})$$

r : Représente le facteur de réflexion du béton bitumineux vis-à-vis du rayonnement solaire, r est appelé *l'albédo* ; L'albédo d'un enrobé bitumineux se situe entre 0,10 et 0,20. Nous choisissons de considérer une valeur moyenne de 0,05 ([Pilate, 2007](#));

G_H : Rayonnement globale sur la surface horizontale ;

α : L'inclinaison du plan.

✓ Rayonnements atmosphérique

Tout corps émet naturellement un rayonnement vers son environnement. La puissance rayonnée dépend de la nature du corps et de sa température. Elle peut être exprimée par la formule de Stephan- Boltzmann. Nous ne considérons ci-après que les contributions du rayonnement atmosphérique et du rayonnement terrestre.

Le rayonnement atmosphérique G_w est donné par la relation suivante (*Pilate, 2007*):

$$G_w = \varepsilon_a \cdot C_s \cdot (T_{air} + 273.16)^4 \quad (I-19)$$

Avec

ε_a : Émissivité de l'air pour un ciel couvert, elle est donnée par la relation suivante :

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0(1 + 0.12N^2) \quad (I-20)$$

N : Fraction du ciel couvert (%), elle peut être approchée par la relation suivante:

$$N = 1 - \sigma_d \quad (I-21)$$

σ_d : Fraction d'insolation moyenne journalière

- Journées à ciel serein : $\sigma_d \geq 0,8$
- Journées à ciel couvert : $\sigma_d \leq 0,2$
- Autres journées : $0,2 < \sigma_d < 0,8$

ε_0 : Émissivité de l'air pour un ciel clair, elle est donnée par la relation suivante:

$$\varepsilon_0 = 1 - 0.261 \exp(0.000777 \cdot T_{air}^2) \quad (I-22)$$

C_s : Constante de Stephan-Boltzmann, elle est égale à $5,67 \times 10^{-8}$ (w/m².°C⁴);

T_{air} : Température de l'air en °C.

I.2.1.2 Transfert de chaleur par radiation thermique :

La quantité de chaleur émise ou absorbée par radiation thermique entre une surface et le milieu environnant est donnée par la relation (*Incropera et al., 2002*) :

$$q_{rad} = \varepsilon_s C_s (T_s^4 - T_{air}^4) \quad (I.23)$$

Avec :

q_{rad} : Flux de chaleur transmis par radiation thermique (W/m²);

ε_s : Coefficient d'émission de la surface, (si $\varepsilon_s=1$ pour un corps noir, et si $\varepsilon_s \ll 1$ corps brillant Dans le cas d'un enrobé bitumineux, elle est comprise entre 0,88 et 0,95) ;

C_s : Constante de Stephan-Boltzmann ($C_s=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{°C}^4$) ;

T_s : Température à la surface du masque (°C) ;

T_{air} : Température de l'air (°C).

I.2.2 Transfert de chaleur par convection :

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie, dans ce cas l'écoulement transporte le fluide et l'énergie.

L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de température, on dit que *la convection est naturelle ou libre*. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé *convection forcée* (Fig. I.8) (www.lmm.jussieu.fr/~lagree/COURS/ENSTA/C2cond.ENSTA.pdf).

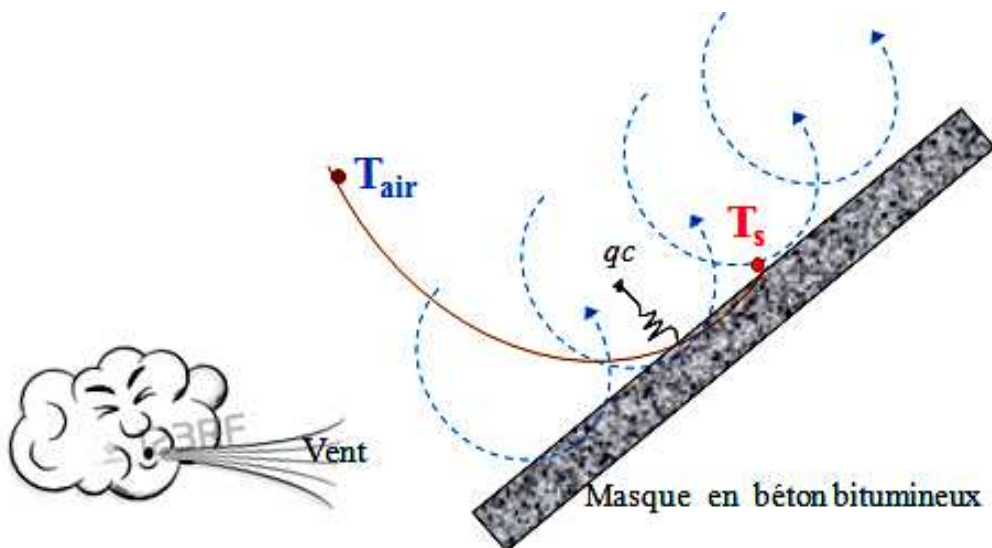


Fig. I.8: Evolution de la température aux abords de la paroi du masque

On peut exprimer la quantité de chaleur transmise par convection entre le masque en béton bitumineux et l'air ambiant, au moyen de l'équation suivante (*Incropera et al., 2002*) :

$$q_c = h_c (T_s - T_{air}) \quad (I-24)$$

Avec :

q_c : Flux de chaleur échangé par convection (W/m^2);

h_c : Coefficient d'échange convectif ($W/m^2\text{°C}$) ;

T_s : Température à la surface du masque ($^{\circ}C$) ;

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

- Lorsque la valeur de q_c est négative, il y'a un gain de chaleur pour la surface du masque en béton bitumineux par rapport à l'air ambiant;

- Lorsque la valeur de q_c est positive, il y'a perte de chaleur du masque en béton bitumineux par rapport à l'air ambiant (*Maken, 2012*).

I.2.2.1 Evaluation de coefficient d'échange convectif :

Il existe quatre méthodes générales pour déterminer les coefficients d'échange de chaleur par convection (www.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/Chap4.pdf):

1. L'analyse dimensionnelle combinée avec les expériences ;
2. Les solutions mathématiques exactes des équations de la couche limite ;
3. Les études approchées de la couche limite par les méthodes d'intégration ;
4. L'analogie entre le transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement.

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer h_c qui dépend de nombreux paramètres :

- Caractéristiques du fluide ;
- Nature de l'écoulement ;
- La température ;
- La forme de la surface d'échange.

Le coefficient h_c dépend de plusieurs paramètres et l'échange de chaleur est d'autant plus actif, (h_c plus grand) lorsque :

- 1- La vitesse V d'écoulement du fluide est plus grande ;
- 2- Sa masse volumique ρ est plus grande ;
- 3- Sa chaleur spécifique C_p est plus grande ;
- 4- Sa conductivité thermique λ (ou sa diffusivité thermique a) est plus forte ;

5- Sa viscosité cinématique ν (m^2/s) = μ/ρ est plus faible.

h_c peut également dépendre des dimensions de la paroi, de sa nature et de sa forme.

Le coefficient d'échange convectif est donné par la formule suivante (www.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/Chap4.pdf):

$$h_c = \frac{Nu \cdot \lambda_{air}}{L} \quad (\text{I-25})$$

Avec :

Nu : Nombre de Nusselt : C'est le rapport de la quantité de chaleur échangée par convection à une quantité de chaleur échangée par conduction.

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$) ;

L : Longueur caractéristique du masque (m).

➤ Convection Forcée :

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...etc.). L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur qui se produisent entre un fluide et une paroi ([Hamdani, 2011](#)).

❖ Régime Laminaire : $Re < Re_{cr}$

$$Nu = 0.66(Pr)^{1/3}(Re)^{1/2} \quad (\text{I-26})$$

❖ Régime turbulent : $Re > Re_{cr}$

$$Nu = 0.036(Pr)^{1/3}(Re)^{4/5} \quad (\text{I-27})$$

Avec :

Re : Nombre de Reynolds :

Le régime d'écoulement d'un fluide peut être laminaire ou turbulent. Le passage d'un régime à un autre est caractérisé par le nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{V_{vent} \cdot L \cdot \rho_{air}}{\mu_{air}} \quad (\text{I-28})$$

V_{vent} : Vitesse du vent (m/s) ;

L : Longueur caractéristique du masque (m) ;

ρ_{air} : Masse volumique de l'air (kg/m^3) ;

μ_{air} : Viscosité dynamique de l'air ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$) ;

Re_{cr} : Nombre de Reynolds critique égale à $3 \cdot 10^5$.

Pr : Nombre de Prandlt :

Caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température, qui est donné par la relation suivante :

$$Pr = \frac{\mu_{air} \cdot C_{p\ air}}{\lambda_{air}} \quad (I-29)$$

$C_{p\ air}$: Chaleur spécifique de l'air (J/kg.°C) ;

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air (w/m.°C).

➤ **Convection naturelle ou libre:**

La particule chaude se met en mouvement et assure directement le transfert de la chaleur vers le milieu le plus froid : Le régime devient convectif.

L'équilibre mécanique impose que les parties les plus denses soient situées en dessous des moins denses. Les mouvements dans le fluide seront alors favorisés : c'est le phénomène de convection naturelle (www.docinsa.insa-lyon.fr/polycop/RPNE000028F.pdf).

❖ Régime Laminaire : $R_e < R_{ecr}$

$$Nu = 0.479(Gr \cdot \cos\theta)^{1/4} \quad (I-30)$$

Avec :

Gr : **Nombre de Grashof :** Caractérise la force de viscosité du fluide, est donné par la relation suivante :

$$Gr = \frac{g \cdot \rho_{air}^2 \cdot \beta_p \cdot L^3 \cdot (T_s - T_{air})}{\mu^2} \quad (I-31)$$

g : Accélération de la pesanteur égale a 9.81 (m/s²) ;

β_p : Est le coefficient de dilatation thermique de l'air, peut être calculé par la formule suivante :

$$\beta_p = \frac{1}{(T_{air} + 273.16)} \quad (I-32)$$

❖ Régime turbulent : $R_e > R_{ecr}$

$$Nu = 0.13(Gr \cdot \cos\theta \cdot Pr)^{1/3} \quad (I-33)$$

Avec :

Gr : Nombre de Grashof ;

Pr : Nombre de Prandlt ;

θ : Inclinaison du masque par rapport à la verticale est égale à (90- α).

I.2.3 Transfert de chaleur par conduction :

La conduction est le phénomène par lequel la chaleur se transmet, le transfert d'énergie se fait d'une région à haute température vers une autre à basse température à l'intérieur d'un milieu solide (liquide ou gazeux sous certaines conditions) ou entre différents milieux mis en contact.

Le transfert d'énergie se fait par transmission de l'énergie cinétique d'agitation thermique des particules qui ont une énergie cinétique plus grande dans les régions à température élevée vers les régions à température plus faible (www.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/Chap3.pdf).

Le masque, siège d'un phénomène de conduction, est en contact, en surface, avec l'air. Au droit de cette zone de contact, des échanges thermiques se produisent entre les deux milieux. Ce type de transfert à la frontière (air - enrobé bitumineux) est régi par la loi de Fourier (*Djemili, 2006 ; Incropera et al., 2002 ; Hamdani, 2011*) :

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2} \quad (\text{I-34})$$

Ou
$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{I-35})$$

Avec :

a : Diffusivité thermique (m^2/s) ;

λ : Conductivité thermique du matériau ($\text{w}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$) ;

ρ : Masse volumique du matériau (kg/m^3);

C_p : Chaleur spécifique du matériau ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$) ;

T : Température ($^\circ\text{C}$) ;

t : Temps (s) ;

x : Profondeur mesurée à partir de la surface du masque (m).

L'équation Fourier est une équation aux dérivées différentielle aux partielles, ou Il y a deux variables, x et t qui sont deux variables indépendantes. Pour résoudre cette équation, il faut des conditions aux limites, c'est à dire la valeur de la température aux bornes du domaine.

Pour résoudre cette équation, il faut diviser le temps (t) en parties différentielle Δt et la profondeur en parties Δx , donc on peut écrire l'équation I.35 comme suit :

$$\frac{\Delta T_t}{\Delta t} = a \frac{\Delta^2 T_x}{\Delta x^2} \quad (\text{I-36})$$

Lorsque la profondeur prend l'indice (n) et l'instant du temps prend l'indice (k)

On peut écrire ΔT_t et ΔT_x comme suit:

$$\Delta T_t = T_{n,k+1} - T_{n,k}$$

$$\Delta T_x = T_{n+1,k} - T_{n,k}$$

Alors que $\Delta^2 T_x$, est comme suit (www.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/Chap3.pdf):

$$\Delta^2 T_x = (T_{n+1,k} - T_{n,k}) - (T_{n,k} - T_{n-1,k}) = T_{n+1,k} - 2T_{n,k} + T_{n-1,k}$$

Et en écrie l'équation différentielle sous la forme suivante :

$$T_{n,k+1} - T_{n,k} = a \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{n+1,k} - 2T_{n,k} + T_{n-1,k}) \tag{I-37}$$

A partir de l'équation (I.38) les valeurs de la température sera calculé à chaque profondeur (n) a l'instant (k+1) avec la connaissance des températures à chaque profondeur (n) a l'instant (k) (Fig. I.9). Avec cette méthode on calcule les valeurs de la température dans les profondeurs à des instants successives en utilisons l'équation I.38.

Selon Crank-Nickolson: $\frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ sera remplacer par $\frac{d^2 T}{dx^2}$

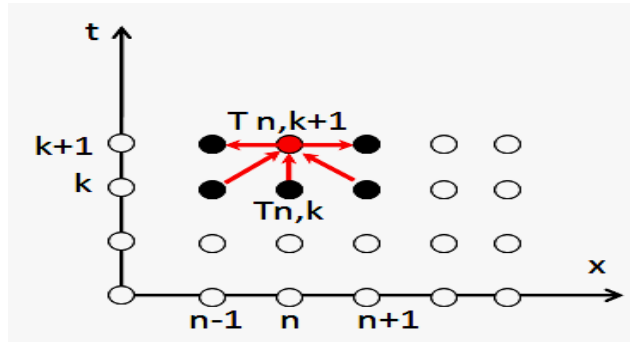


Fig. I.9 : Schéma illustrant la progression d'un pas de temps avec l'algorithme de Crank-Nicholson (www.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/Chap3.pdf).

Suivant le schéma de la figure I.9, l'équation (I.35), s'écrira de la manière suivante :

$$\frac{T_{n,k+1} - T_{n,k}}{\Delta t} = \frac{a}{2} \left[\frac{T_{n+1,k+1} - 2T_{n,k+1} + T_{n-1,k+1} + T_{n+1,k} - 2T_{n,k} + T_{n-1,k}}{\Delta x^2} \right] \tag{I-38}$$

$$2(T_{n,k+1} - T_{n,k}) = \frac{\Delta t * a}{\Delta x^2} (T_{n+1,k+1} - 2T_{n,k+1} + T_{n-1,k+1} + T_{n+1,k} - 2T_{n,k} + T_{n-1,k})$$

Posons $r = \frac{\Delta t * a}{\Delta x^2}$, on trouve l'équation (Fig. I.10):

$$-r T_{n-1,k+1} + (2 + 2r)T_{n,k+1} - rT_{n+1,k+1} = rT_{n-1,k} + (2 - 2r)T_{n,k} + rT_{n+1,k} \tag{I-39}$$

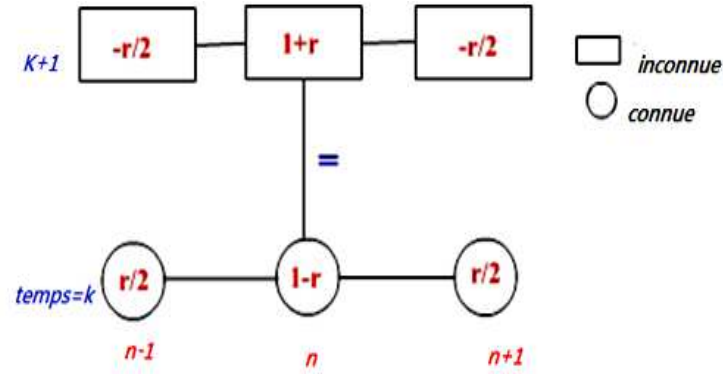


Fig. I.10: Schéma numérique de Crank – Nicolson
 (www.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/Chap3.pdf).

Lorsque nous fixons k et faisons varier n , nous obtenons le système linéaire suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} -r T_{0,k+1} + (2 + 2r)T_{1,k+1} - rT_{2,k+1} = rT_{0,k} + (2 - 2r)T_{1,k} + rT_{2,k} \\ -r T_{1,k+1} + (2 + 2r)T_{2,k+1} - rT_{3,k+1} = rT_{1,k} + (2 - 2r)T_{2,k} + rT_{3,k} \\ -r T_{2,k+1} + (2 + 2r)T_{3,k+1} - rT_{4,k+1} = rT_{2,k} + (2 - 2r)T_{3,k} + rT_{4,k} \\ -r T_{n(x-2),k+1} + (2 + 2r)T_{n(x-1),k+1} - rT_{n(x),k+1} = rT_{n(x-1),k} + (2 - 2r)T_{n(x),k} + rT_{n(x),k} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow M_1 T^{k+1} + N_1 = M_2 T^k + N_2 \tag{I.40}$$

Avec :

$$M_1 = \begin{pmatrix} 2 + 2r & -r & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -r & 2 + 2r & -r & \ddots & & \vdots \\ 0 & -r & 2 + 2r & -r & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & -r & 2 + 2r & -r \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -r & 2 + 2r \end{pmatrix}, \quad N_1 = \begin{pmatrix} -rT_{0,k+1} \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ -rT_{n(x),k+1} \end{pmatrix}$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 2 - 2r & r & 0 & \dots & \dots & 0 \\ r & 2 - 2r & r & \ddots & & \vdots \\ 0 & r & 2 - 2r & r & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & r & 2 - 2r & r \\ 0 & \dots & \dots & 0 & r & 2 - 2r \end{pmatrix}, \quad N_2 = \begin{pmatrix} -rT_{0,k} \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ -rT_{n(x),k} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow T_{k+1} = M_1^{-1} [M_2 T_k + (N_2 - N_1)] \quad (I.41)$$

Ce system matriciel est linéaire d'ordre $n_x - 1$.

I.2.3.1 Evolution des températures dans la structure :

La structure est constituée de couches de nature et de caractéristiques thermiques différentes, la figure I.11 schématise la structure étudié (masque en béton bitumineux + support + corps du barrage), l'indice «i» de la première couche d'enrobé bitumineux égal à 1 et celui du corps du barrage étant égal à n .

Dans cette étude :

- La température de la structure n'est plus influencée par l'apport calorifique de la couche d'enrobé bitumineux à une profondeur de 1 m, profondeur maximale prise en compte dans le modèle.
- Les différentes couches de la structure sont considérées isotropes et homogènes;
- La vitesse du vent est constante sur toute la période considérée;
- Les effets de bords ne sont pas pris en compte;
- Il y a conservation du flux en tout point de la structure;
- Le rayonnement solaire agit uniquement à la surface du masque.

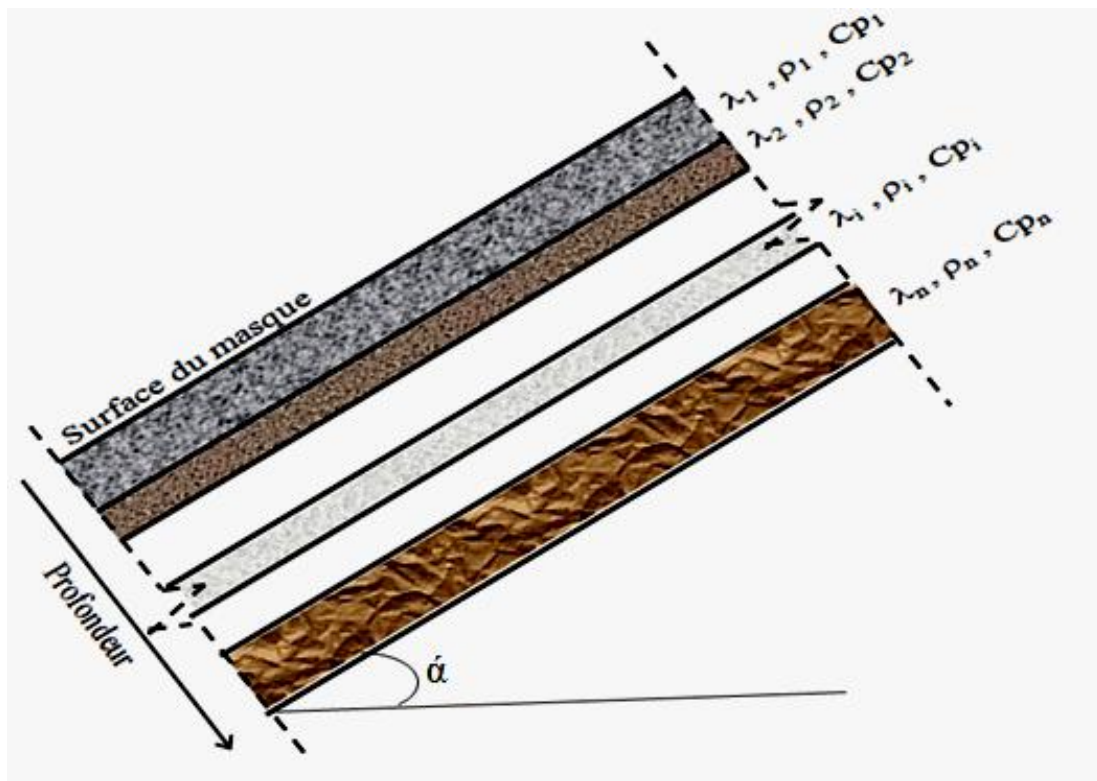


Fig. I.11 : Modélisation de la structure.

I.2.3.2 Propriétés thermiques et physiques du masque en béton bitumineux :

Pour réaliser une analyse de transfert de chaleur , trois paramètres importants doivent être définis : la diffusivité thermique (a), la conductivité thermique (λ) et la chaleur spécifique (Cp), et bien sur la masse volumique du matériau étudié (ρ).

➤ Diffusivité thermique

La diffusivité thermique (a) en m^2/s est une grandeur physique caractérisant la vitesse avec laquelle la température se propage à l'intérieur d'un matériau. Elle représente donc l'indice de facilité ou difficulté avec laquelle les changements de température peuvent avoir lieu dans les différents types de matériaux (béton poreux, béton bitumineux, béton armé...). Cette propriété, aussi bien que la conductivité thermique, est nécessaire pour le développement des gradients de température, des déformations thermiques et de la fissuration du béton bitumineux.

➤ Chaleur spécifique

La chaleur spécifique Cp en $J /Kg.°C$, caractérise la capacité d'un matériau de stocker l'énergie thermique (chaleur), elle mesure la quantité d'énergie nécessaire pour varier de $1°C$ la température de la masse d'un kilogramme de matériau.

Elle représente aussi la capacité du béton bitumineux d'emmagasiner de la chaleur. Elle augmente lorsque la teneur en eau du béton et la température augmentent, et quand la masse volumique diminue.

➤ Conductivité thermique

La conductivité thermique λ de l'enrobé bitumineux qui traduit son aptitude à conduire la chaleur ($W/m.°C$), plus la conductivité est élevée, plus le matériau laisse passer la chaleur ; A l'inverse, plus la conductivité est faible, plus le matériau est isolant.

➤ Masse volumique

La masse volumique ρ en kg/m^3 d'un liquide ou d'un solide est la masse de matériau par unité de volume. Tous les matériaux ont des masses volumiques différentes, ce qui permet de les caractériser et de les différencier.

Les valeurs des propriétés physiques et thermiques des différents matériaux utilisés dans cette étude sont tirées à partir du tableau I.1.

Tableau I.1: Propriétés physico-thermiques des matériaux utilisés (Djemili, 2006 ; ANBT, ?).

Matériaux	Conductivité thermique (w/m.°C)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (w.s/kg.°C)
Béton armé	1.63	2500	1047
Béton bitumineux	1.165	2230	930
Béton poreux	1.27	2310	942
Calcaire massif (barrage de Ghrib)	2.8	2700	920
Grés très bien cimenté (barrage de Bouhnifia)	2.3	2200	712

Conclusion :

Nous avons décrit dans ce chapitre, que la température de surface dans les masques en béton bitumineux était gouvernée par les échanges thermiques qui interviennent à l'interface masque-atmosphère.

Le rayonnement solaire reçu par le masque est à l'origine de ces échanges d'énergie, lesquels sont de trois types : radiatif (rayonnement directe, rayonnement atmosphérique et rayonnement diffus), convectif (flux de convection libre ou forcé), conductif (flux de conduction de chaleur dans le masque).

Nous avons enfin montré que les températures sont influencées par les échanges dépendant de l'énergie solaire et qui a son tour dépend des paramètres géographiques, astronomiques, et climatiques.

Chapitre II : Modélisation du transfert de chaleur dans les masques en béton bitumineux.

Introduction :

Dans un solide, la diffusion de chaleur d'une zone chaude vers une zone froide, est régit par la loi de Fourier, qui stipule qu'il existe une relation linéaire entre la densité de flux et le gradient de température. Dans le cas d'un milieu isotrope, la densité de flux est proportionnelle au gradient de température.

Un bon modèle appliqué aux domaines de l'ingénierie suppose des propriétés thermo physiques bien déterminées et fiables.

Ce chapitre consiste à développer une méthodologie de modélisation du comportement thermique transitoire des masques en béton bitumineux à l'aide du logiciel « Fluent 6.3.26 » pour évaluer les champs de températures aux seins des masques en béton bitumineux, et validé les résultats simulés par les données expérimentales. Le modèle numérique doit donc d'être le plus complet possible afin d'obtenir des résultats cohérents avec les valeurs expérimentales lors de la validation du modèle dans le chapitre suivant.

II.1 Objet de la modélisation :

L'objectif du modèle développé est de calculer la température en fonction du temps à la surface et a plusieurs profondeurs du masque en béton bitumineux soit il est exposé directement au soleil soit protéger contre les effets des agents climatiques.

Cette température varie en fonction de plusieurs paramètres astronomiques, climatiques et des propriétés des différents matériaux qui composent le masque.

II.2 Présentation des sites d'étude :

II.2.1 Le barrage de Ghrib (wilaya d'Ain Defla):

Le barrage de Ghrib est situé sur le cours supérieur de l'Oued Chélif, il accumule les eaux du bassin supérieur en vue de l'irrigation des plaines situées en aval et accessoirement de la production de l'énergie électrique. L'ouvrage est constitué par une digue d'enrochement arrimé.

Construit entre 1926 et 1938 le barrage Ghrib a été parmi les premiers ouvrages en enrochement réalisé en Algérie avec un masque amont en béton bitumineux. Ce masque a rempli convenablement son rôle d'étanchéité souple (*ANBT, ?*).

Les caractéristiques techniques principales du barrage sont (*Djemili, 2006*):

- Longueur en crête : 270 m,
- Largeur à la base : 148 m,

- Hauteur maximale : 72 m ;
- Pente du talus amont : varient de 2/3 à 1/1 ;
- Pente du talus aval : 5/4 ;
- Capacité de la retenue : 300.10^6 m^3 .

Le masque du barrage Ghrib est composé par :

- Un support ;
- Une couche drainante en béton poreux de 8 centimètres d'épaisseur ;
- Deux couches de 6 centimètres d'épaisseur du béton bitumineux.

Les données angulaires, géographiques et géométriques (*Djemili, 2006*):

- γ : Longitude du lieu en degré $02^{\circ}35'1400''\text{E}$;
- φ : Latitude du lieu en degré $36^{\circ}07'5290 \text{ N}$;
- z : Altitude du lieu en m (cote de la crête) 435 m ;
- B : Coefficient de trouble atmosphérique, pour un lieu rural égale à 0.05;
- ε_s : Facteur dépend de la couleur dans le cas bitume corps noir égal à 0.95 ;
- r : Coefficient de réflexion de la lumière sur le béton bitumineux $r = 0.05$.

II.2.2 Le barrage de Bouhnifia (wilaya de Mascara):

La construction du barrage en enrochements de Bouhnifia présente à quelques variantes près les mêmes caractéristiques que celui du barrage du Ghrib. Les travaux débutent en 1930 et cadrent dans le programme hydraulique agricole Algérien. Ils atteignent comme pour le barrage de Ghrib une ampleur exceptionnelle, due en grande partie aux difficultés du terrain.

Le barrage se situe dans la plaine de la Macta et construit sur l'oued El Hammam qui prend sa source dans les montagnes de Daïa, à 50 kilomètres à l'Est de la ville d'Oran, la plus aride des plaines littorales de l'Algérie est également l'une des plus étendues. Le développement agricole de cette région est directement lié au débit des eaux d'irrigation, d'autant plus que les ressources en eaux souterraines sont presque inexistantes (www.insiglo.com/images/30/bdc_3.pdf).

Les caractéristiques techniques principales du barrage sont (*ANBT, ?*):

- Longueur en crête 464 m ;
- Hauteur au –dessus du thalweg 53 m ;
- Largeur du couronnement 5 m ;
- Fruit du talus amont variable de 0,8/1 à 1/1 ;
- Fruit du talus aval 5/4 ;
- Largeur du massif à la base 137 m ;
- Cube d'enrochements 750.000 m^3 ;
- Capacité de la cuvette 72.10^6 m^3 .

Le masque du barrage de Bouhnifia est composé par (*Bounaadja, 2009*):

- Un support de 40 cm d'épaisseur en enrochement ;
- Une couche drainante en béton poreux de 12 cm d'épaisseur ;
- Deux couches de 6 centimètres d'épaisseur chacune du béton bitumineux ;
- Un avant masque composé d'une couche en béton armé de 12 cm d'épaisseur.

Les données angulaires, géographiques et géométriques :

- γ : Longitude du lieu en degré $0^{\circ}3'36''$ O ;
- φ : Latitude du lieu en degré $35^{\circ}16'39''$ N ;
- z : altitude du lieu en m (cote de la crête) 300 m ;
- B : Coefficient de trouble atmosphérique qui prend $B=0.05$ pour un lieu rural ;
- ε_s : Facteur dépend de la couleur dans le cas bitume corps noir égal à 0.95 ;
- r : Coefficient de réflexion de la lumière sur le béton bitumineux $r = 0.05$.

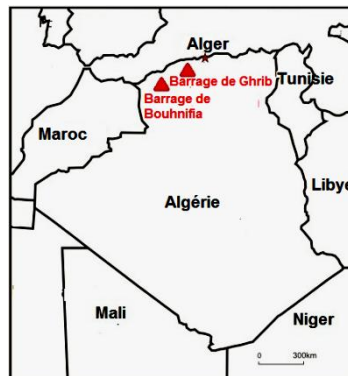


Fig. II.1 : Situation géographique des sites d'études.

II.2.3 Caractéristiques climatiques :

Avant de faire une analyse de transfert de chaleur pour obtenir la distribution de la température au sein du masque en béton bitumineux, il est nécessaire de définir les données climatiques qui serviront de données d'entrée.

II.2.3.1 Température de l'air :

Les variations saisonnières cycliques de température peuvent entraîner :

- En hiver des gonflements en phase de gel dû à la transformation de l'eau liquide initialement contenue dans les pores en glace, soit par l'effondrement des propriétés mécaniques et en particulier de la portance en phase dégel voire des contraintes pouvant causer la fissuration, ceci dû à la différence de température entre la surface et l'intérieur du masque en béton bitumineux (*Mauduit et al., 2013*).
- En été, l'effet des températures provoque le fluage des couches bitumineuses du masque. Il est également reconnu que la lumière du soleil et les rayons ultraviolets accélèrent le vieillissement des enrobés bitumineux exposés directement au soleil en oxydant, durcissant et affaiblissant le bitume (*Mauduit et al., 2013*).

La figure II.1 et II.2 montre les variations de la température moyennes mensuelles des deux sites d'étude de Ghrib et de Bouhnifia.

Pour caractériser les différents paramètres climatiques, on utilise les stations les plus proches des sites d'étude, la station de Ghriss-Mascara pour le barrage de Bouhnifia (série 1987/2012) et la station de Khemis Meliana pour le barrage de Ghrib (série 1975/2007).

Les températures maximales mensuelles les plus élevées sont observées pendant la période estivale (Juin - Aout) avec une valeur maximale de 35.95 °C au mois d'Aout pour la station de Ghriss-Mascara et de 45.3°C pour la station de Khemis Meliana, les moyennes des minimas de température localisées au mois de Janvier pour les deux stations avec 0.78 °C pour la station de Khemis Meliana et de 2.98°C pour la station de Ghriss-Mascara.

La température moyenne annuelle pour la station de Ghriss-Mascara est de 17.02°C et de 20.83 °C pour la station de Khemis Meliana (*Yahiaoui, 2015 ; Bellouz et Touati, 2018*).

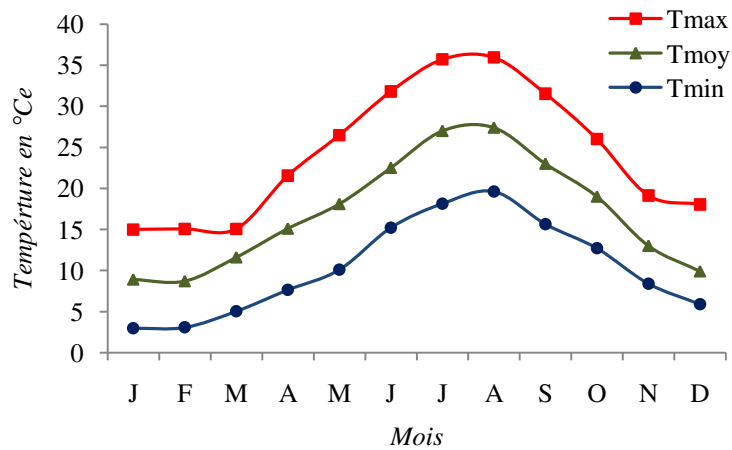


Fig. II.2 : Variation de la température de l'air de la station de Ghriss-Mascara, série 1987/2012.

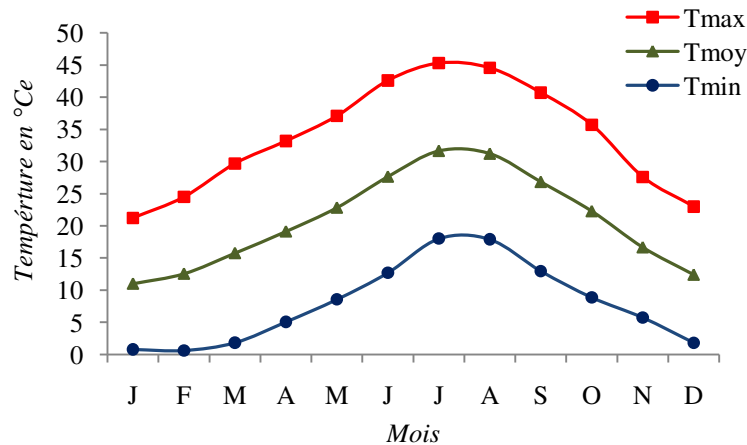


Fig. II.3 : Variation de la température de l'air de la station de Khemis Meliana, série 1975/2007.

II.2.3.2 Vent

Le vent est un déplacement d'air provoqué par une différence de pression d'un lieu à un autre. Habituellement on donne sa direction qui indique le lieu d'où provient l'air ambiant, et sa vitesse, qui agit en combinaison avec les autres éléments du climat (Azizou, 2015).

La vitesse du vent varie de 0.89 m/s à 2.19 m/s pour la station de Khemis Meliana pour la période 1975/2007 (Bellouz et Touati, 2018), et varie de 1.1 m/s à 3.3 m/s pour la station de Ghriss-Mascara (Yahiaoui, 2015).

II.2.3.3 Humidité relative

L'humidité relative c'est le rapport entre la masse réelle contenue et la masse maximale possible de vapeur d'eau dans l'air, ou en d'autres termes, le rapport entre l'humidité absolue et l'humidité maximale. En tant que quotient de deux quantités avec la même unité, il s'agit d'une quantité sans dimension (exprimée en %). L'humidité relative varie de 50 % à 80 % pour la station de Khemis Meliana (Fig. II.4) et de 52 % à 77.1 % pour la station de Ghriss-Mascara.

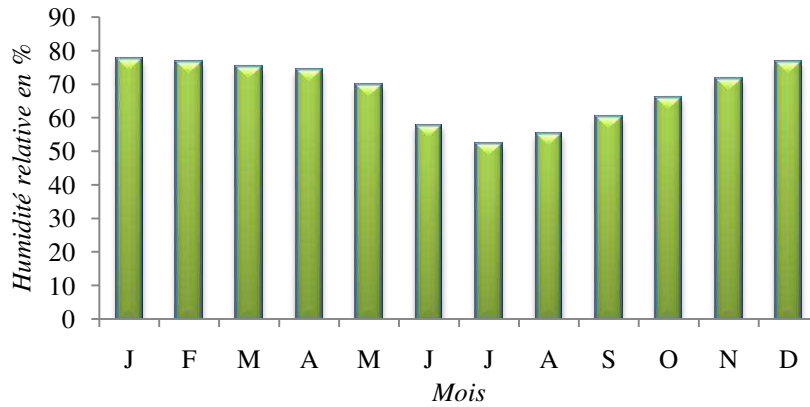


Fig. II.4 : Variation de l'humidité relative de la station de Ghriss-Mascara, série 1987/2012.

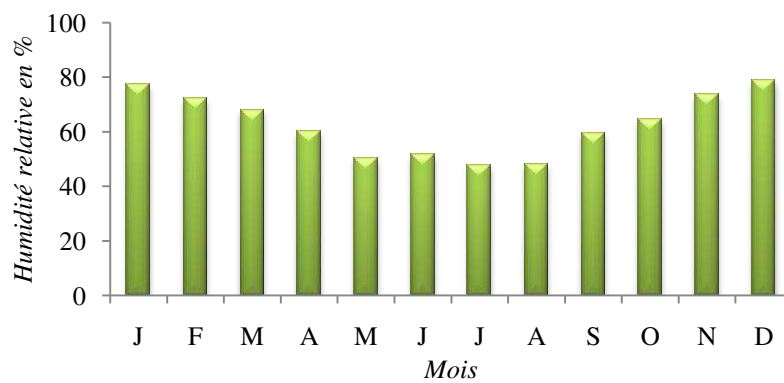


Fig. II.5 : Variation de l'humidité relative de la station de Khemis Meliana, série 1975/2007.

II.3 Modélisation numérique:

II.3.1 Présentation du logiciel FLUENT :

Fluent est un code de calcul dans le CFD 'Computational Fluid Dynamics' qui modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes.

Ce solveur offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, des turbulences, des transferts de chaleur et des réactions chimiques. Le logiciel est utilisé pour des applications industrielles allant de l'écoulement d'air autour d'une aile d'avion, à la combustion à l'intérieur d'un four ; des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolières ; du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteursetc.

Ce qui nous a amené à choisir le code de calcul en volume fini FLUENT comme solveur pour la problématique traitée c'est, le fait de l'avoir appliqué à des cas plus complexes que le transfert de chaleur couplés (conduction, convection, rayonnement). (*Guestal, 2010*). Le modèleur associé à FLUENT et qui a été utilisé pour notre étude est GAMBIT.

Le logiciel Fluent version 6.3.26 que l'on a utilisé permet de modéliser le transfert de chaleur transitoire en utilisant la méthode des volumes finis. La résolution du modèle est effectuée en double précision, et permet aussi d'utiliser des fonctions externes (*UDF : user-defined-functions*) comme paramètres, fonctions préalablement définies dans un langage de type C. Dans le cas de la modélisation du masque, il serait souhaitable à terme de pouvoir imposer en condition aux limites à la surface un profil de températures qui évoluent dans le temps, pour représenter les conditions réelles prévalant en plusieurs profondeurs du masque.

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage, ainsi que le type des conditions aux limites du problème traité. Il permet aussi de définir le type des différentes frontières du système ainsi que la nature des domaines décrits globalement (solide ou fluide). Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

Les étapes pour le déroulement des simulations sur les deux logiciels GAMBIT (2.2.30) et FLUENT (6.3.26) sont résumées sur la Figure II.6.

II.3.2 Implantation des *UDF* (*User Defined Function*) :

Afin de simuler nos différents modèles dans un régime transitoire (instationnaire) nous avons besoin des fonctions mathématiques qui correspondent à nos données mesurées durant la journée de simulation.

Une *UDF* c'est une fonction définie par l'utilisateur, et est une fonction C qui peut être chargé dynamiquement avec le solveur Fluent pour améliorer ses caractéristiques de série.

Les *UDF* sont utiliser à fin de :

- ✓ Personnaliser les conditions aux limites, définir les propriétés des matériaux, des surfaces et des vitesses de réaction de volume, les termes sources...etc ;
- ✓ Régler les valeurs calculées sur une base une seule fois par itération ;
- ✓ Initialisation d'une solution ;
- ✓ Effectuer asynchrone (sur demande) exécution d'une *UDF* ;
- ✓ Exécuter à la fin d'une itération, à la sortie de FLUENT, ou lors du chargement d'une bibliothèque *UDF* compilé ;
- ✓ Améliorer le post-traitement (*Fluent user's guide*).

Un fichier *UDF* sous forme de subroutine écrite en langage C a été réalisé et inclus dans les calculs des différents modes de transfert thermique tel que la conduction, convection ou rayonnement à fin de déterminer le champ de température au sein du masque.

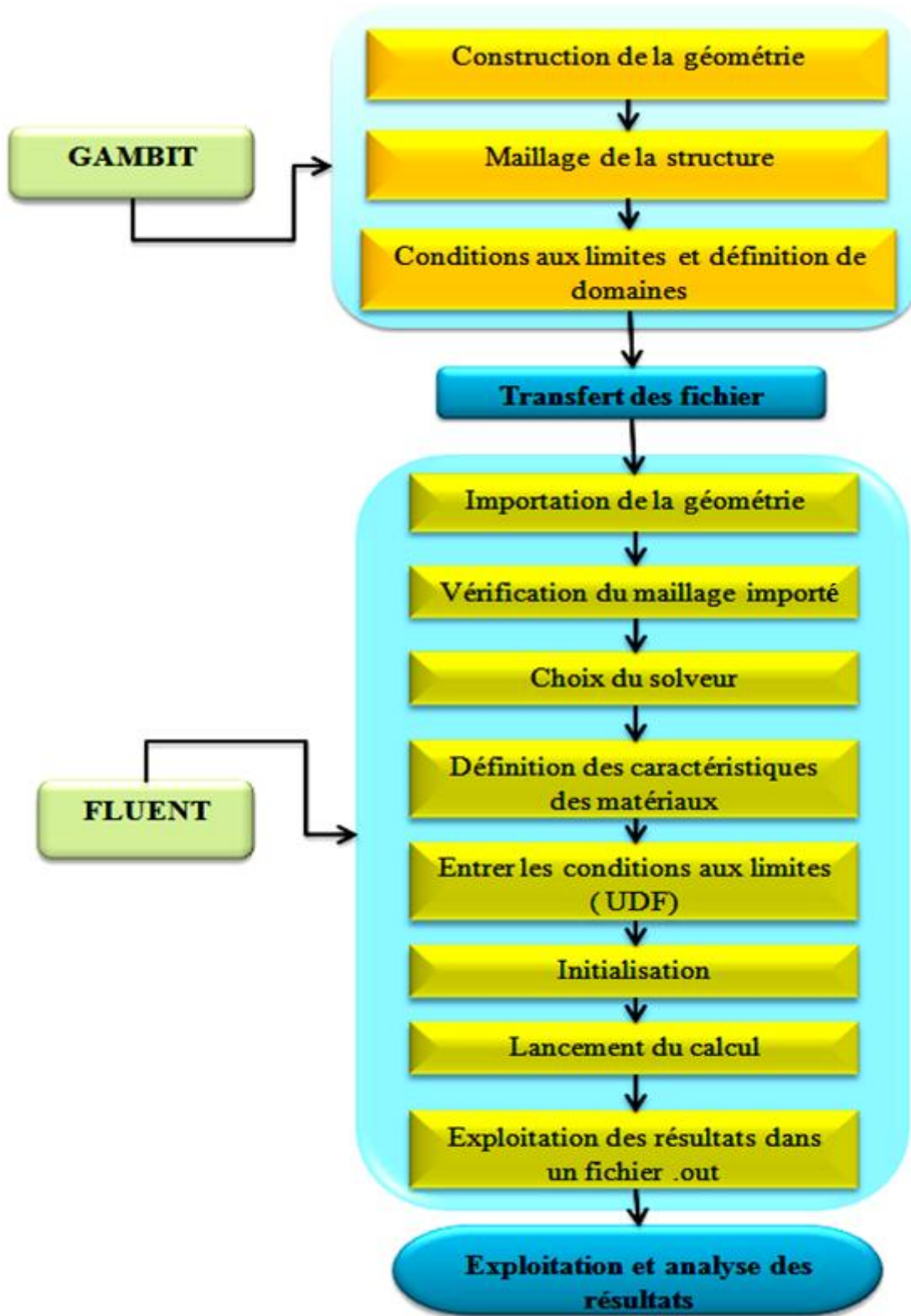


Fig. II.6 : Schéma du processus de modélisation numérique.

II.3.3 Dispositif expérimental :

Le modèle de base sur lequel va s'établir l'ensemble de l'étude concerne le modèle du barrage sur le site de Ghrib à Ain Defla, là où on a des relevés de températures de 17 heures dans la journée 25 Aout 1959 (*Kreitmann, 1959*). Le site d'étude du barrage Ghrib est constitué d'une digue en enrochement muni d'un organe d'étanchéité à sa face amont (masque d'étanchéité).

On y distingue donc deux parties, la digue et le masque. Sur le masque des thermocouples (TH) ont été placés à trois endroits stratégiques correspondant aux trois parties du modèle expérimental à 1 cm, à 6 cm et 10 cm de profondeur.

Pour la suite on utilise la nomenclature TH 1 cm, TH 6 cm et TH 10 cm, respectivement pour les thermocouples situés à 1 cm, 6 cm et 10 cm compté à partir de la surface du masque.

III.3.4 Modèle mathématique :

III.3.4.1 Modèle géométrique :

Le modèle géométrique décrit ci-dessous comprend deux zones principales : la digue et le masque. Les dimensions sont indiquées sur la figure (II.7).

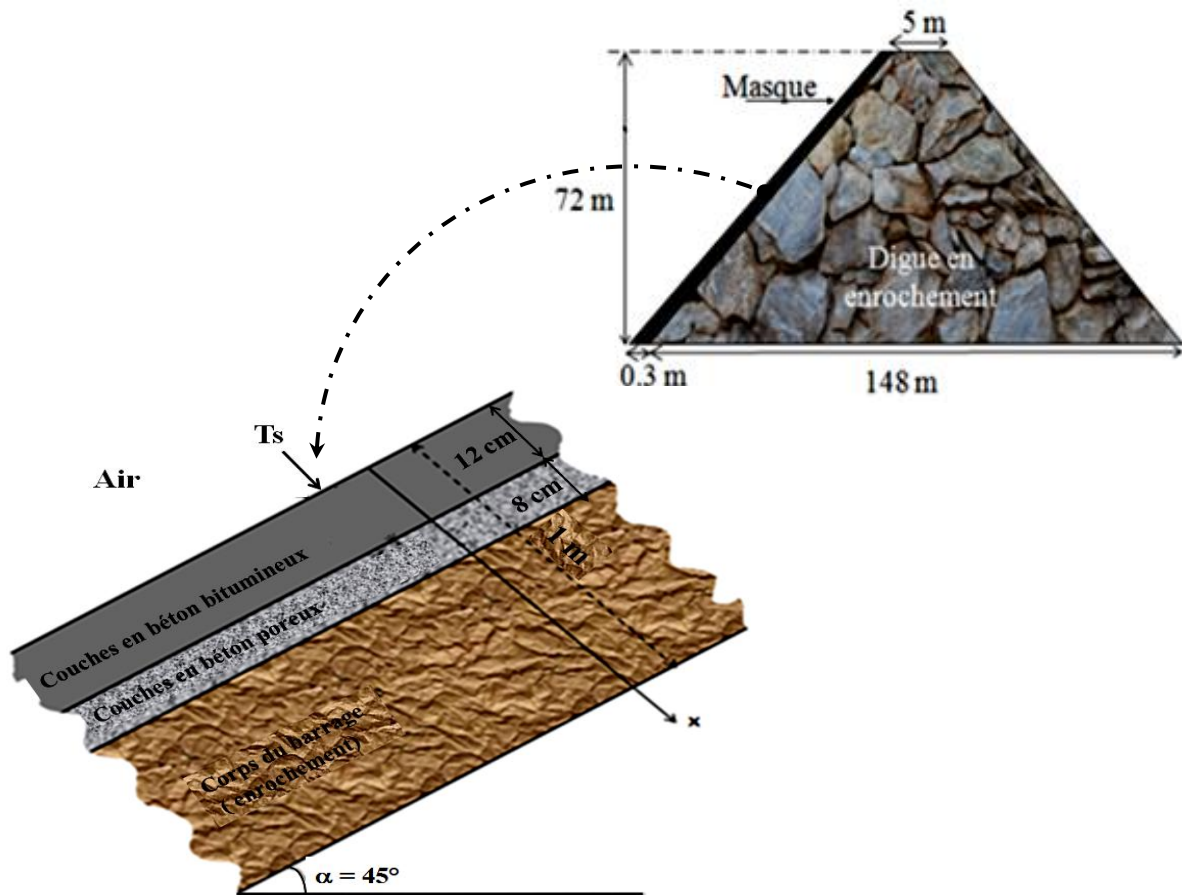


Figure II.7 : Modèle géométrique du masque en béton bitumineux du barrage Ghrib.

III.3.5 *Modèle physique :*

Pour le modèle initial, les différents échanges thermiques seront simplifiés. Ainsi, on suppose que le transfert thermique dans l'ensemble du masque est dominé par la conduction. D'autre part, en ce qui concerne la surface du modèle, elle est dans la réalité soumise aux effets convectifs et radiatifs de l'atmosphère environnant et du soleil. Ces effets seront considérés comme condition aux limites par les températures imposées à la surface.

On suppose également une géométrie bidimensionnelle (autrement dit, le masque est supposé de longueur semi-infinie dans la direction perpendiculaire à la figure II.1. Le profil de température dans le masque est donc de la forme $T(x,t)$. Le transfert de chaleur dans le modèle initial se faisant uniquement par conduction, l'équation de conservation de l'énergie (I.34):

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2}$$

L'approche numérique consiste à distinguer les températures au cours du temps et à différentes profondeurs du masque.

II.3.6 *Définition du modèle numérique utilisé :*

II.3.6.1 Méthode des volumes finis:

La méthode des volumes finis utilisée ici a été mise au point pour des lois de conservation. Le problème thermique réside dans la résolution de l'équation de la chaleur, donc d'une équation aux dérivées partielles. Le principe de la méthode consiste à résoudre l'équation aux dérivées partielles de manière approchée sur un maillage. Ce maillage est constitué de volumes finis. Les volumes finis sont des petits volumes (en 3D, des surfaces en 2D, des segments en 1D) dont la réunion forme le domaine d'étude (*Chataigner, 2008*).

La méthode des volumes finis (MVF) est assez récente, est à l'origine de la majorité des codes de calculs (Phoenix, Fluent, CFD,...). Elle est très largement utilisée dans tous les domaines de la physique, du transfert de chaleur aux écoulements de fluides est particulièrement bien adaptée à toutes les équations de transport (mécanique des fluides, énergétique, mécanique du solide, . . .) (*Gastel, 2010*).

Elle s'applique aussi très bien à l'étude du transfert de chaleur. Cette méthode est conservative, assure un bilan d'énergie correct, et permettant une augmentation du niveau de précision atteint jusque là, voire même des convergences de résidus plus rapides qu'avec des méthodes plus classiques (*Collin, 2006*).

II.3.7 *Définition des conditions aux limites et initiales :*

Le modèle numérique a pour but de déterminer, à partir de conditions aux limites imposées sur son contour, le profil de température à l'intérieur du masque. Pour cela, un profil de

température est imposé à la surface du masque. Ce profil de températures à la surface est construit à partir de relevés expérimentaux.

La fonction de température à imposer en condition aux limites est construite par interpolation à partir du profil expérimental. Cette interpolation ne reproduisant pas parfaitement le profil expérimental, il se peut qu'apparaisse certaines différences de valeurs entre les résultats numériques et expérimentaux.

Pour le modèle initial, les différents échanges thermiques seront simplifiés. Ainsi, on suppose que le transfert thermique dans l'ensemble du masque est dominé par la conduction.

D'autre part, en ce qui concerne la surface du modèle, elle est dans la réalité soumise aux effets convectifs et radiatifs de l'atmosphère environnant et du soleil. Ces effets seront pour le moment considérés comme condition aux limites par les températures imposées à la surface déterminé expérimentalement (II-1).

$$T(x = 0, t) = T_{\text{expérimental}}(t) \quad (\text{II-1})$$

Le profil de température dans le masque est donc de la forme $T(x,t)$. La propagation de la chaleur dans le masque de diffusivité thermique a (I-35), sera décrite par l'équation de la chaleur (I-34) (*Belghazi, 2008 ; Ghouilem, 2014 ; Adam et al., 2016*):

En ce qui concerne les autres conditions aux limites, on impose des conditions adiabatiques pour les parois latérales supérieures et inférieures (car on considère qu'il n'y a pas de modification du profil de température).

Pour la limite à gauche du modèle et à une profondeur suffisamment importante, la température de la structure n'est plus influencée par l'apport calorifique de la couche d'enrobé bitumineux (II-2). Cette profondeur est, par hypothèse, égale à 1 m, correspondant à la zone de la digue en enrochement (*Chataigner, 2008; Ghouilem, 2014; Pilate, 2007 ; Adam et al., 2016*).

$$\frac{\partial T(x=l,t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{II-2})$$

La condition initiale à l'instant $t=t_0$ (II-3) :

$$T(x,t_0)=T_0(x) \quad (\text{II-3})$$

II.3.8. Application sur le barrage de Bouhnifia :

Pour le barrage de Bouhnifia, on a des relevés de températures de 19 heures dans les journées 26 Septembre 1933 (été) et 9 janvier 1934 (hiver) (*Ott, 1955*). Le barrage de Bouhnifia est constitué d'une digue en enrochement muni d'un organe d'étanchéité à sa face amont (masque d'étanchéité en béton bitumineux).

II.3.8.1 Modèle mathématique :

II.3.8.1.1 Modèle géométrique :

Le modèle géométrique décrit ci-dessous comprend deux zones principales : la digue et le masque. Les dimensions sont indiquées sur la figure II.8.

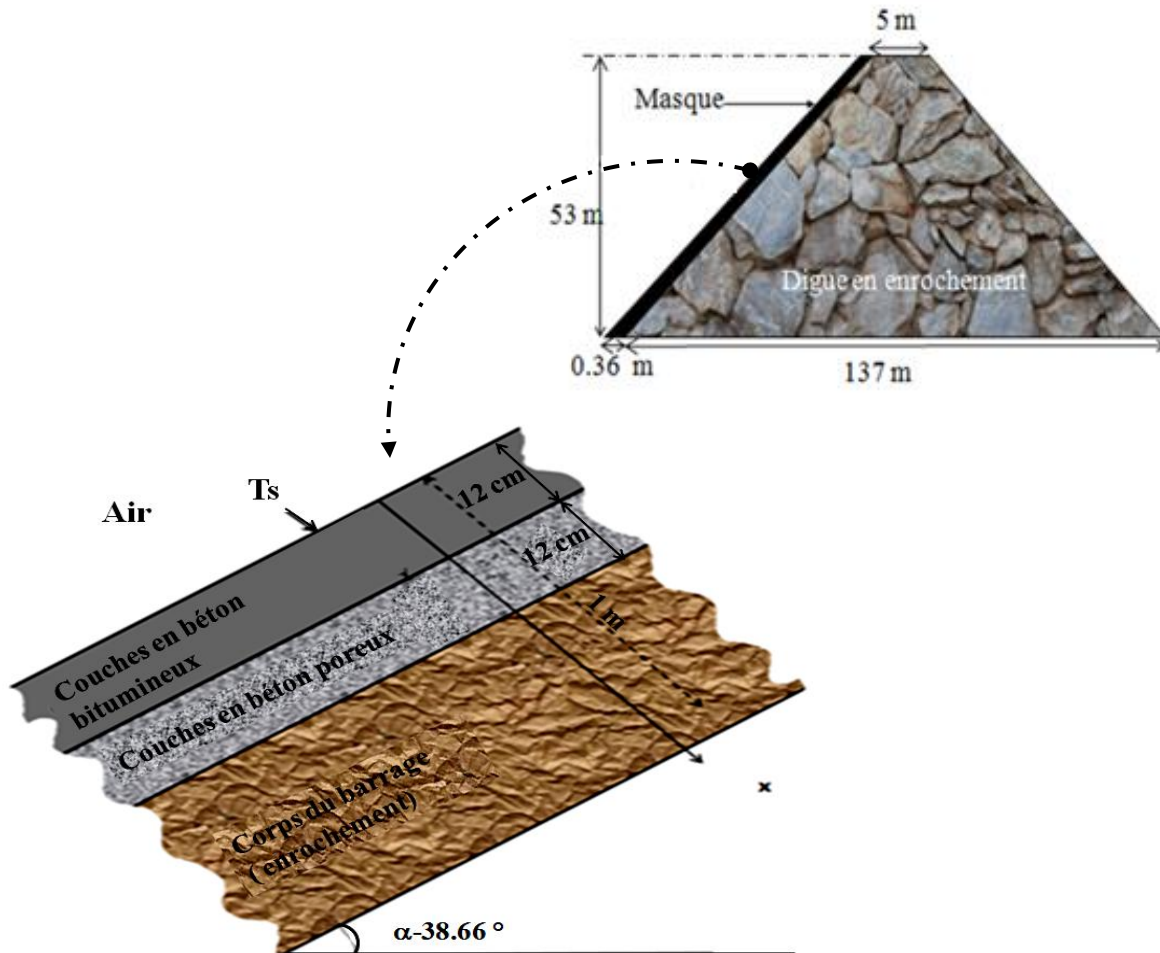


Fig. II.8 : Modèle géométrique du masque en béton bitumineux du barrage Bouhnifia

La discrétisation de la structure est faite en volume finis en 2D, de type quadratique. Concernant les conditions aux limites, on garde les mêmes définies précédemment pour le premier site « barrage de Ghrib ».

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux sites d'étude et les différentes caractéristiques climatiques telles que la température, le vent et l'humidité relative. Aussi nous avons défini les méthodes géométriques, physiques et numériques employées pour réaliser le modèle numérique de base. Cependant, avant de pouvoir tester l'effet des solutions pratiques envisagées, il faut tout d'abord valider ce modèle numérique initial par les données expérimentales. Une fois cela effectué dans le chapitre prochain, on pourra alors se lancer dans une modélisation plus complexe.

Chapitre III : Validation du modèle.

Introduction :

Dans ce chapitre, on va établir le modèle numérique, et déterminer les conditions aux limites à imposés sur ce modèle, puis le valider par des valeurs expérimentales. La validation de ce modèle est primordiale car il sera utilisé par la suite pour tester les différentes solutions pratiques existantes et proposées.

III.1 Réalisation du modèle numérique sous FLUENT :

III.1.1 Paramétrage :

La géométrie et le maillage de la structure sont réalisés au préalable à l'aide du logiciel « Gambit 2.2.30 », comme indiqué sur la figure III.1. La densité de maillage sur les différentes couches du masque est plus importante que sur le reste de la structure, car c'est à cet endroit que se passera la majorité des évolutions thermiques qui seront intéressantes.

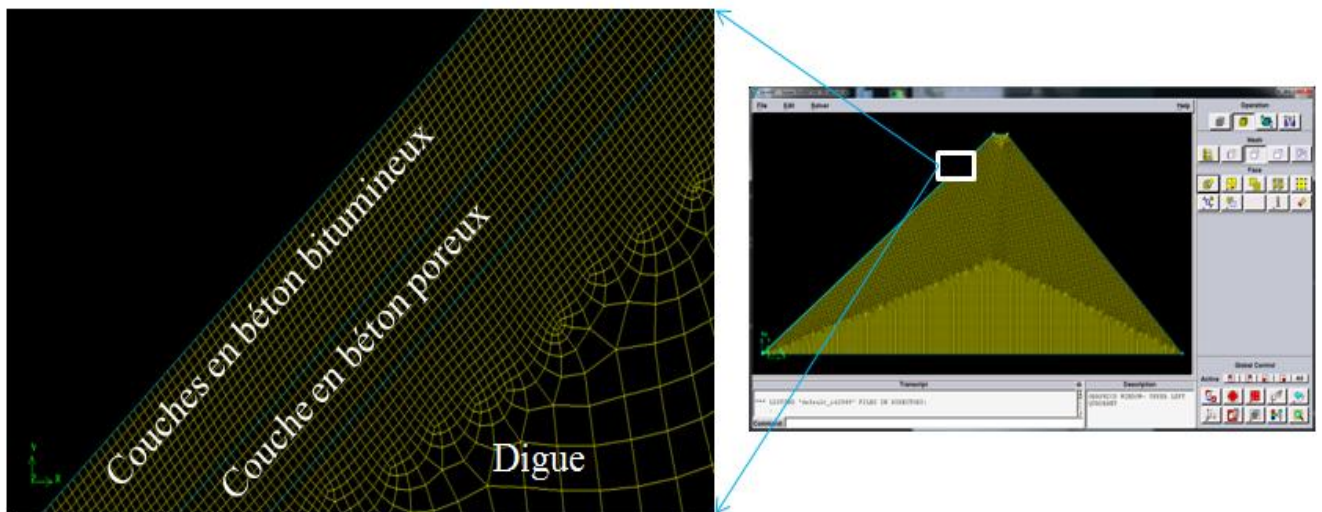


Fig. III.1 : Exemple de maillage réalisé sous Gambit 2.2.30.

Une fois le maillage est réalisé, il est exporté dans le logiciel Fluent 6.3.26. Une base de données contenant les propriétés thermiques des matériaux utilisés, ainsi qu'une *UDF* (*user-defined - functions*) est écrit préalablement en fichier texte, en langage de type C. et est chargées dans le logiciel. Pour le cas initial, l'*UDF* chargée contient uniquement le profil de température à imposer à la surface du masque.

L'objectif de ce cas numérique simple est de pouvoir se superposer au modèle simulé obtenu à l'aide des relevés expérimentaux.

III.1.1.1 Maillage et pas de temps :

La création de la géométrie de même que le maillage se font sous le logiciel « GAMBIT », deux types d'éléments pour le maillage sont disponibles, éléments quadrilatéraux et éléments triangulaires. Dans notre cas nous avons opté pour des éléments quadrilatéraux à cause de la simplicité de la géométrie et la rapidité de convergence avec ce type d'éléments.

Ce maillage à été réalisé avec des cellules dont la taille est variable, de petites dimensions sur les différentes couches du masque, pour assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient de température et de grandes dimensions dans le corps du barrage.

Le choix du maillage : Afin de vérifier l'indépendance du maillage sur la solution, les séries des calculs ont été effectuées pour plusieurs tailles des mailles. Comme le montre le tableau III.1, trois configurations de maillage ont été testées dans cette étude pour déterminer le meilleur compromis entre la précision et le temps de calcul : 2342 mailles, taille (0.025), 6167 mailles, taille (0.01) et 109287 mailles de taille (0.005).

Du tableau III.1 apparaît que la température devient insensible au nombre mailles, et nous adopterons, pour des raisons de précision le compromis, le temps de calcul et l'espace mémoire, le maillage de 6167 mailles de taille (0.01).

Tableau III.1 : Choix du maillage.

Tailles	Nombre de mailles	Écart relatif (%)
0.025	2342	0.223
0.01	6167	0.234
0.005	109287	0.239

- **Effet du pas du temps :**

Avant le lancement des simulations, nous avons voulu connaître l'effet du pas de temps sur nos calculs en variant ce dernier en fonction de la température. A partir du tableau III.2, nous avons opté pour un pas du temps égal à 60 secondes, afin de réaliser un compromis entre précision et temps de calcul.

Tableau III.2 : Choix du pas du temps.

Pas du temps (secondes)	Écart relatif (%)
60	0.94
120	1.06
600	3.5

III.1.2 Détermination des conditions aux limites :

III.1.2.1 Étude des données expérimentales :

Le logiciel « Fluent » permet aussi à travers l'utilisation des fonctions définis par utilisateurs (*UDF*), l'introduction de ces fonctions au logiciel permet d'évaluer nos profils de températures dans un régime instationnaire.

Pour la détermination de la fonction de la variation des températures à fin de l'imposer en conditions aux limites, on utilise les valeurs expérimentales relevées sur les deux sites des barrages de Bouhnifia et de Ghrib.

III.1.2.1.1 Le premier site : barrage de Ghrib :

La variation des températures expérimentales au thermocouple situé à la surface du masque, est donnée dans la figure III.2, où on observe un minimum de 295,45 Kelvin (22.3°C) à 6 AM, et un maximum de 322.15 Kelvin (49 °C) à 12:15 PM.

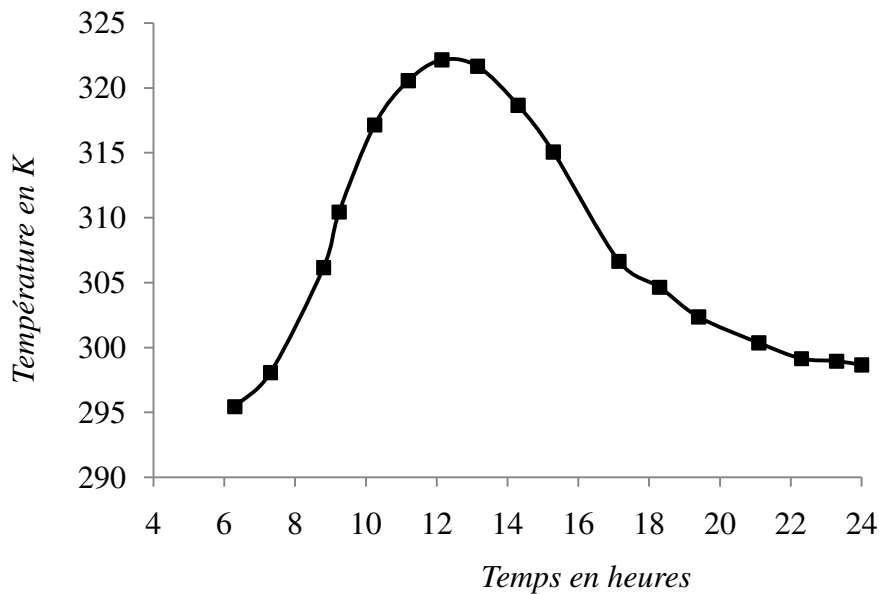


Fig. III.2 : Variation des températures expérimentales mesurées à la surface du masque brut, barrage Ghrib.

III.1.2.1.1.1 Détermination des fonctions de la variation de la température:

Afin de simuler nos différents modèles dans un régime instationnaire nous avons besoin des fonctions mathématiques qui correspondant à nos données climatiques mesurées durant la journée de simulation.

L'application "Analysis→Fitting" exécuté sur le logiciel OriginPro.2018 (Fig. III.3), permet de créer des courbes de tendance approximative le plus possible des courbes expérimentales.

$$y = y_0 + A * e^{-e\left(\left(\frac{x-x_c}{w}\right) - \frac{x-x_c}{w} + 1\right)} \tag{III.1}$$

La fonction est la suivante, ou T en Kelvin et t en secondes :

$$T = 295.80 + 26.607 * e^{-e\left(\left(\frac{t-44402.11}{11566.087}\right) - \frac{t-44402.11}{11566.087} + 1\right)} \tag{III.2}$$

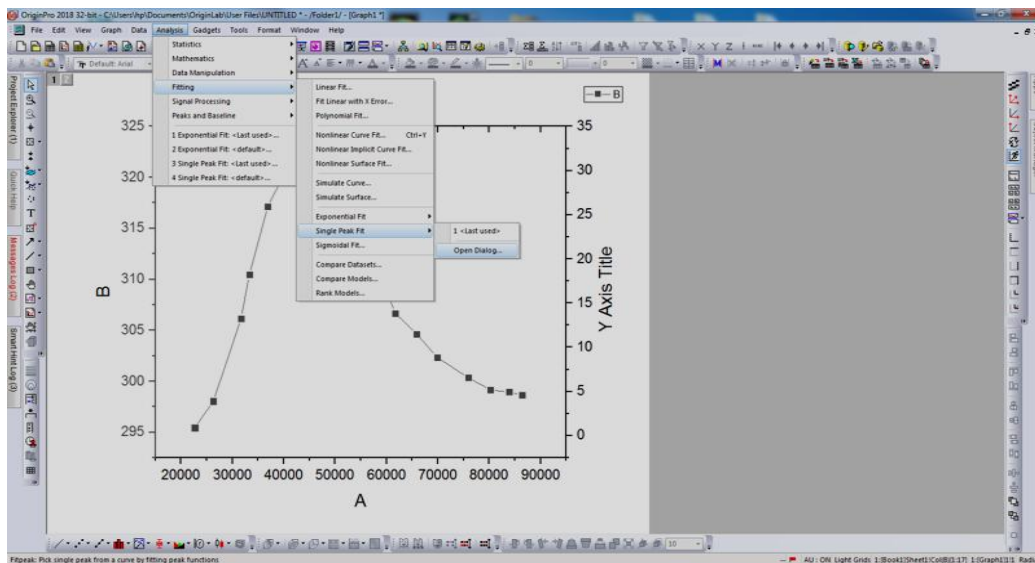


Fig. III.3 : Interface de « Analysis fitting » sur OriginPro.2018.

La figure III.4, représente la variation des températures expérimentales et obtenus par (*Fitting*), sur le logiciel « OriginPro.2018 ».

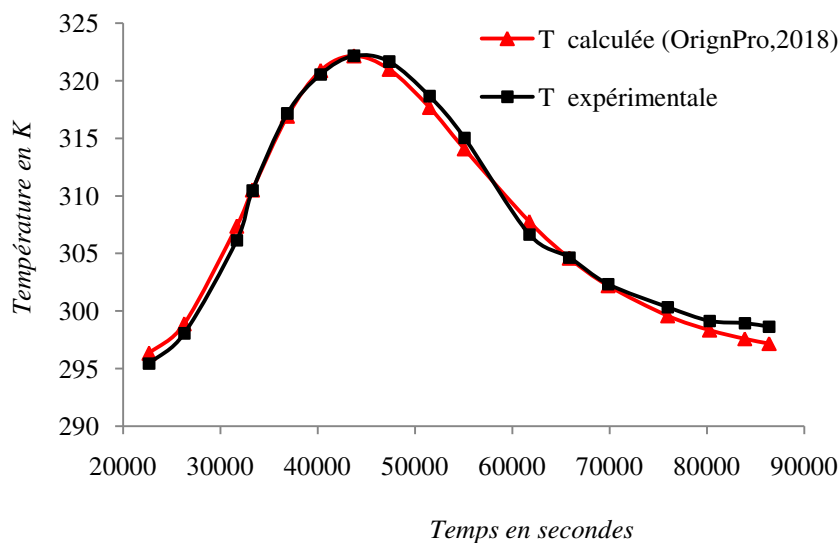


Fig. III.4 : Courbes de température mesurée et calculée par OriginPro.2018, à la surface du masque brut, barrage Ghrib.

Le profil de températures obtenues par « OriginePro.2018 » suit bien le profil de température expérimentale. Il est à noter que le coefficient de corrélation est de 0.99. Cette fonction est entrée sous *UDF* comme une condition à la limite imposée à la surface du masque pour valider les autres données expérimentales existantes à 1 cm, à 6 cm et à 10 cm de profondeur du masque.

III.1.2.1.1.2 Validation des résultats numérique :

De façon à vérifier l'exactitude des résultats numérique obtenus dans le présent travail, une validation du code numérique a été faite en prenant en compte les mesures expérimentales.

Dans les Figures III.5, III.6 et III.7, on observe que les profils numérique et expérimental sont très proches avec des coefficients de corrélations qui dépassent 0.97 pour les trois thermocouples (TH 1cm, TH 6 cm et TH 10 cm), l'écart relatif en moyenne entre les valeurs simulées et expérimentales pour les trois thermocouples à 1 cm, à 6cm et à 10 cm sont respectivement de 0.19%, 0.35% et 0.48%, ce qui permet la validation du modèle numérique et surtout de son maillage.

Il est à noter que l'écart moyen de températures entre valeurs expérimentales et numériques pour le thermocouple localisé à 1 cm est au maximum de 0.98 °C, pour le TH 6 cm est de 2.76 °C, et pour le thermocouple localisé à 10 cm est de 2.72 °C ; Cet écart étant relativement faible compte-tenu des dimensions et des incertitudes en jeu, on peut considérer ce modèle valide et l'utiliser pour la suite afin de tester les différentes solutions pratiques existantes et proposées.

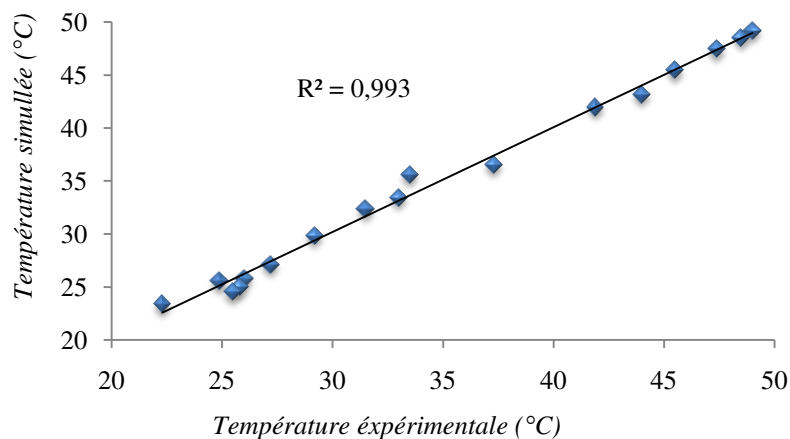


Fig. III.5 : Corrélation entre les températures expérimentales et simulées à TH 1 cm, barrage de Ghrib.

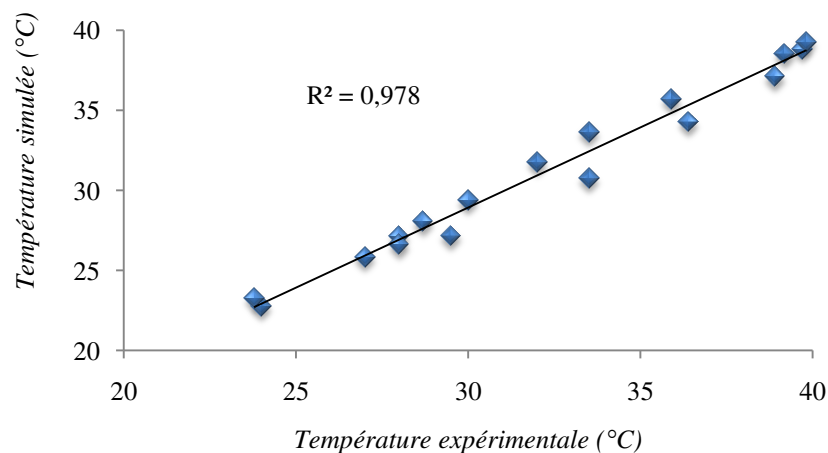


Fig. III 6 : Corrélation entre les températures expérimentales et simulées à TH 6 cm, barrage de Ghrib.

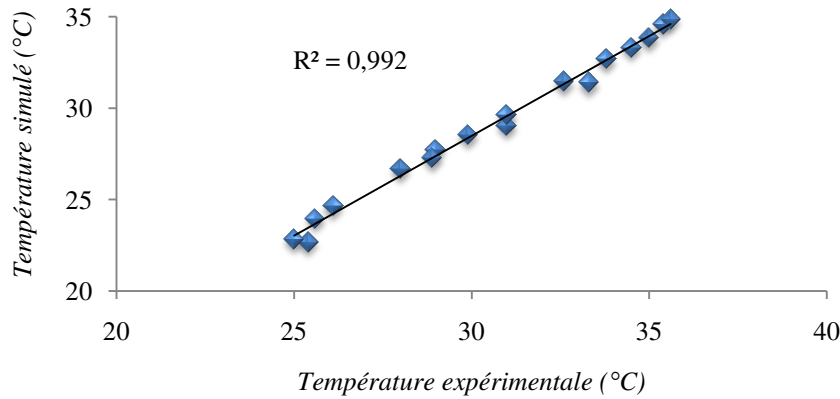


Fig. III.7 : Corrélation entre les températures expérimentale et simulées à TH 10 cm, barrage de Ghrib.

III.1.2.1.1.3 Variation de températures au sein du masque :

- **Variation temporelle :**

La figure III.8 représente les profils de températures des trois thermocouples de positions définies à 1 cm, à 6 cm et à 10 cm en fonction du temps. On observe que la température du masque en béton bitumineux atteint ses maximales à 12:15 PM avec une valeur de 49.21 °C pour TH 1 cm et 39.25 °C à 14:30 PM pour TH 6 cm et 34.85 °C à 15:30 PM pour le TH 10 cm, donc on constate que la propagation de la température maximales varie en fonction du temps et de la position.

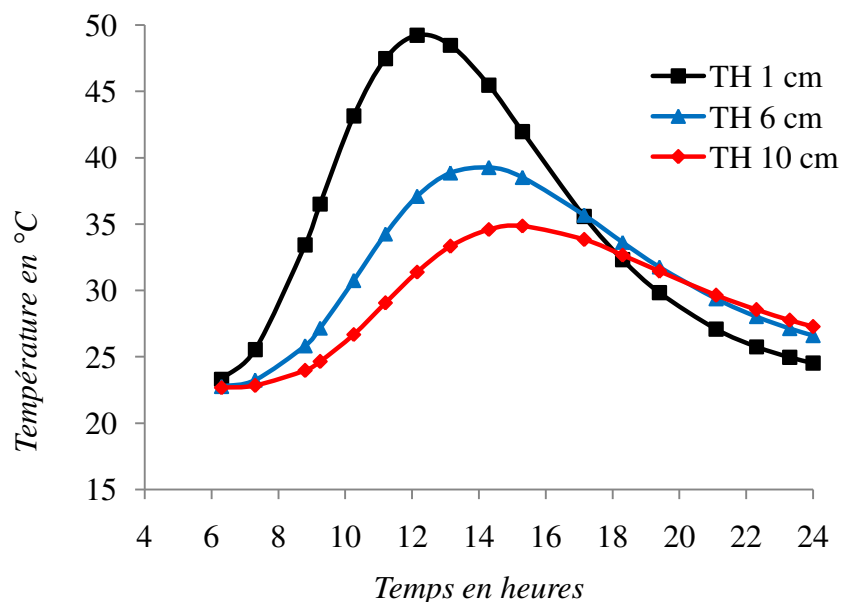


Fig. III.8: Profil de la température simulée aux trois thermocouples (masque brut), barrage de Ghrib.

- **Variation spatiale :**

Les figures III.9 et III.10 illustrent l'évolution de la température au sein de la structure, où on distingue clairement au temps 12:15 PM la température atteint son maximale avec une valeur de 49.21 °C à la surface du masque, puis elle diminue lentement et devient stable au delà de 0.80 m de profondeur, sachant que la température de l'air a ce moment est de l'ordre de 30.6 °C.

La température minimale enregistrée est de 23.04 °C à 6 :30 PM, pour une température de l'air de 16.5 °C.

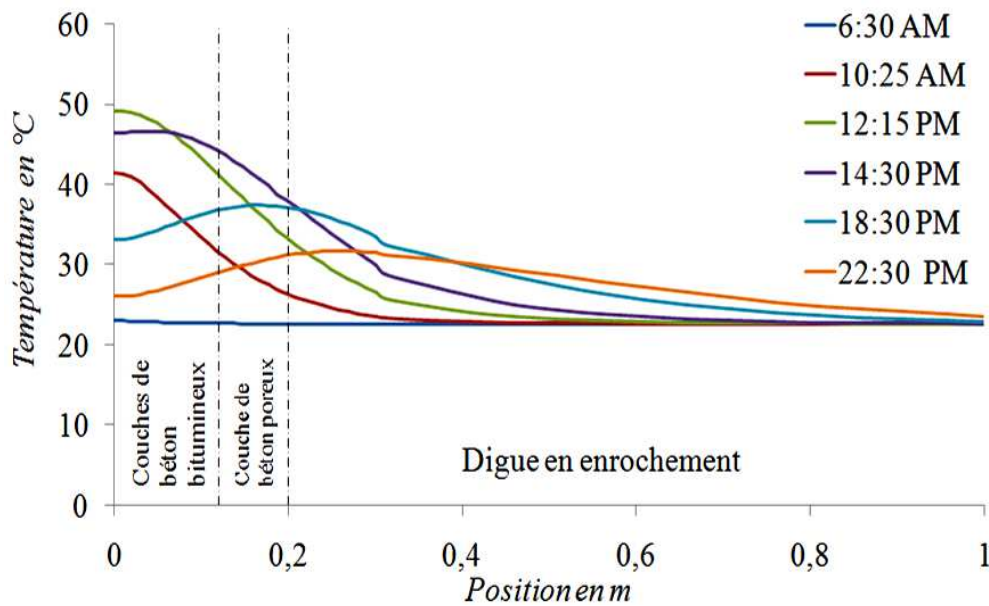


Fig. III. 9 : Evolution de la température simulée au sein du masque brut, barrage Ghrib

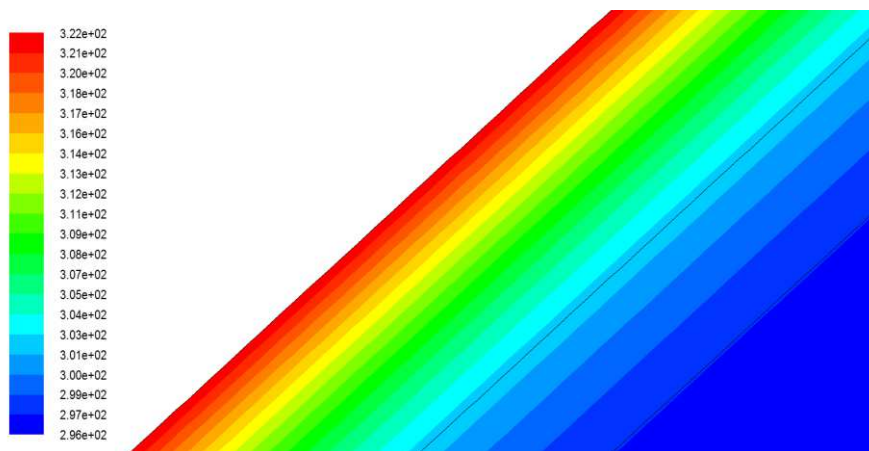


Fig. III. 10 : Simulation de la variation de la température simulée au sein du masque brut à 12 :15 PM, barrage de Ghrib.

III.1.2.1.2 Le deuxième site : barrage de Bouhnifia:

III.1.2.1.2.1 Détermination des fonctions de la variation de la température:

Concernant le cas du barrage de Bouhnifia, les relevés de températures s'effectuent en période d'été et hiver pendant 19 heures chacune, seulement à la surface du masque.

Les fonctions des profils de températures sont tirées du logiciel « OriginPro.2018 » de la même façon que nous l'avons fait aux profils de températures du premier site de Ghib, puis ils sont chargés comme des conditions aux limites sous *UDF*.

Les conditions aux limites chargées à la surface du modèle du masque brut du barrage de Bouhnifia présentent des coefficients de corrélation de 0.946 et de 0.961 respectivement pour les périodes hiver et été (figures III.11 et III.12), représentées sous la forme suivante où T en Kelvin et t en secondes :

$$\checkmark \text{ Hiver (09 janvier 1934): } T = 273 + 30.87 * e^{-e\left(\frac{t-46000}{7097.56}\right) - \frac{t-46000}{7097.56} + 1} \quad (\text{III.3})$$

$$\checkmark \text{ Été (16 septembre 1933): } T = 303.8 + 21.53 * e^{-e\left(\frac{t-42000}{10000}\right) - \frac{t-42000}{10000} + 1} \quad (\text{III.4})$$

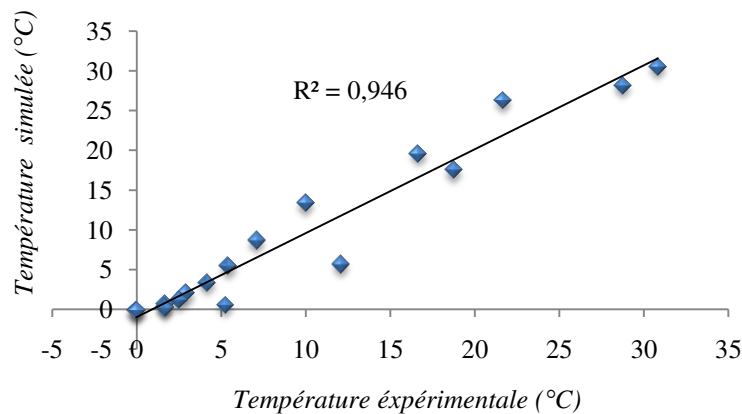


Fig. III.11 : Corrélation entre les températures expérimentale et simulées à la surface du masque de barrage de Bouhnifia, période hivernale.

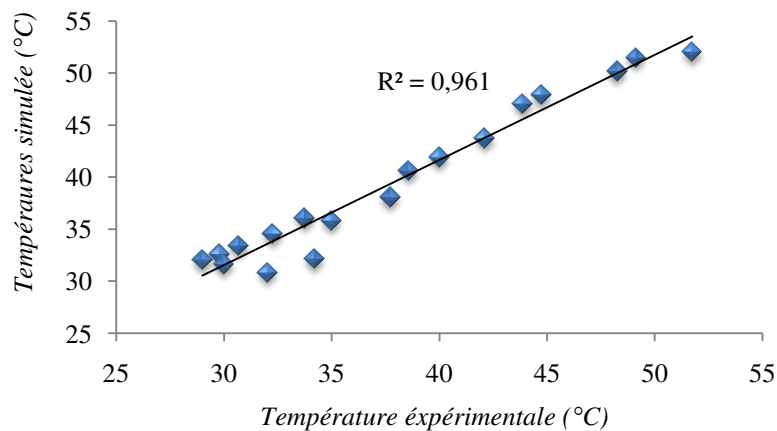


Fig. III.12 : Corrélation entre les températures expérimentale et simulées à la surface du masque de barrage de Bouhnifia, période estivale.

III.1.2.1.2.2 Détermination des températures au sein du masque:

- **Variation temporelle :**

Dans cette partie, et vue l'absence des mesure au sein du masque du barrage de Bouhnifia, on a tenté de déterminer les températures numériquement, au milieu de ce dernier à 1 cm, à 6 cm et à 10 cm de profondeur a partir de la surface pour les deux périodes hiver et été.

Les figures III.13 et III.14 représentent les profils des températures simulées pour les deux périodes été et hiver, en 3 positions, une à 1 cm de la surface du masque et deux simulées au milieu du masque (6 cm) et à la fin du masque (10 cm). Les profils de températures aux thermocouples situé à 1 cm, à 6 cm et celui à 10 cm sont très similaires.

- *Période hivernale :* la température maximale enregistrée expérimentalement à la surface du masque de Bouhnifia en hiver est de 30.83 °C à 13 PM. A 1 cm la température maximale est de 30.54 °C à 13 PM, à 6 cm elle est de l'ordre de 20.27 °C à 14 PM, et à 10 cm la température atteint sa valeur maximale à 15 PM avec une valeur de 15.11 °C.

Les minimas des températures sont des valeurs inférieures à 0 °C, soit à TH 1 cm (-0.04 °C), ou bien pour les TH 6 cm et TH 10 cm, où on a obtenue la même valeur (-0.15 °C) et cela de la durée de 6 AM à 9 AM (Fig. III.13).

Le gelé-dégel ($T_{min} < 0$, $T_{max} > 0$ sur la même journée) peut fragiliser le masque avant sa dégradation subite, il se peut que les hivers successifs subis par le masque aient aussi contribué à un endommagement progressif (*Mauduit et al., 2013*).

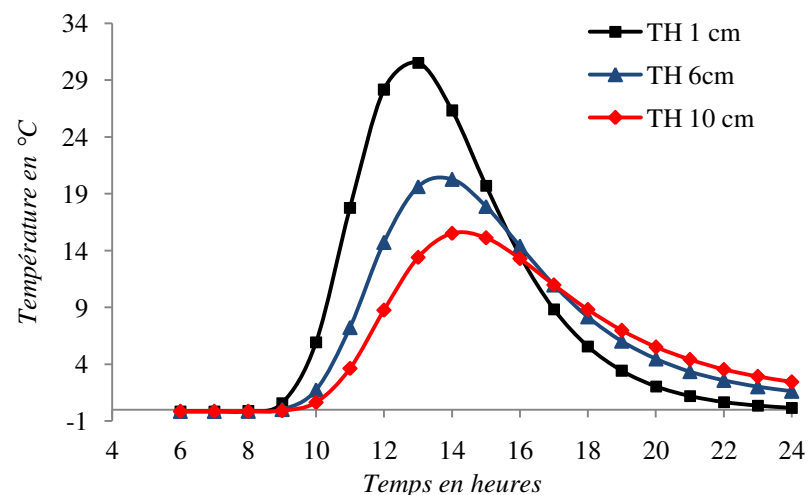


Fig. III.13 : Variation de la température simulée aux trois thermocouples (masque brut), barrage de Bouhnifia, période hivernale.

- *Période estivale* : La température maximale mesurée à la surface du masque est de l'ordre de 51.75 °C à 12 PM. A 1 cm de la surface du masque, la température maximale peut atteindre à 12 PM une valeur de 50.93 °C, cette valeur décroît avec la profondeur, on a obtenue par simulation 45.77 °C à TH 6 cm et 42.55 °C à TH 10 cm au même temps (12 PM).

La température minimale mesurée à la surface du masque est de l'ordre de 29 °C à 22 PM, et respectivement 30,82 °C, 31.11 °C et 30.84 °C pour le TH 1 cm, TH 6 cm et TH 10 cm à 6 AM pour les trois thermocouples (Fig. III.14).

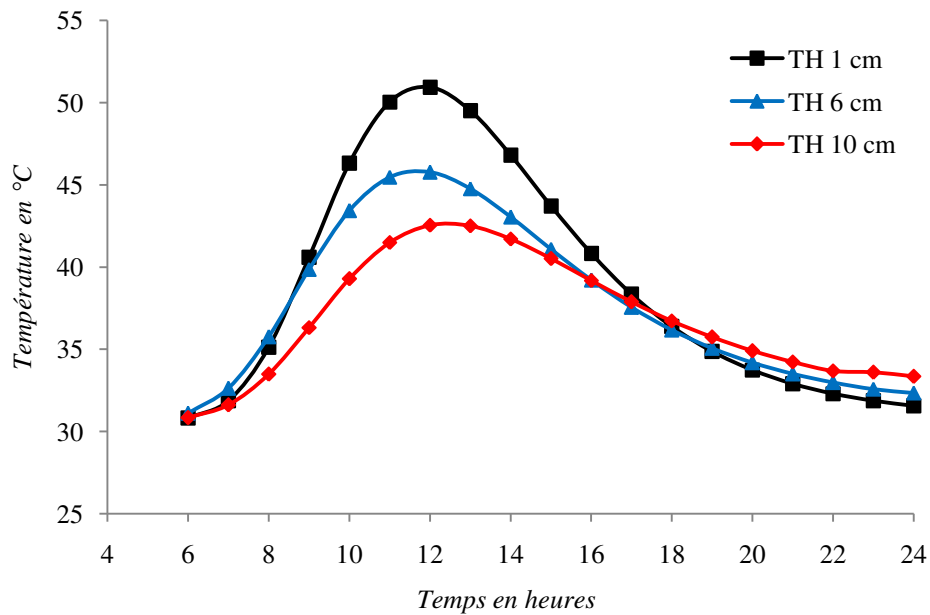


Fig. III.14 : Variation de la température simulée aux trois thermocouples (masque brut), barrage de Bouhnifia, période estivale.

- **Variation spatiale:**

La température à l'intérieur du parement diminue relativement et rapidement, elle se stabilise à environ -0.15 °C à 1°C en hiver et entre 30 °C à 32 °C en été, à une profondeur de 0.9 m pour les deux périodes (Fig. III.15 et III.17).

Les figures III.16 et III.18 représentent l'évolution spatiale de la température dans le parement amont du barrage de Bouhnifia muni d'un masque en béton bitumineux dans l'état brut, les températures maximales atteintes à sa surface sont de l'ordre de 28.13 °C en hiver et 52.03 °C en été à 12 PM.

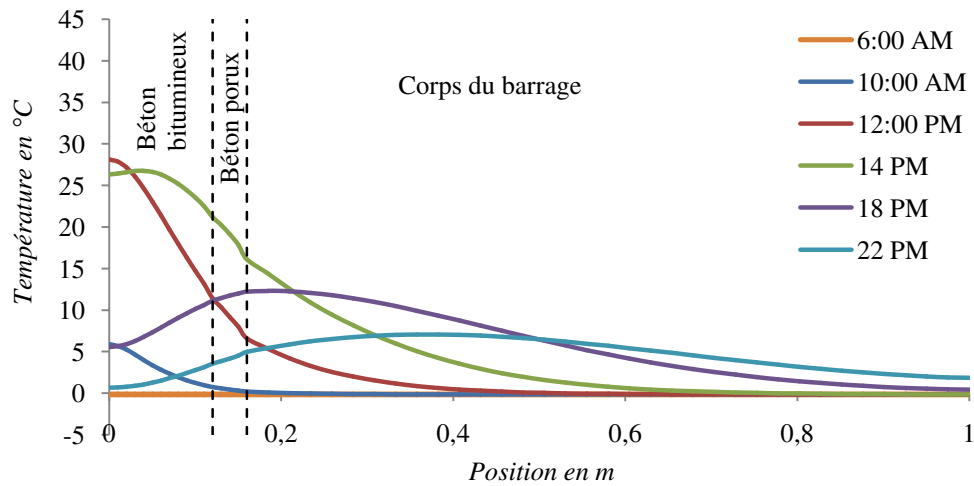


Fig. III.15 : Evolution de la température au sein du masque brut, Barrage de Bouhnifia, période hivernale.

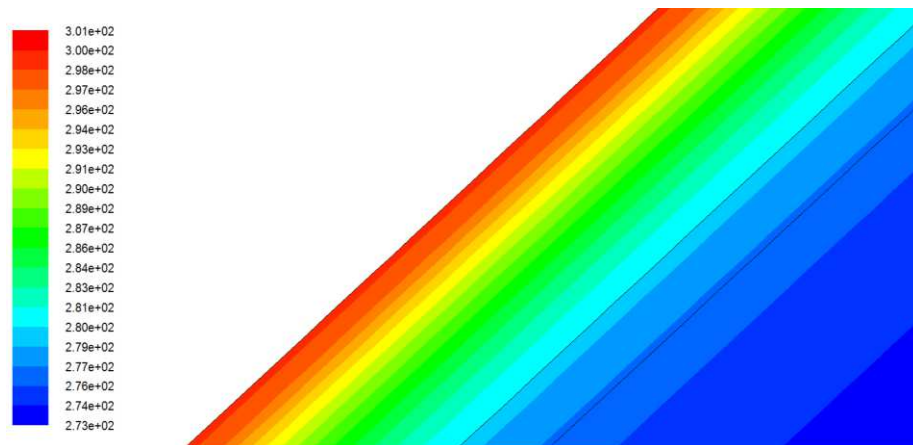


Fig. III.16 : Simulation de la variation de la température(K) au sein du masque brut du barrage de Bouhnifia à 12 PM, période hivernale.

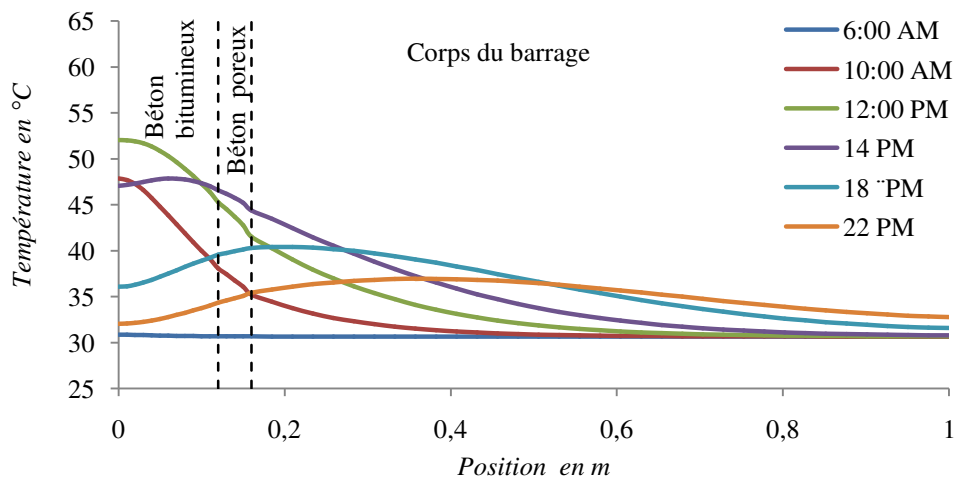


Fig. III. 17 : Evolution de la température au sein du masque brut, Barrage de Bouhnifia, période estivale.

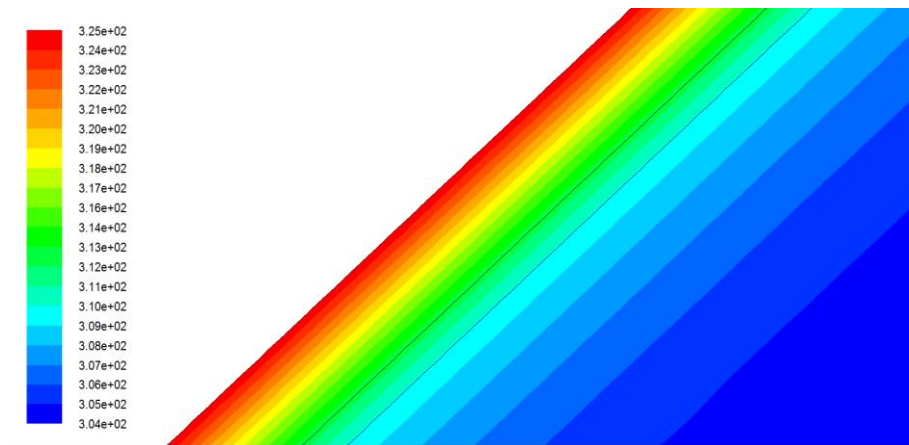


Fig. III. 18 : Simulation de la variation de la température (K) au sein du masque brut du barrage de Bouhnia à 12 PM, période estivale.

Conclusion

La modélisation et le contrôle continu des températures dans les masques en béton bitumineux deviennent des opérations de grand intérêt, compte tenu de l'importance de cette dernière pour la stabilité et la durée de vie du masque, qui à son tour joue un rôle important dans l'étanchéité des barrages en remblais.

Pour simuler le comportement d'un masque, il est nécessaire de connaître soit les températures à sa surface ou bien les flux de chaleur intercepter par sa surface, et les caractéristiques thermiques et physiques des différents matériaux qui le composent.

Le logiciel « Fluent 6.3.26 » est utilisé dans cette recherche, combiné à un logiciel générateur de maillage « Gambit 2.2.30 », qui permet de choisir plusieurs types de maillages, qui peuvent convenir aux formes utilisées. Comme la plupart des logiciels de simulation CFD, Fluent utilise la méthode des volumes finis, et cela nécessite l'introduction des conditions aux limites, telles que le choix des modèles transitoires (énergie), les différentes caractéristiques des matériaux, les conditions aux limites de la géométrie étudiée par le biais des fonctions déduites de « OriginPro.2018 » et compilées dans un script sur C.

L'approche de la modélisation du processus de transfert de chaleur par conduction au sein du masque a été présentée et validée par rapport aux données expérimentales.

Chapitre IV : Optimisation de l'effet de la protection thermique sur le masque par des différentes solutions pratiques

Introduction :

Les masques en béton bitumineux constituent un organe d'étanchéité très important des barrages en remblais dont la performance à long terme est fortement influencée par le climat et les conditions météorologiques, ces facteurs sont responsables de la plus grande partie des dommages subis par les masques en béton bitumineux dans le monde.

L'influence des facteurs climatiques sur le comportement des masques en béton bitumineux rend la définition du régime thermique à l'intérieur de la structure du masque de première importance. Le comportement des matériaux du masque pendant sa durée de vie, et donc aussi le comportement de l'ensemble de la structure, dépend de la température et de ses variations cycliques (quotidiennes et saisonnières), l'augmentation des épisodes de chaleur intense en été entraînera l'augmentation des dommages par déformation permanente des masques en béton bitumineux, et l'augmentation des cycles de gel et dégel durant l'hiver augmentera les dommages par fatigue.

La sensibilité des masques en béton bitumineux aux conditions climatiques et météorologiques les rend vulnérables aux changements anticipés. Les effets des changements climatiques peuvent se traduire par une augmentation considérable des coûts d'entretien et des coûts de maintenance des masques ; C'est dans le contexte d'un climat en évolution que d'importantes questions sur la performance des masques à long terme sont soulevées.

Le but de ce chapitre est de trouver des solutions pratiques pour la mitigation des effets anticipés et l'adaptation des masques en béton bitumineux aux changements climatiques anticipés.

IV.1 Barrage de Ghrib (wilaya d'Ain Defla):

IV.1.1 Optimisation de l'effet de la couche convective en béton poreux :

Le choix du béton poreux comme matériau de protection des masques en béton bitumineux ce n'est pas venu par hasard, mais quand nous avons senti les points positifs lors de son utilisation sur la protection des routes. Le béton poreux se pose directement sur les revêtements en béton bitumineux (routes où masques ...) grâce à son revêtement perméable qui permet un grand confort :

- Possèdent des propriétés physiques particulières qui modifient le régime thermo-hygrométrique ;
- Abaissement de la température du revêtement grâce à sa ventilation naturelle ;

La quantité d'énergie échangée par convection naturelle entre le revêtement et le milieu atmosphérique est importante, car l'air de contact entre ces deux milieux est plus important que dans le cas d'un béton bitumineux (Livet, 1996).

Maintenant on construit un nouveau modèle pour tenter de refroidir les couches du masque en béton bitumineux par une couche de protection en béton poreux. Dans cette partie, l'ajout d'une couche en béton poreux sur le masque va être étudié et optimisé.

IV.1.1.1 Définition du modèle :

La première solution pratique testée est la couche en béton poreux. Le rôle de cette couche est de protéger le masque contre les effets de la température, la couche acquerra ainsi une certaine perméabilité car les interstices seront remplis d'air. L'air contenu dans la couche en béton poreux peut se mettre en mouvement pour transporter de la chaleur de manière significative lorsque le gradient de température dans la direction de la gravité est suffisant. On voit alors apparaître la convection. L'objectif est de profiter de ce transfert de chaleur par convection pour exporter la chaleur contenue dans le masque vers l'extérieur, permettant ainsi de refroidir ce dernier.

Contrairement au premier modèle (masque brut), dans cette partie, les échanges de chaleur ne se font pas uniquement en conduction, mais également en convection. L'équation de conduction (I.35) n'est plus suffisante pour décrire la couche en béton poreux face à la convection. On doit considérer les équations de conservation de la masse, de la conservation de la quantité de mouvement et de la conservation de l'énergie.

Donc dans ce modèle de transfert de chaleur passe de la conduction seul à un échange conducto-convectif, donc l'équation (I.35) prend la forme suivante (Chataigner, 2008; Mebarki et al., 2011) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - h_c (T_s - T_{air}) \quad (IV.1)$$

Où :

h_c est le coefficient d'échange convectif de l'air pris égale à $20 \text{ W/m}^2\text{°C}$, T_s la température à la surface de la couche de protection et T_{air} est la température extérieure (air).

- **Conditions aux limites :**

Pour définir les fonctions à appliquer sur cette nouvelle surface (+10 cm d'épaisseur de béton poreux), la relation suivante est utilisée, pour les cas où l'on impose un profil de température sinusoïdale à la surface de la couche en béton poreux (*Incropera et De witt, 2002*).

$$\frac{T(x,t) - T_{s\ moy}}{\Delta T_s} = e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \sin(\omega t + \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x) \quad (IV.2)$$

Où

$T_{s\ moy}$: est la température moyenne à la surface (°C) ;

ΔT_s : est l'amplitude (°C) ;

ω : est la pulsation (rad/s) ;

$T(x,t)$: est la température pour une profondeur x donnée dans le masque, à un instant t ;

a : est la diffusivité thermique de la nouvelle couche convective.

On utilise les valeurs expérimentales connues au thermocouple à la surface du masque, définies par $T(0,t)$ ainsi que la valeur moyenne T_i , la diffusivité thermique moyenne des matériaux (béton poreux et béton bitumineux). Une nouvelle fonction sinusoïdale représente la variation de la température ambiante à imposer sur la nouvelle surface (surface située 10 cm plus haut que la surface où étaient précédemment imposées les températures) sont ainsi obtenues (où T est en Kelvins et t en secondes) :

$$T(0.1, t) = 308.8 - 13.35 \sin(9.86 * 10^{-5} t) \quad (IV-3)$$

Il est à noter que l'on obtient une amplitude de températures plus importantes à imposer sur la nouvelle surface que celles imposées sur la surface brute du masque, ce qui est normal compte tenu de l'amortissement de « l'onde » de chaleur à mesure qu'elle pénètre dans le masque. Maintenant que cette nouvelle condition aux limites a été définie, la simulation avec la couche en béton poreux convective peut débuter.

Les autres conditions aux limites sont les mêmes que l'on a utilisés dans le premier modèle de validation.

IV.1.1.2. Positionnement de la couche convective:

La première solution pratique testée est la couches en béton poreux à convection avec une couche est placée au dessus du masque en béton bitumineux, tel que présenté sur la figure IV.1.

Tableau IV.1 : Propriétés thermiques des matériaux du milieu poreux.

	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg.°C)
Air	0.024	1.2	1007
Béton poreux	1.27	2310	942

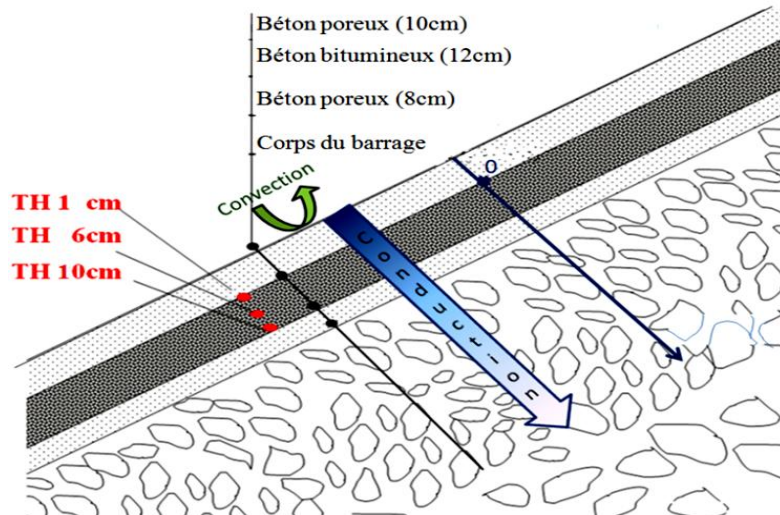


Fig. IV.1 : Géométrie du dispositif d'optimisation d'une couche convective en béton poreux, barrage de Ghrib.

L'objectif de cette étude est d'optimiser au mieux cette couche convective insérée au dessus du masque. L'épaisseur est de 10 cm. L'essai est réalisé avec trois capteurs numériques, qui sont placés tels que représentés sur la figure IV.1, à TH 1 cm, à TH 6 cm et à TH 10 cm compté à partir de la surface du masque.

IV.1.1.3. Variation temporelle :

La figure IV.2 illustre l'évolution des températures pour les trois thermocouples localisés à 1 cm, à 6 cm et à 10 cm. Les températures maximales sont enregistrées à 15:30 PM avec une valeur de 40.80°C pour le TH 1cm, à 17 :15 PM avec une valeur de 38.45 °C pour le TH 6 cm, et à 18 :30 PM avec une valeur de 37.42 °C pour le TH 10 cm.

Les températures minimales sont situées dans la durée matinale pour les trois thermocouples entre 6:30 AM et 8:30 AM, avec 29.43 °C pour TH 1 cm, 31.76 °C pour TH 6 cm et 32.79°C pour le TH 10 cm.

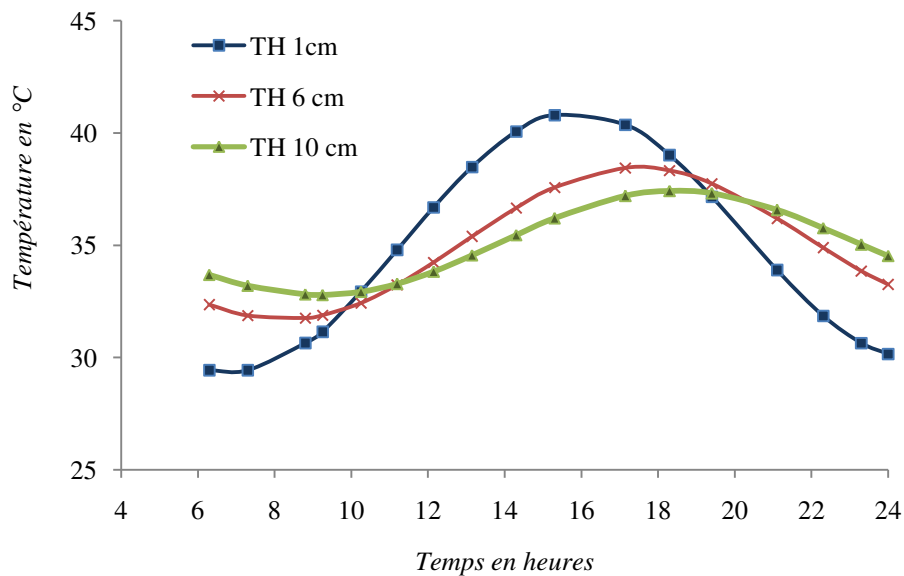


Fig. IV. 2 : Variation des températures des trois thermocouples protégés par une couche en béton poreux de 10 cm, barrage Ghrib.

IV.1.1.4 Variation spatiale :

La température à la surface de la nouvelle couche convective posée en béton poreux de 10 cm d'épaisseur, atteint son maximale à 14:30 PM avec une valeur de 48.56 °C (Fig. IV.4) et un minimum de 22.316 °C à 22:30 PM (Fig. IV.3).

On remarque que la température maximale ne se trouve pas à tout moment à la surface de la nouvelle couche, on constate que:

- A 18:30 PM, la température maximale est située dans la couche du béton bitumineux (masque) avec une valeur de 41.26 °C.
- A 22:30 PM, la température maximale est de l'ordre de 36.884 °C, localisé au corps du barrage (enrochement).
- A 6:30 AM, la température maximale est située au corps du barrage (enrochement), avec une valeur de 35.647 °C.

Ce phénomène est lié principalement à l'influence de la température de l'air au contact de la couche convective (température plus basse la nuit).

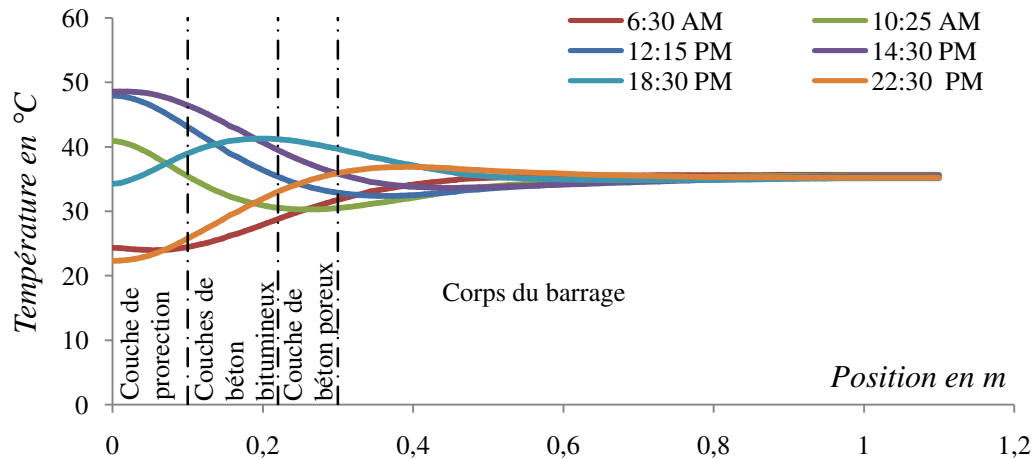


Fig. IV. 3 : Evolution de la température au sein du masque protégé par une couche de 10 cm en béton poreux, barrage Ghrib.

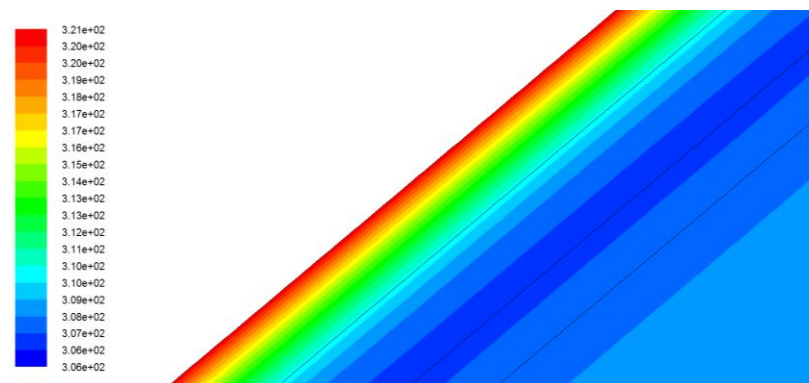


Fig. IV. 4 : Simulation de la variation de la température (K) au sein du masque protégé par une couche de 10 cm en béton poreux à 12:15 PM, barrage de Ghrib.

IV.1.2. Optimisation de l'absorptivité de la surface réfléchissante :

Les peintures réfléchissantes appliquées à la surface des structures en béton bitumineux peuvent être très utiles pour réduire les charges thermiques dans les structures et assurer leur confort thermique (Zinzi *et al.* 2009). Synnefa *et al.* en 2006, ont rapporté que les routes en béton bitumineux peintes en blanc ont presque la même température que le milieu environnant, alors que les routes non peintes ont environ 11°C de plus que l'air.

Donc cette fois-ci, on protège le masque en béton bitumineux avec une couche de peinture d'isolation thermique de couleur blanche, qui réfléchira beaucoup plus les rayons solaires, et donc permettra de beaucoup moins absorber la chaleur due à l'ensoleillement. Cette couche sera d'environ 2 mm d'épaisseur, et qui à pour caractéristique d'être résistante à l'eau et aux conditions météorologiques.

IV.1.2.1 Définition du modèle:

L'utilisation de la surface réfléchissante requiert la prise en compte du transfert de chaleur par rayonnement, en plus des transferts de chaleur par conduction et convection utilisés dans le cas précédent, donc dans cette simulation le modèle de transfert de chaleur passe d'un transfert de chaleur conducto-convectif à un transfert de chaleur de conduction et convection plus le rayonnement, donc l'équation IV.2 prend la forme suivante (*Chataigner, 2008 ; Navaro et al., 2010*):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - h_c (T_s - T_{air}) - \varepsilon_s C_s (T_s^4 - T_{air}^4) - \alpha q''_{soleil} \quad (IV.3)$$

Où :

ε_s : Correspond à l'émissivité ;

C_s : Correspond à la constante de Stefan-Boltzmann ($C_s = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^4$) (*Incropera et De witt, 2002*);

α : Correspond à l'absorptivité de la surface du masque au rayonnement solaire vaut 0.95 (*Djemili, 2006 ; Chataigner, 2008*);

q''_{soleil} : Représente le flux radiatif solaire atteignant la surface (w/m^2);

Maintenant, il faut déterminer la température à imposer à la surface, qui doit prendre en compte la température de l'air, mais également, l'effet du rayonnement solaire sur le masque en béton bitumineux. Pour cela, elle suivra l'équation suivante (*Incropera et De witt, 2002*):

$$T_{air}^* (t) = T_{air} (t) + \frac{\alpha}{U} q''_{soleil} (t) \quad (IV.4)$$

Où :

T_{air}^* : Température de l'air modifiée prenant en compte le rayonnement solaire ($^\circ\text{C}$);

T_{air} : Température de l'air mesurées ($^\circ\text{C}$) ;

q''_{soleil} : Flux radiatif solaire (w/m^2) ;

U : Correspond au coefficient de transfert thermique entre l'extérieur et l'intérieur du masque, qui prend en compte les coefficients de convection externe et la résistance thermique équivalente des différentes couches, ce coefficient vaut $20 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (*Incropera et De witt, 2002 ; Chataigner, 2008*).

Une des difficultés de la modélisation vient du fait que l'on ne connaisse pas la valeur précise du flux radiatif solaire en fonction du temps q''_{soleil} . En effet, ce dernier est influencé

à la fois par l'alternance jour-nuit, l'inclinaison de la surface réceptrice, la présence d'ombrages, de nuages, de pluie, etc. On peut le calculer à l'aide de la formule suivante:

$$q''_{soleil}(t) = G_{\alpha}(t) + Gw(t) - A(t) \quad (IV-5)$$

Avec:

$G_{\alpha}(t)$: Rayonnement globale sur une surface inclinée en fonction du temps (w/m^2) équation (I.17) ;

$Gw(t)$: Rayonnements atmosphérique en fonction du temps (w/m^2) (I.19) ;

$A(t)$: Rayonnement réfléchi en fonction du temps (w/m^2) (I.18) ;

Le flux radiatif solaire sera calculé pour la journée considérée (ciel claire) et le lieu considéré par un sous programme réaliser sous le logiciel Matlab 7.12.0 (R2011a).

IV.1.2.2 Variation des Flux radiatif solaire :

Les quantités d'énergie échangées par rayonnement sont étroitement liées à "la couleur noir" de la surface des enrobés bitumineux. Tous les revêtements hydrocarbonés présentent un facteur d'émissivité élevé qui est dû à la présence du film de bitume qui enrobe les granulats. (*Livet et Roussel, 1993*).

La courbe de la figure IV.5 présente l'évolution du flux radiatif solaires q''_{soleil} pour la journée considérée reçus par la surface du masque en béton bitumineux brut du barrage de Ghrib, on observe bien une oscillation des flux sous l'effet du jour et de la nuit, l'intensité des rayonnements augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur maximale à midi avec $1601.53 w/m^2$, le minimale de flux radiatif solaire s'étend de 18 PM à 24 PM avec une valeur de $270.40 w/m^2$ (nuit).

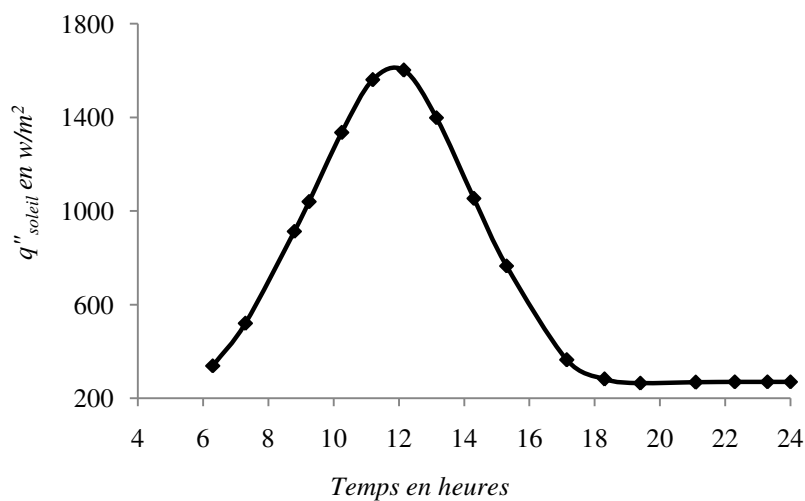


Fig. IV. 5 : Evolution du flux radiatif solaire en fonction du temps à la surface du masque en béton bitumineux brut du barrage de Ghrib.

• **Conditions aux limites :**

La condition à la limite entrée à la surface de la couche réfléchissante est représentée par l'équation suivante, où T en Kelvin et t en secondes :

$$T = 292.64 + 19.13 * e^{-e\left(\frac{t-44600.88}{11498.637}\right) - \frac{t-44600.88}{11498.637} + 1)} \quad (IV-6)$$

Les autres conditions aux limites sont les mêmes que l'on a utilisés dans le premier modèle de validation.

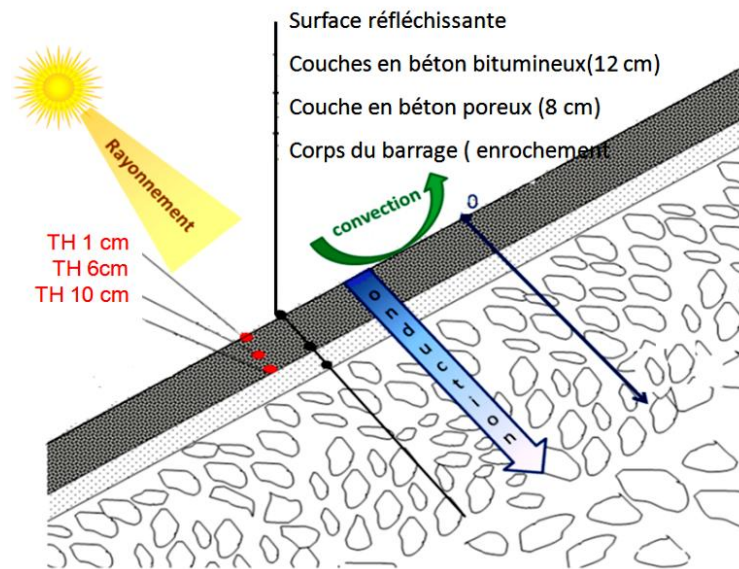


Fig. IV.6 : Géométrie du dispositif d'optimisation d'une surface réfléchissante, barrage de Ghrib.

IV.1.2.3 Variation temporelle de la température :

Pour le TH situé à 1cm le refroidissement maximal atteint une valeur de 11.47 °C à 12 :15 PM et le minimal est de l'ordre de 7.67 °C pour le TH situé à 10 cm.

En remarque qu'il n' ya aucun réchauffement enregistrer dans cette solution (utilisation de la surface réfléchissante), pour les trois thermocouples (figure IV.7, IV.8 et IV.9).

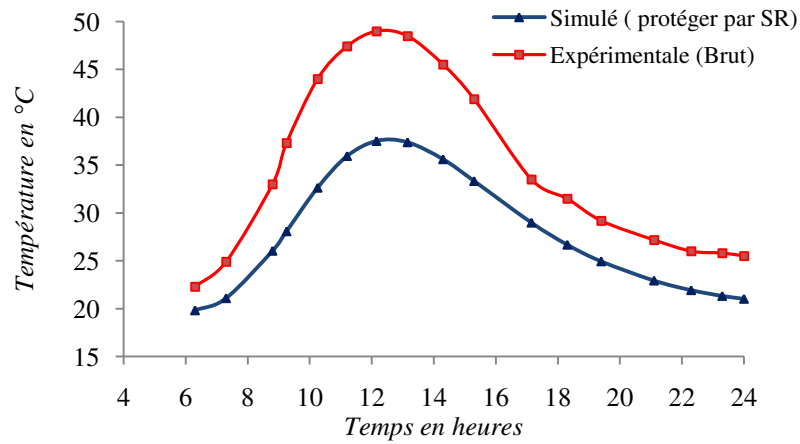


Fig. IV. 7 : Variation des températures du TH 1 cm, protégé par une surface réfléchissante(SR) et Brut, barrage de Ghrib.

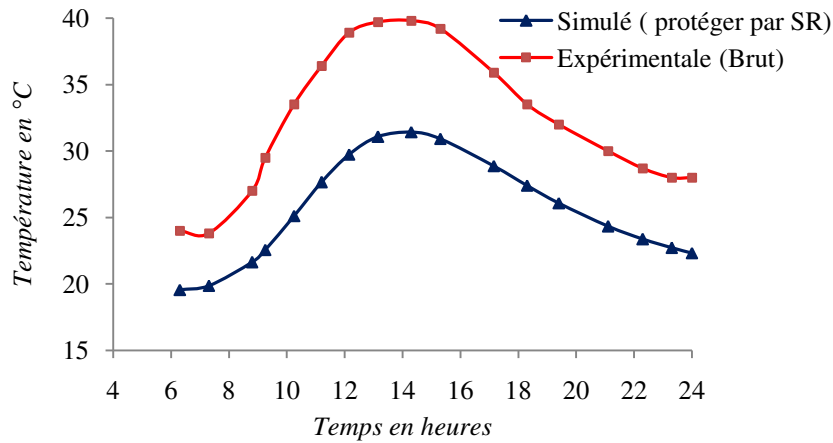


Fig. IV. 8 : Variation des températures du TH 6 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Ghrib.

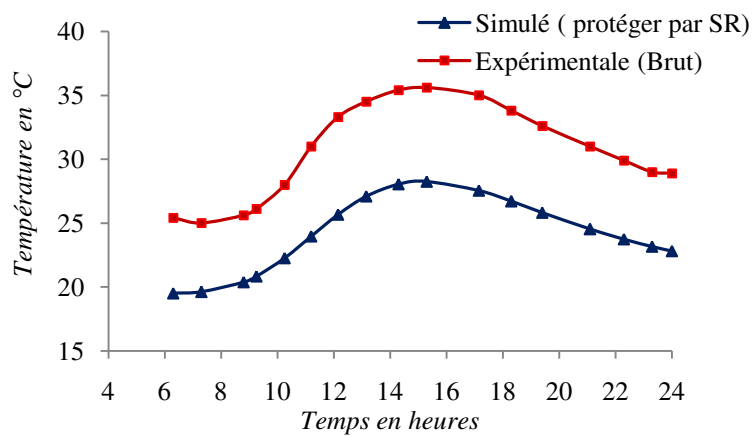


Fig. IV. 9 : Variation des températures du TH 10 cm protégé par une surface réfléchissante(SR) et brut, barrage de Ghrib.

IV.1.2.4 Variation spatiale de la température:

La Figure IV.10 présente l'évolution du profil de la température dans le masque en béton bitumineux protégé par une surface réfléchissante, elle montre que plus la profondeur est grande, plus l'amplitude de la variation de la température sur une journée est petite. En fait, la température se stabilise autour de 20°C à partir de 0.9 m de profondeur. On observe que la température maximale change sa position suivant la durée de la journée.

La valeur maximale de la température se trouve à la surface du masque à 12 :15 PM avec une valeur de 38.47 °C (Fig. IV. 11), et la valeur minimale est enregistrer à 6 :30 AM avec une valeur de 19.72 °C.

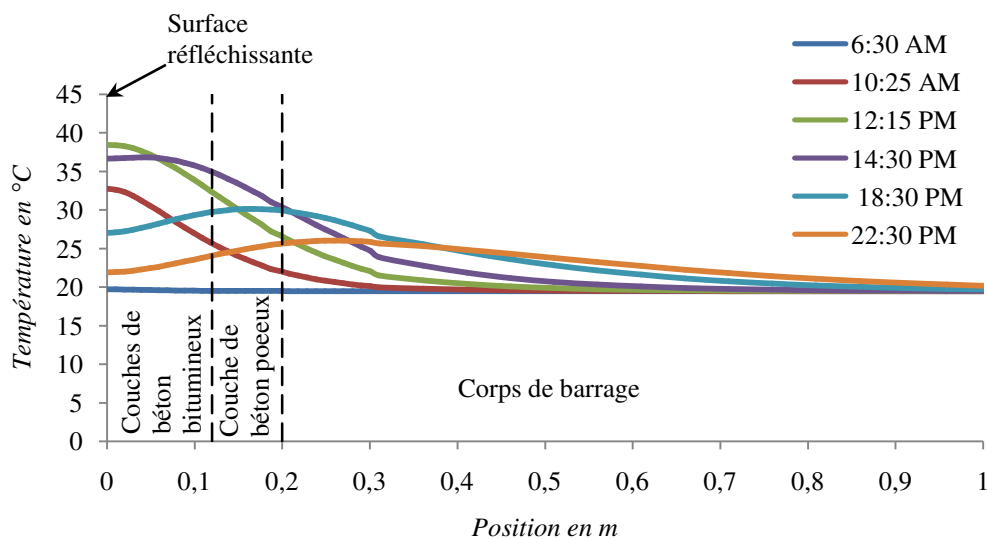


Fig. IV. 10 : Evolution de la température au sein de la structure (masque protégé par une surface réfléchissante), barrage de Ghrib.

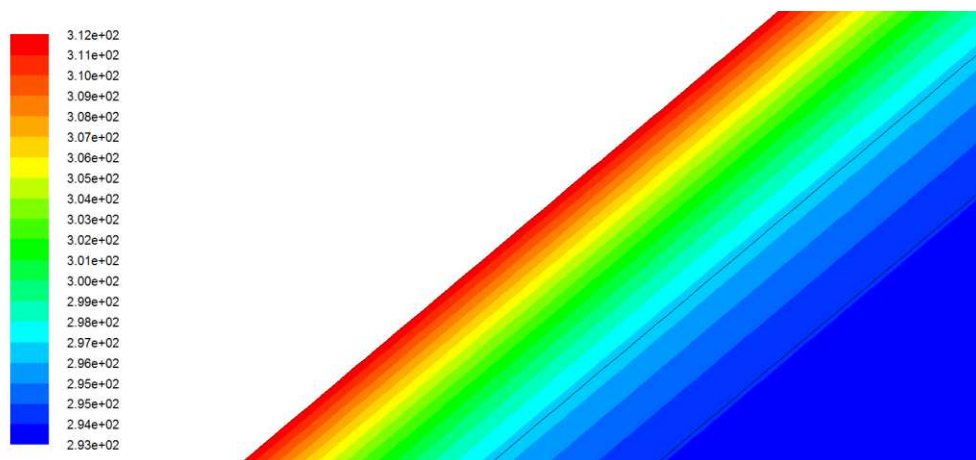


Fig. IV. 11 : Simulation de la variation de la température (K) au sein de la structure (masque protégé par une surface réfléchissante) à 12:15PM, barrage de Ghrib.

IV.1. 3 Comparaison entre les deux solutions :

La comparaison entre les solutions simulées pour protégé le masque en béton bitumineux avec celle du masque brut (sans protection) dans les mêmes conditions et pour les trois thermocouples situés dans le masque du barrage de Ghrib, permet de tester la validité de nos solutions simulées.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau IV.2 et présentées dans les figures (IV.12, IV.13 et IV.14), ces figures présentent la variation de la différence de température des trois thermocouples numériques (TH 1 cm, TH 6 cm et TH 10 cm) protéger premièrement par une couche convective en béton poreux (BP) de 10cm d'épaisseur et deuxièmement par une surface réfléchissante (SR) par rapport au relevées expérimentales du masque brut.

Tableau IV.2 : Différence de température des thermocouples protégés par rapport à la température expérimentale sans protection (masque brut), barrage de Ghrib.

	Couche en béton poreux (10 cm)		Surface réfléchissante	
	Refroidissement max (°C)	Réchauffement max (°C)	Refroidissement max (°C)	Réchauffement max (°C)
TH 1 cm	-12.61	+7.13	-11.47	-
TH 6 cm	-4.66	+8.35	-9.16	-
TH 10 cm	-	+8.28	-7.64	-

IV.1. 3.1 Thermocouple TH 1cm :

- Dans le cas de protection du masque par le béton poreux, on enregistre un refroidissement qui s'étale de 8 AM à 15:3 PM avec un maximum de 12.61 °C à 11:20 AM. Le reste du temps, on à un réchauffement avec une valeur maximale 7.13 °C enregistré à 6:30 AM, ce réchauffement est cependant beaucoup moins important que le refroidissement obtenu dans la période de température maximale (période de grandes chaleurs).
- Pour le cas de la protection par la surface réfléchissante en enregistre un refroidissement sur toute la période d'essai avec une valeur maximale de 11.47 °C entre 11 AM et 12:30 PM (Fig. IV.12).

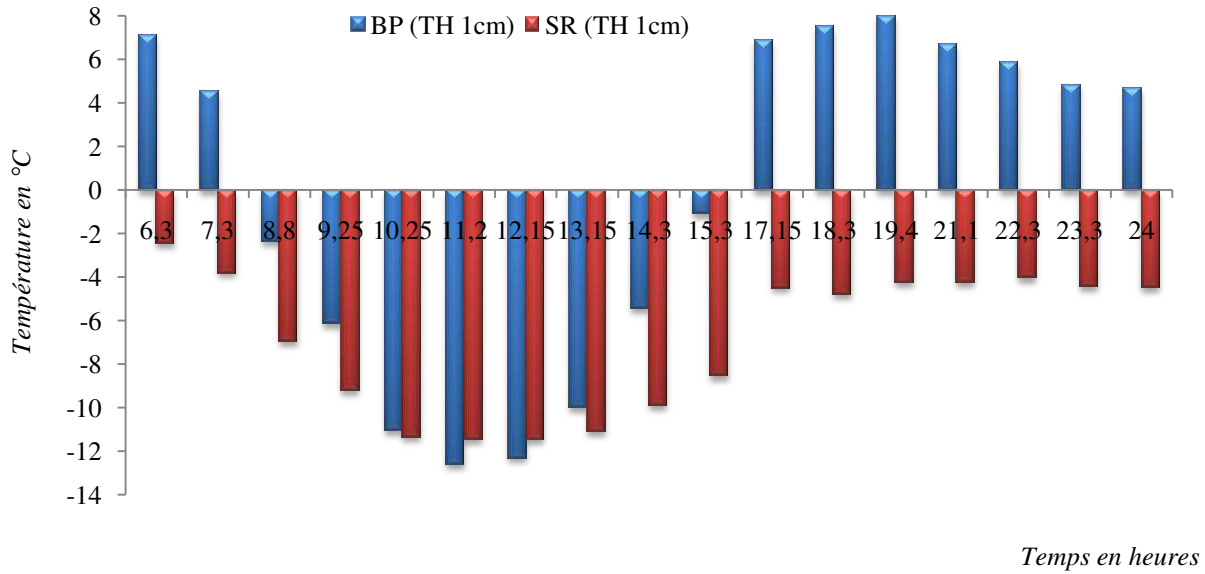


Fig. IV. 12 : Différence de température entre les TH 1cm brut et protégé par BP et SR, barrage de Ghrib.

IV.1. 3.2 Thermocouple TH 6 cm :

- Un refroidissement maximal de l'ordre de 4.66 °C à 12:15 PM s'étale entre 10:25 AM et 15:3 PM dans le cas du masque protégé par la couche en béton poreux, mais le reste de la durée d'essai un réchauffement avec un max de 8.35 °C enregistré à 6:30 AM. Dans le cas du masque protégé par la surface réfléchissante le refroidissement s'observe sur toute la durée d'essai avec un max de 9.16 °C à 12:15 PM.

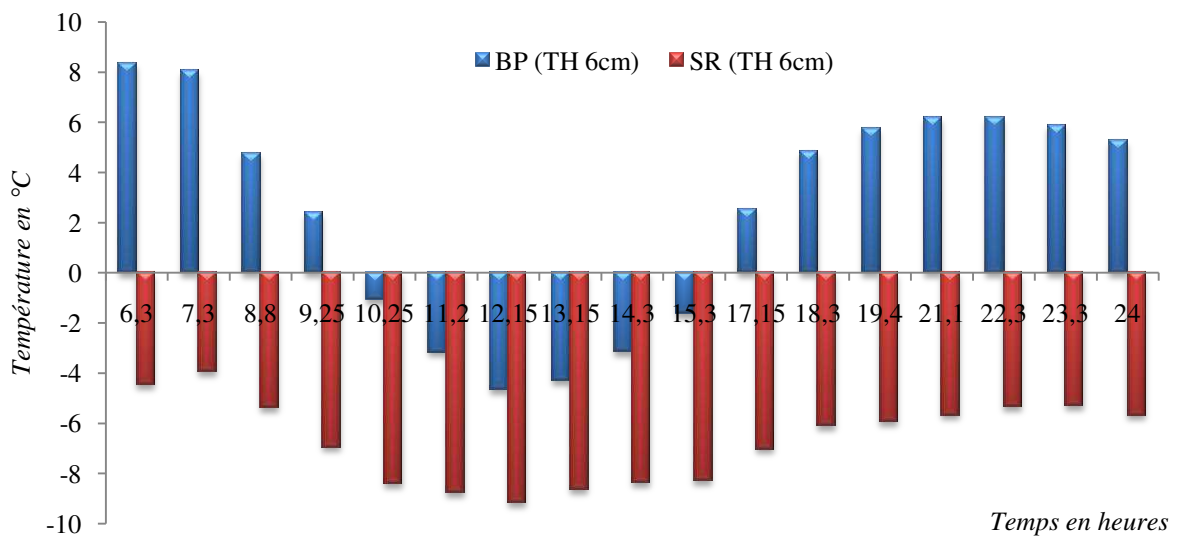


Fig. IV. 13 : Différence de température entre les TH 6cm brut et protéger par BP et SR, barrage de Ghrib.

IV.1. 3.3 Thermocouple TH 10cm :

On remarque dans ce thermocouple que seule le réchauffement dure pour toute la période d'essai, avec un maximum enregistré à 6:30 AM d'une valeur de 8.28 °C pour le cas de protection en béton poreux, contre un refroidissement seulement dans le cas de la surface réfléchissante avec un max de 7.64 °C à 12:15 PM.

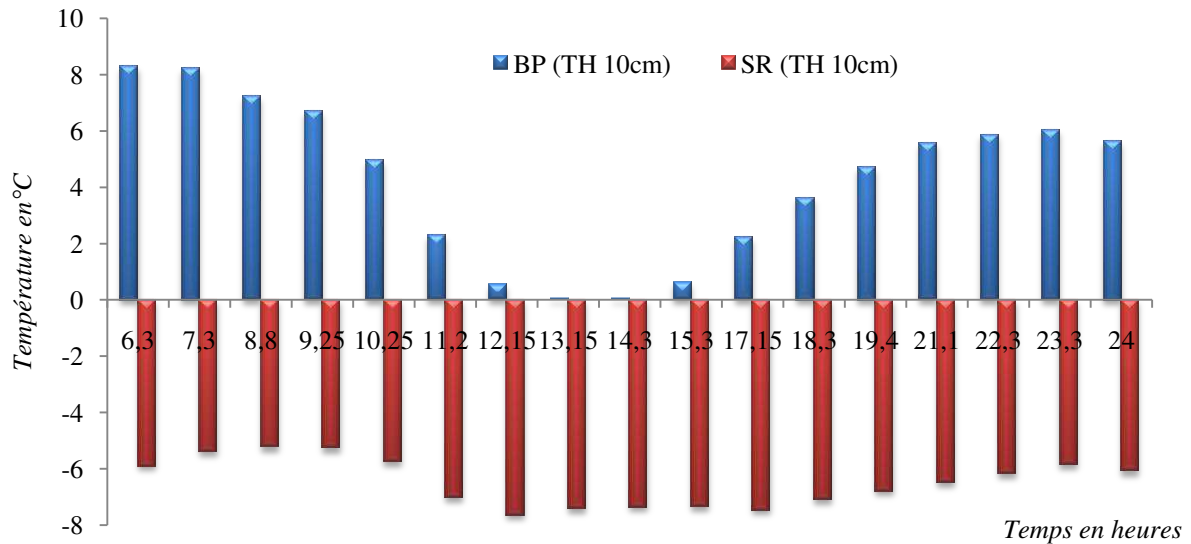


Fig. IV. 14 : Différence de température entre les TH 10cm brut et protéger par BP et SR, barrage de Ghrib.

La comparaison des effets des deux solutions pratiques à montré que la surface réfléchissante était beaucoup plus efficace que la couche convective en béton poreux pour diminuer considérablement les températures à la surface et au sein des différentes couches du masque du barrage de Ghrib.

IV.2. Barrage de Bouhnifia (wilaya de Mascara) :

IV.2.1 Optimisation de l'effet de la couche existante en béton armé de 12 cm :

Pour diminuer l'amplitude des températures dans le masque en béton bitumineux du barrage de Bouhnifia, il existe déjà une couche de protection en béton armé d'une épaisseur de 12 cm réalisé au dessus du masque.

Le transfert de chaleur dans ce cas s'effectués en conduction couplé à la convection (équation IV.1)

Mais, on ne dispose pas des mesures réelles de températures sur notre site, si pour cela on assimile la variation de cette dernière par rapport au temps et à l'espace. Pour déterminer la condition à la limite imposée à la surface de la couche en béton armé, on utilise l'équation (IV.2) et on prend en compte la diffusivité thermique du béton armé.

Les équations entrées comme condition à limite à la surface de la couche en béton armé par *UDF* sont les suivantes :

➤ *Période hivernale* : $T(0.12, t) = 288.165 - 18.03 \sin(9.86 * 10^{-5}t)$ (IV-7)

➤ *Période estivale* : $T(0.12, t) = 313.53 - 13.95 \sin(9.86 * 10^{-5}t)$ (IV-8)

IV.1.2.1 Variation temporelle:

Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures IV.13 et IV.14 où l'on observe bien une oscillation des températures sous l'effet du jour et de la nuit.

En hiver (Fig. IV.15) :

- Les températures maximales obtenues en hiver sont respectivement 24.97 °C à 15 PM, 21.49 °C à 16 PM et 19.75 °C à 17 PM pour TH 1 cm, TH 6 cm et TH 10 cm.
- Les valeurs minimales de température pour les trois thermocouples TH 1 cm, TH 6 cm et TH 10 cm sont respectivement 3.93 °C à 6 AM et 7.04 °C à 7 AM et 8.82 °C à 7 AM.

En été (Fig. IV.16) :

- Les températures maximales oscillent entre 47.86 °C à 15 PM pour le TH 1 cm, 45.24 °C à 16 PM pour le TH 6 cm et de 43.94 °C a 17 PM pour le TH 10 cm.
- Les minimas ne dépassent pas les 32 °C pour toute l'épaisseur du masque.

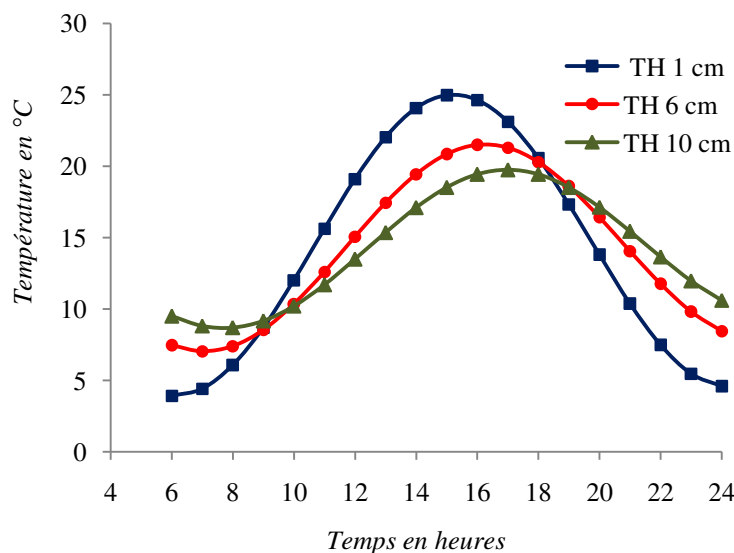


Fig. IV.15 : Variation de la température au sein du masque de barrage de Bouhnihia, protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période hivernale.

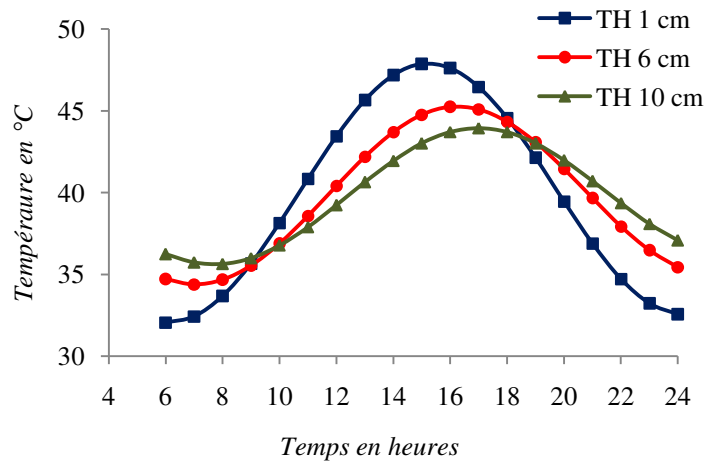


Fig. IV.16 : Variation de la température au sein du masque de barrage de Bouhnifia, protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période estivale.

IV.1.2.2 Variation spatiale:

En hiver : Les résultats des calculs montrent que la couche en béton armé est gelée sur toute son épaisseur pendant la nuit de (22 PM à 6 AM). La température maximale ne se situe pas toujours à la surface de la couche en béton armé elle peut se propager vers les couches intérieures. La température à une profondeur de 0.9 m sous la surface de parement se stabilise entre 14 °C et 15 °C (Fig. IV.17).

En été : La figure IV.18 montre que la température se stabilise à une profondeur de 1 m autour de 40 °C, la température du masque varie entre 29.13 °C à 6 PM et 50.76 °C à 14 PM.

Les figures IV.18 et IV.20 représentent la répartition des températures au sein de la structure pendant les heures de pointes (14 PM).

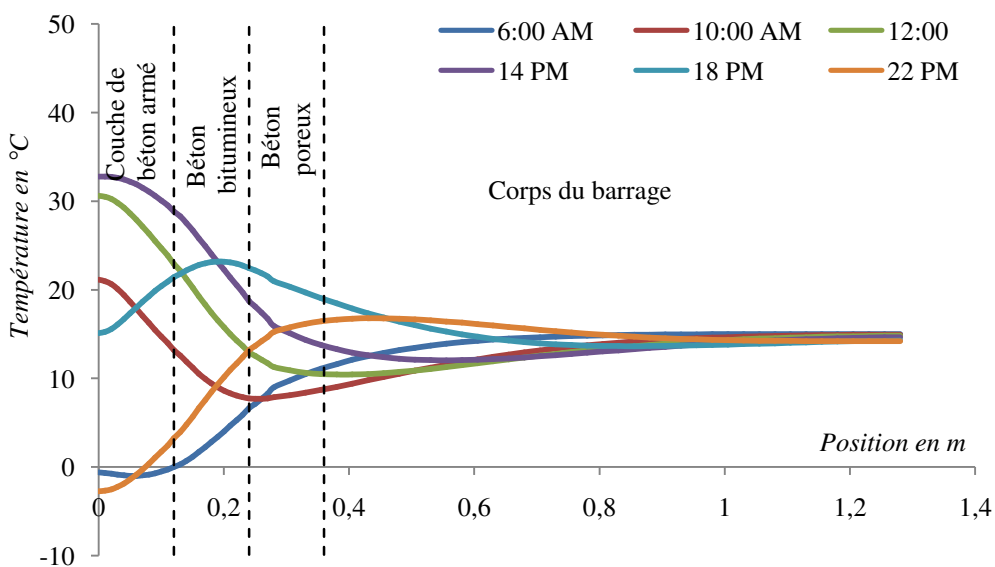


Fig. IV. 17 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période hivernale.

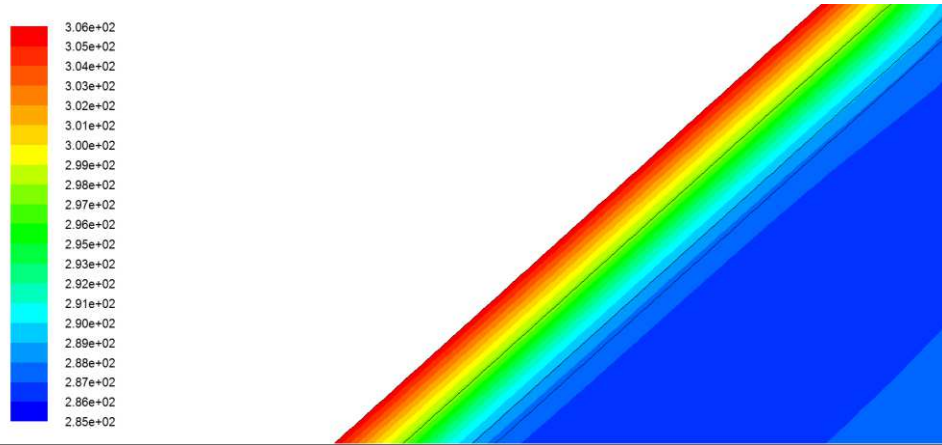


Fig. IV. 18 : Simulation de la variation de la température (K) au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période hivernale à 14 PM.

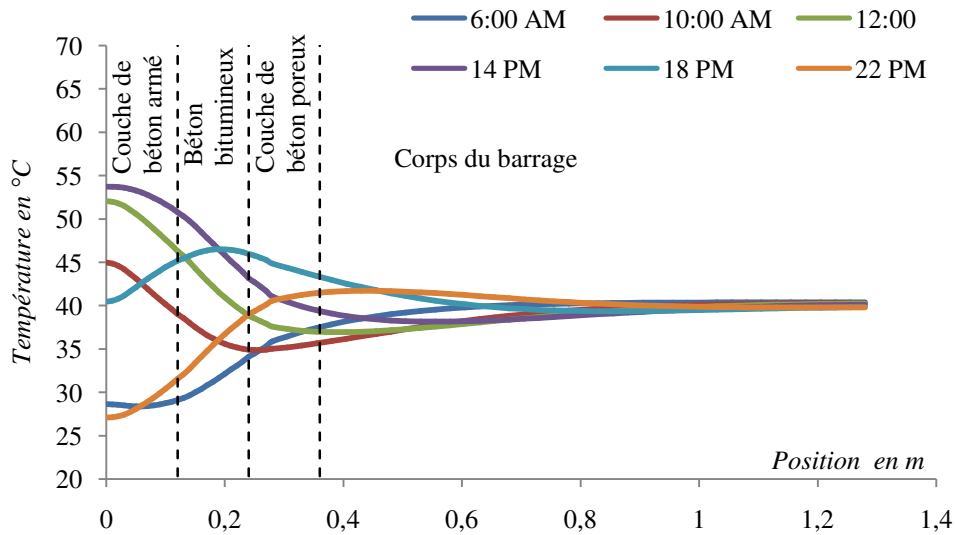


Fig. IV. 19 : Evolution de la température au sein du masque de barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période estivale.

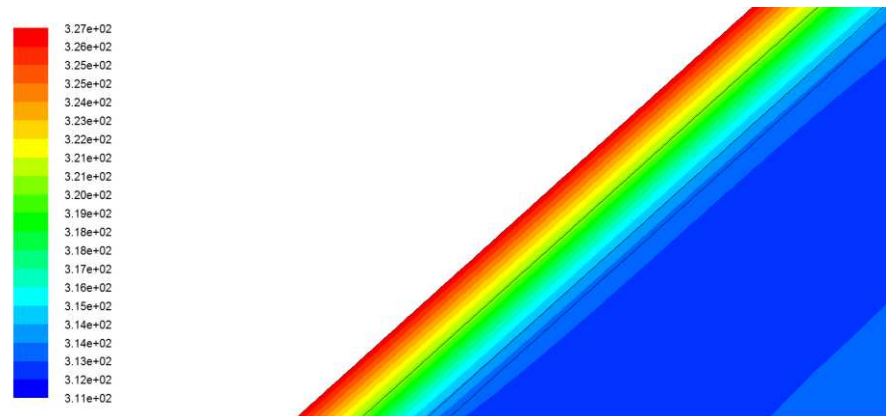


Fig. IV. 20 : Simulation de la variation de la température (K) au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période estivale à 14 PM.

IV.2.2 Optimisation de l'effet de la couche convective de 12 cm en béton poreux :

Pour ce cas, on propose de protéger le masque par une couche en béton poreux de même épaisseur que le béton armé (12 cm). On ce qui concerne la condition a la limite chargée à la surface de la couche en béton poreux par *UDF* sur FLUENT sont les suivantes :

➤ Période hivernale : $T(0.12, t) = 288.165 - 18.08 \sin(9.86 * 10^{-5}t)$ (IV-9)

➤ Période estivale : $T(0.12, t) = 313.53 - 14.02 \sin(9.86 * 10^{-5}t)$ (IV-10)

IV.2.2.1 Variation temporelle :

Les figures IV.21 et IV.22 montrent l'évolution de la température pendant les deux périodes hiver et été, les maxima de température sont de 23.53 °C en hiver et 46.99 °C en été, mais les minimas observées sont de l'ordre de 5.21 °C en hiver et 32.78 °C en été.

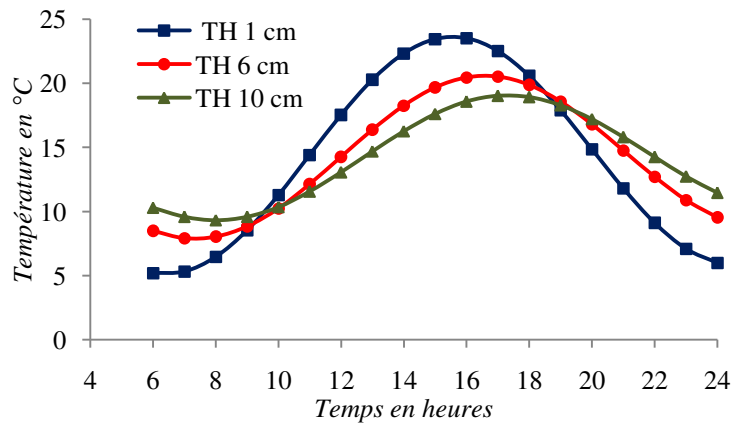


Fig. IV.21 : Variation de la température au sein du masque de barrage de Bouhnifia, protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période hivernale.

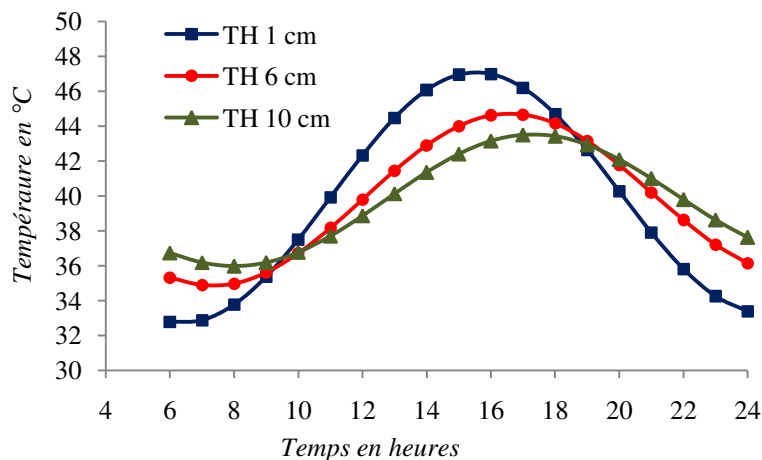


Fig. IV.22 : Variation de la température au sein du masque de barrage de Bouhnifia, protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période estivale.

IV.2.2.2 Variation spatiale:

En hiver les températures dans le béton bitumineux varient entre 0.853 °C à 6 AM et 27.31 °C à 14 PM, l'amplitude de température à la surface de la couche en béton poreux est de l'ordre de 26.458 °C. A une profondeur de 1.23 m la température à une tendance à se stabilisée autours de 15 °C (Fig. IV.23).

Pour la période estivale on observe que le masque atteint 49.92 °C à 14 PM. La température se stabilise à une profondeur de 1.18 m autours de 40 °C (Fig. IV.25).

Les figures IV.24 et IV.26 représentent la répartition des températures pendant respectivement, l'hiver et l'été à 14 PM (Tmax).

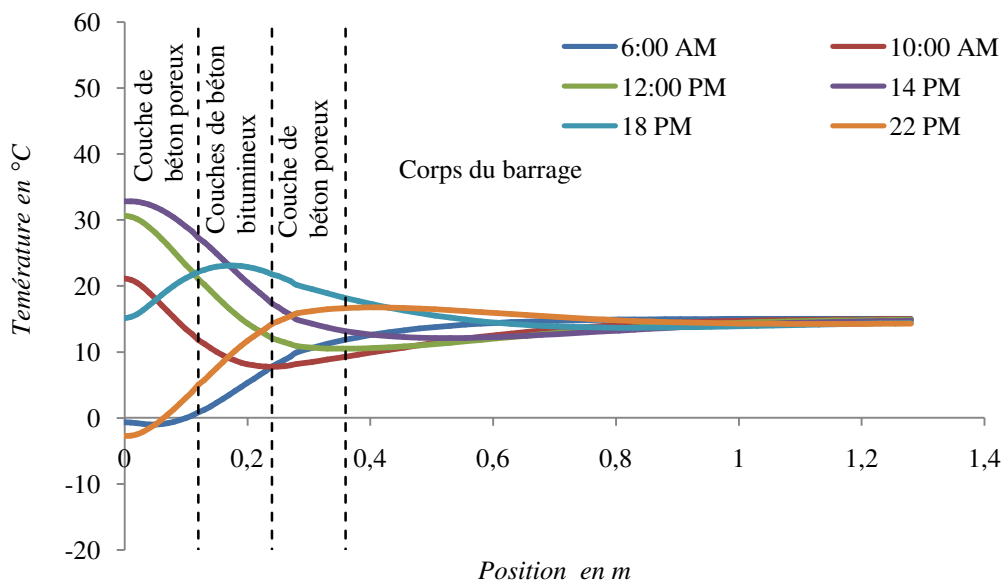


Fig. IV. 23 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période hivernale.

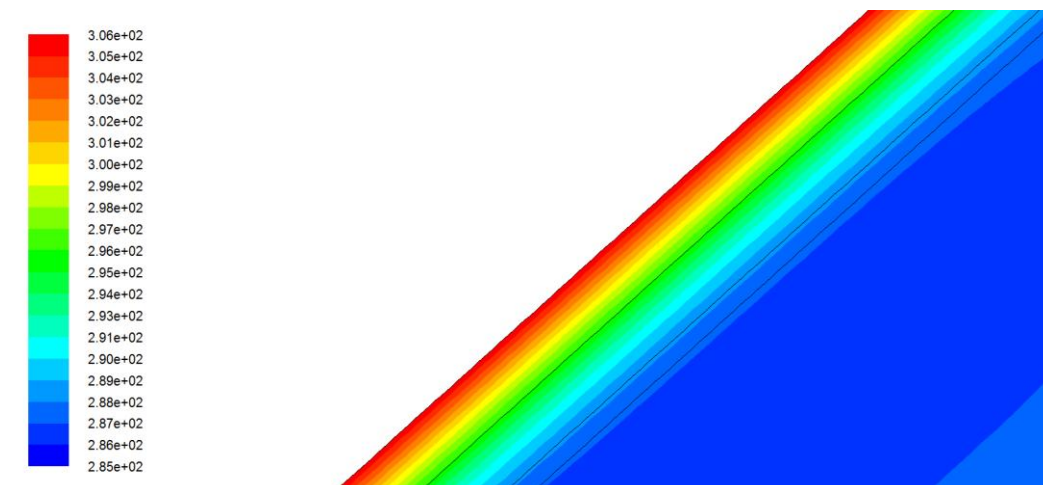


Fig. IV. 24 : Simulation de la variation de la température (K) au sein du masque de barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période hivernale à 14 PM.

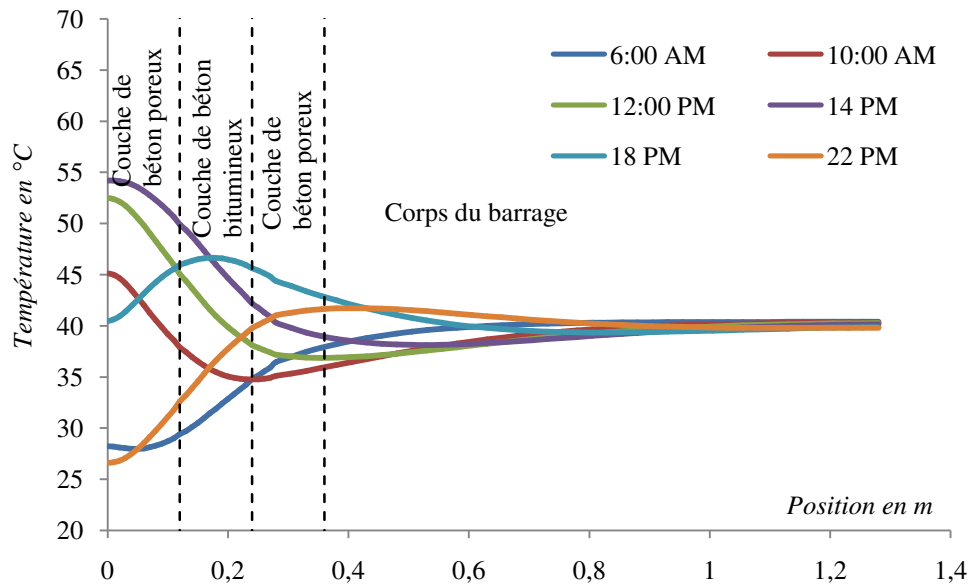


Fig. IV. 25 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton poreux de 12 cm, période estivale.

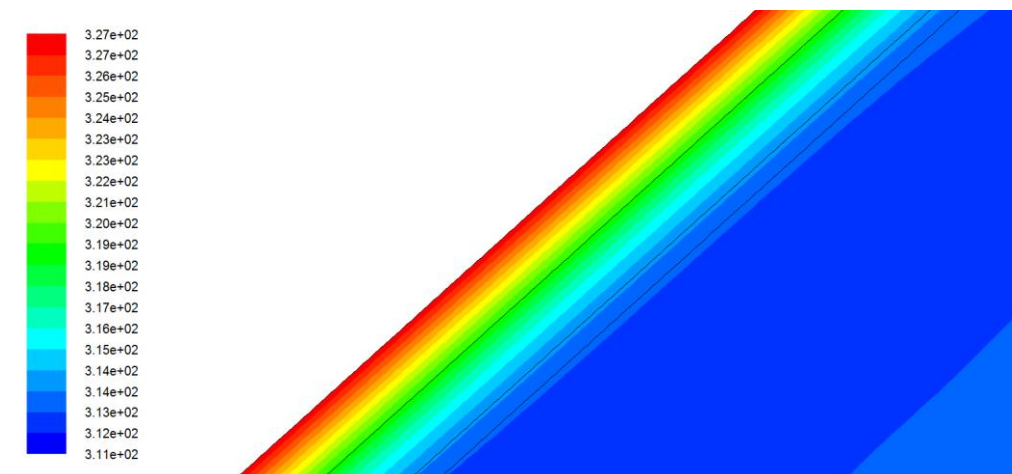


Fig. IV. 26 : Simulation de la variation de la température (K) au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une couche en béton armé de 12 cm, période estivale à 14 PM.

IV.2.3 Optimisation de l'absorptivité d'une couche réfléchissante :

IV.2.3.1 Définition du modèle :

Une simulation d'une surface réfléchissante de couleur blanche de 2 mm d'épaisseur a été ajoutée sur la surface du masque en béton bitumineux du barrage de Bouhnifia, cela pour les deux périodes, hivernale et estivale. L'analyse concerne les trois thermocouples TH 1 cm, TH 6 cm et TH 10 cm compté à partir de la surface du masque.

IV.2.3.2 Variation des rayonnements solaires à la surface du masque brut, barrage de Bouhnifia :

La quantité de rayonnement solaire atteignant une surface, suit une variation saisonnière cyclique, cette variation est fonction de la latitude du site, de l'orientation de la pente des faces exposées, de la topographie du terrain environnant, du temps de la journée et enfin du jour de l'année (Léger et al., 1993).

La figure IV.27 montre la variation journalière de flux radiatif solaire intercepté par la surface du masque en béton bitumineux du barrage de Bouhnifia, où on observe que le flux radiatif solaire le plus important est enregistré à midi d'une valeur de 1368,77 w/ m² pour l'été et de 1007,29 w/ m² pour l'hiver, les valeurs minimales du flux sont observées à 21 PM de 241,51 w/ m² et à 7 PM de 220,98 w/ m², successivement pour l'été et l'hiver.

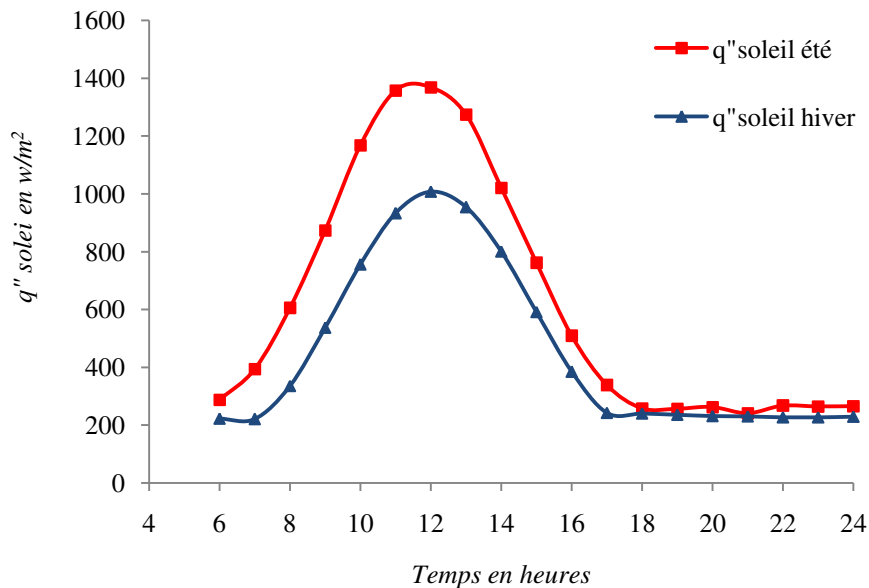


Fig. IV.27 : Variation du flux radiatif solaire sur la surface du masque en béton bitumineux brut du barrage de Bouhnifia.

• **Condition aux limites**

La méthode de détermination des conditions aux limites est détaillé précédemment (§IV.1.2.1)

Donc la condition à la limite entrée à la surface de la couche réfléchissante pour les deux périodes simulées, où T en Kelvin et t en secondes est:

➤ Période hivernale : $T = 270 + 21.52 * e^{-e\left(\left(\frac{t-44960.33}{6464.85}\right) - \frac{t-44960.33}{6464.85} + 1\right)}$ (IV-11)

➤ Période estivale : $T = 299.89 + 19.46 * e^{-e\left(\left(\frac{t-43475.93}{8916.53}\right) - \frac{t-43475.93}{8916.53} + 1\right)}$ (IV-12)

IV.2.3 .1 Variation temporelle :

➤ **TH 1 cm :**

Les figures IV.28 et IV.29 montrent la distribution de la température à 1 cm de la surface du masque brut et protégé par une surface réfléchissante sur une durée de 19 heures.

En été comme en hiver, on remarque une diminution de température dans toute la durée d'essai, avec 11.03 °C de diminution à 13 PM en hiver, et de 7.30 °C de moins à 7 AM en été.

On remarque pour le masque protégé par la surface réfléchissante que la période de gel s'allonge de 5 heures à la surface par rapport au masque brut, de 6 AM à 9 AM et de 21 PM à 24 PM.

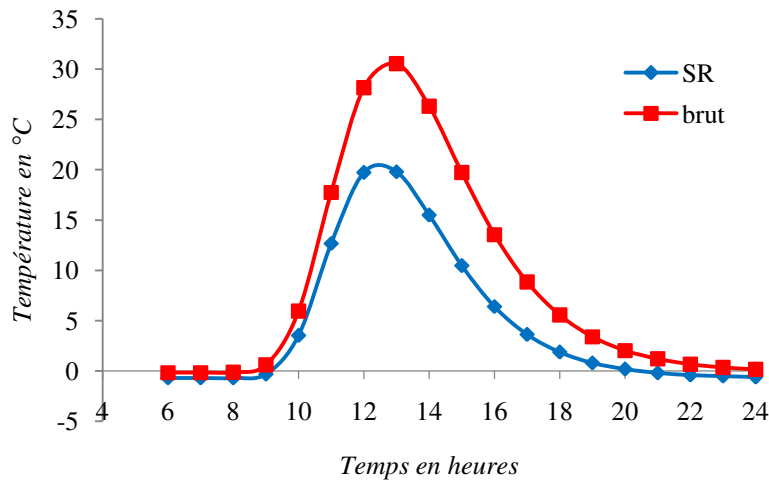


Fig. IV. 28 : Variation des températures du TH 1 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période hivernale.

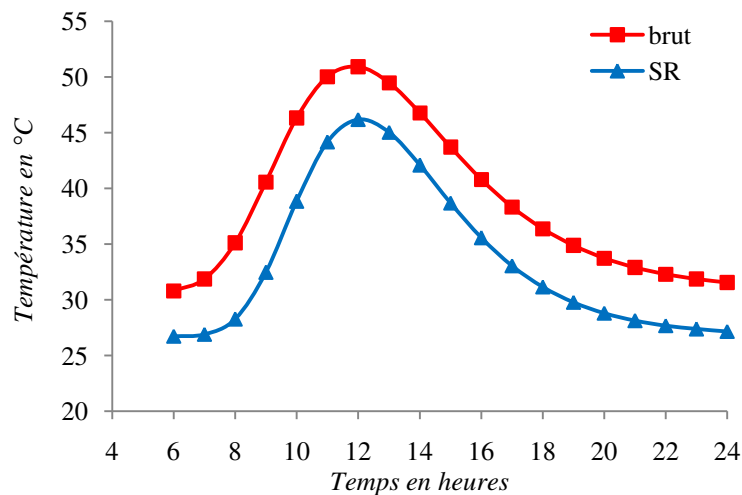


Fig. IV. 29 : Variation des températures du TH 1 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période estivale.

TH 6 cm :

Durant l'hiver, pour le masque protégé par la surface réfléchissante, la température se diminue à la valeur maximale de 7.65 °C à 14 PM par rapport au masque brut, et la période de gel s'allonge d'une heure de plus de 6 AM jusqu'à 9 AM (Fig. IV.30).

En été la diminution s'atteint 11.10 °C à 10 AM (Fig. IV.31).

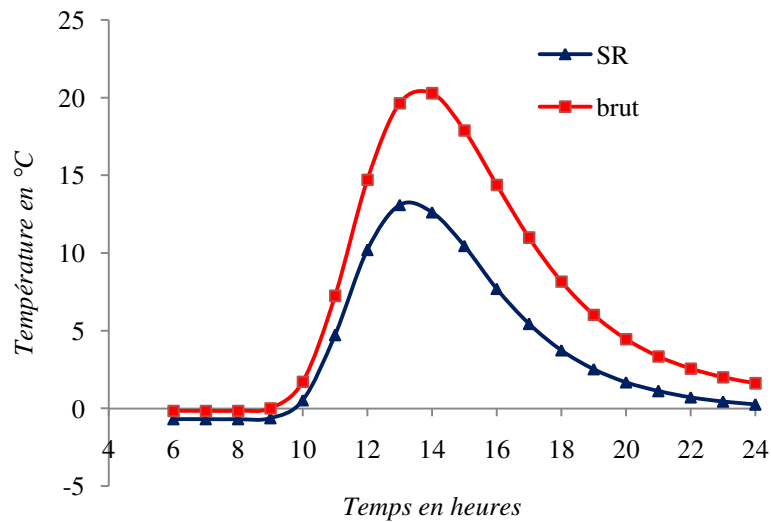


Fig. IV. 30 : Variation des températures du TH 6 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhniïfia, période hivernale.

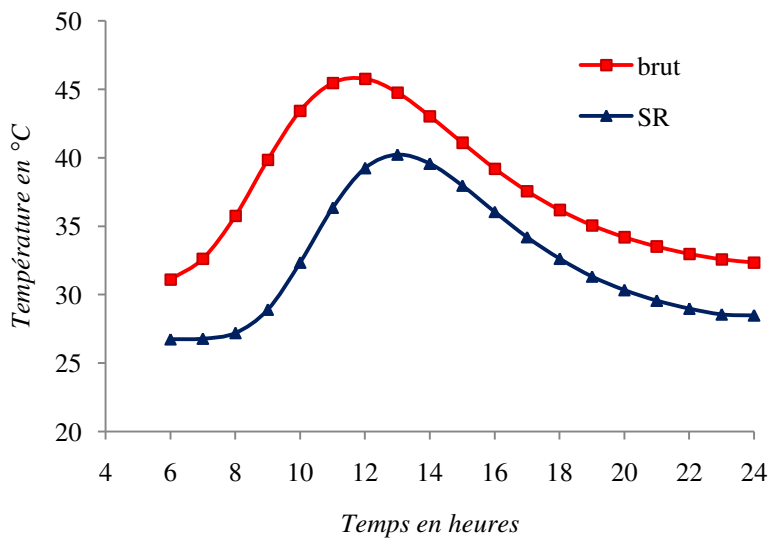


Fig. IV. 31 : Variation des températures du TH 6 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhniïfia, période estivale.

TH 10 cm :

Pour le TH 10 cm, on remarque la même chose que les deux TH précédents, une importance diminution atteint 6.12 °C à 15 PM en hiver avec une durée de gel d'une heure de plus par rapport au masque brut, et qui s'étale entre 6 AM et 10 AM. En été la température maximale diminue avec une valeur de 9.44 °C à 10 AM (Fig. IV.32, IV.33).

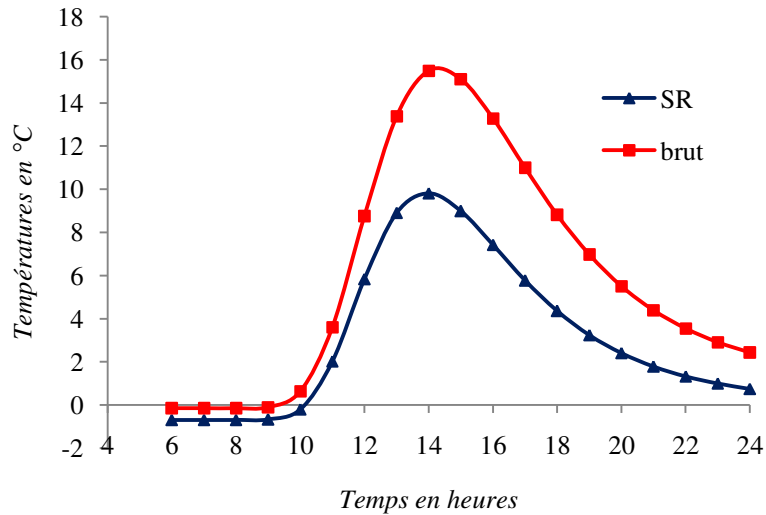


Fig. IV. 32: Variation des températures du TH 10 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période hivernale.

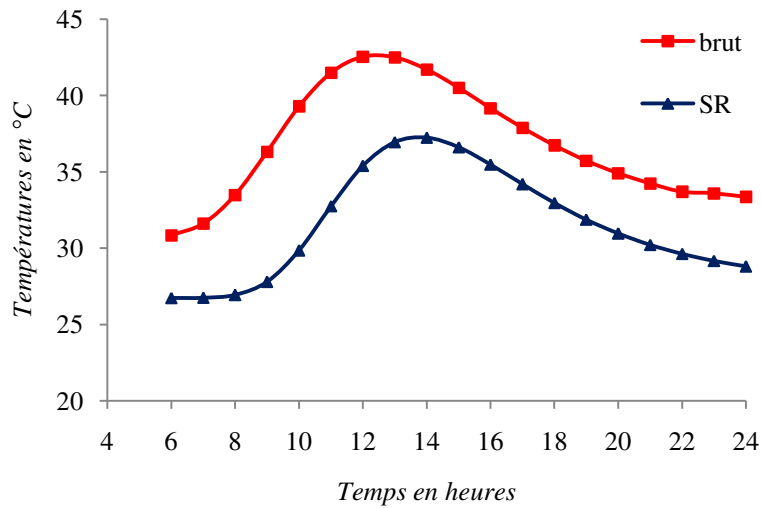


Fig. IV. 33 : Variation des températures du TH 10 cm protégé par une surface réfléchissante (SR) et brut, barrage de Bouhnifia, période estivale.

L'influence de la surface réfléchissante sur le masque en béton bitumineux sur les deux périodes est résumée comme suit:

- En hiver, on remarque une diminution globale des températures durant toute la durée d'essai (19 heures) et que l'épisode de gel s'allonge avec des alternances de températures positive/négative au sein du masque. Il est fort probable également que ces conditions aient eu un impact particulier en raison de la présence d'eau dans les enrobés bitumineux a pu jouer un rôle important dans la dégradation de ce dernier.
- Mais, pour l'été, les températures dans le masque diminue significativement dans la période de grande chaleur (12 PM) avec une valeur de 5.56 °C pour TH 1cm, 6.53 °C pour TH 6 cm et 7.15 °C pour TH 10 cm.

IV.2.3.2 Variation spatiale :

Les figures IV.34 et IV.36, montrent la distribution de la température dans le masque à différentes durées pour les deux périodes hiver et été.

- En hiver, la température maximale enregistrée à la surface du masque est de 19.69 °C à 12 PM et le minimum est de -0.69 °C à 6 AM, les températures convergent autour de -0.69 °C à une profondeur de 0.87 m.
- En été, la valeur maximale atteint 46.19 °C à 12 PM, et le minimal est enregistrée à 6 AM avec une valeur de 26.75 °C, les températures se stabilisent autour de 26.74 °C à 1 m de profondeur.

La distribution spatiale de la température au sein du masque est représentée dans les figures IV.35 et IV.37.

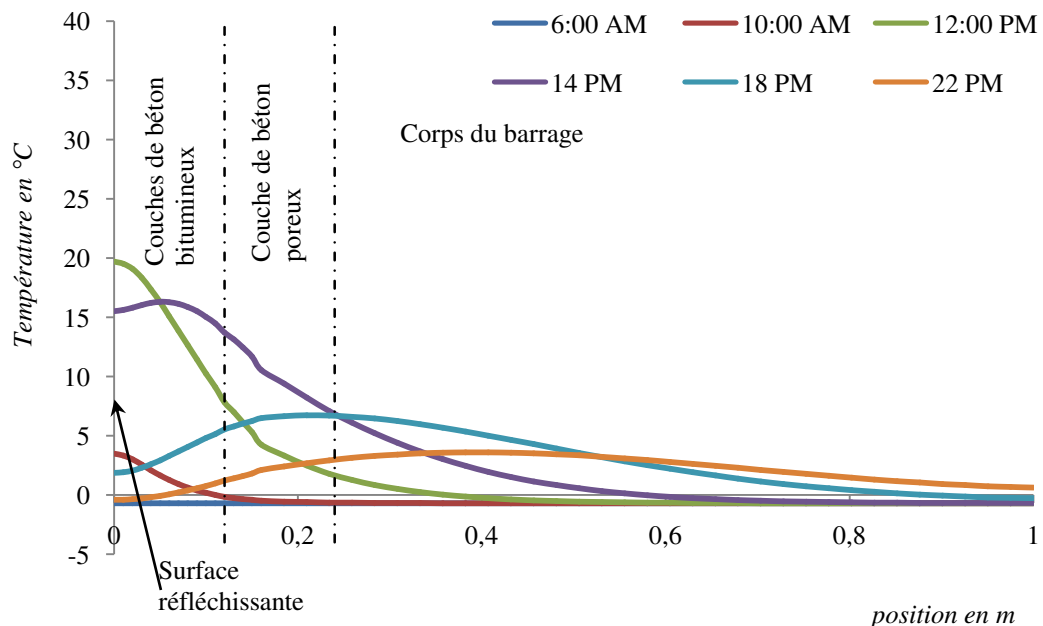


Fig. IV. 34 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une surface réfléchissante, période hivernale.

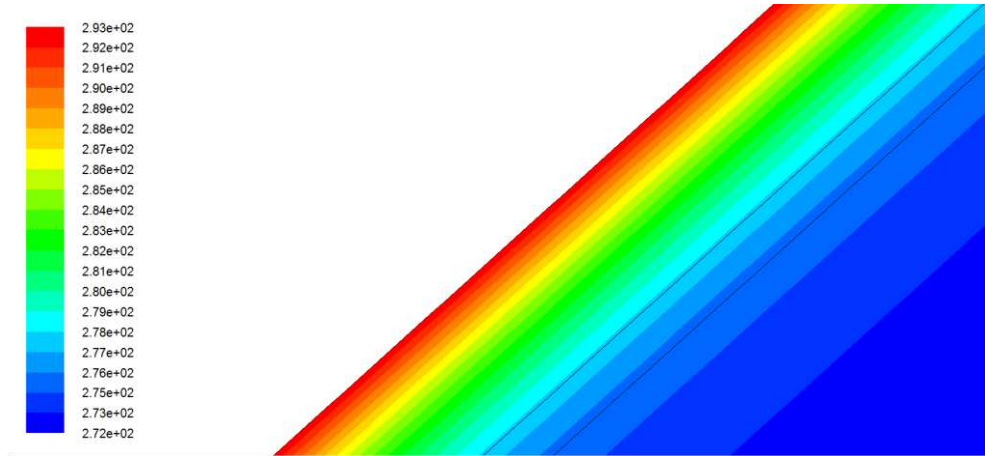


Fig. IV. 35 : Simulation de la variation de la température (K) au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une surface réfléchissante, période hivernale à 12 PM.

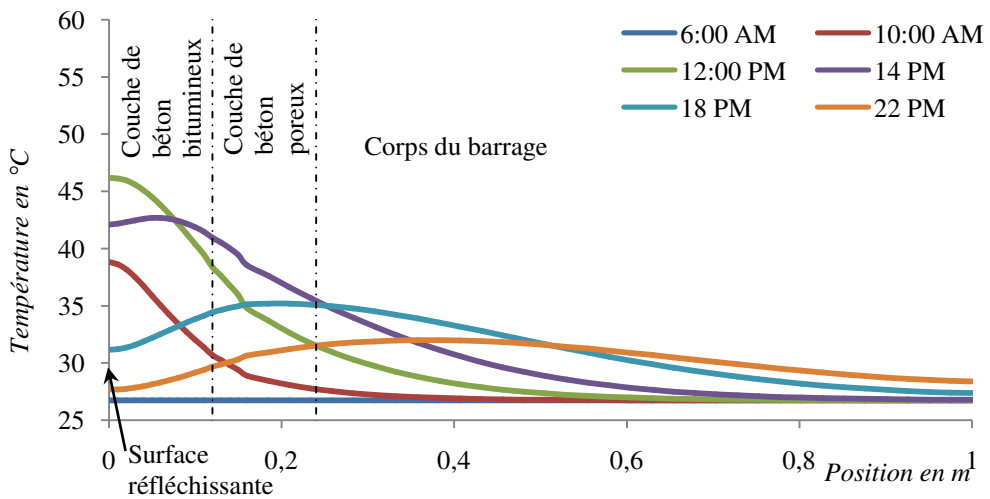


Fig. IV. 36 : Evolution de la température au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une surface réfléchissante, période estivale.

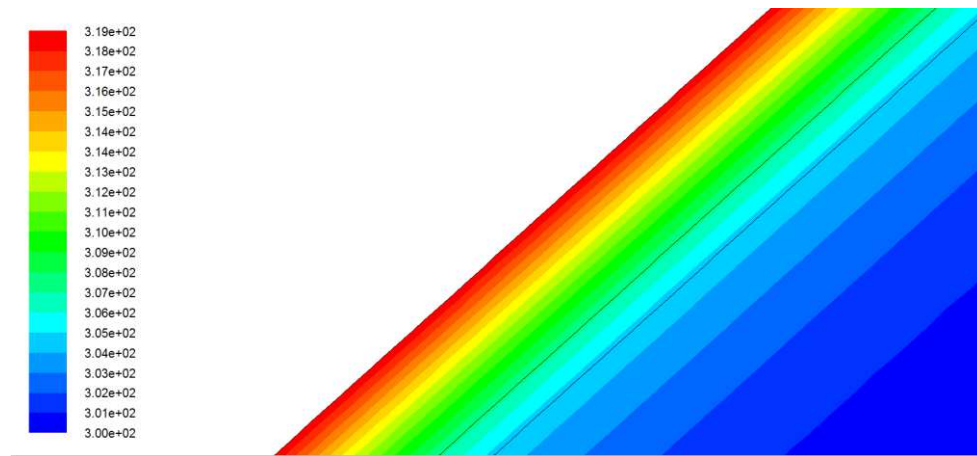


Fig. IV. 37 : Simulation de la variation de la température (K) au sein du masque du barrage de Bouhnifia protégé par une surface réfléchissante, période estivale à 12 PM.

IV.1.3 Comparaison entre les solutions:

L'objectif de cette partie d'étude est de faire une comparaison entre les trois solutions les plus utilisées dans la protection des masques en béton bitumineux contre les effets des températures, le béton poreux, le béton armé et la surface réfléchissante. Le tableau IV.3 résume les différences de températures des trois thermocouples protégés par : une couche de 12 cm en béton armé, une couche en béton poreux de même épaisseur et par une surface réfléchissante par rapport aux températures sans protection (masque brut).

Tableau IV.3 : Différence de température des thermocouples protégés par rapport à la température expérimentale sans protection (masque brut), barrage de Bouhnifia.

Thermocouples	Périodes	Couche en BA (12 cm)		Couche en BP (12 cm)		Surface réfléchissante	
		Refroid max (°C)	Réchauf max (°C)	Refroid max (°C)	Réchauf max (°C)	Refroid max (°C)	Réchauf max (°C)
TH 1 cm	Hiver	-9.6	+15.2	-10.6	+15.2	-10.73	-
	Eté	-8.3	+10.8	-9.4	+10.9	-7.52	-
TH 6 cm	Hiver	-2.2	+12.6	-3.3	+12.6	-7.65	-
	Eté	-6.9	+8.2	-7.3	+8.1	-11.10	-
TH 10 cm	Hiver	-	+11.6	-	+11.7	-6.12	-
	Eté	-3.6	+7.3	-3.8	+7.2	-9.44	-

➤ Période hivernale :

Les résultats de la différence de températures à 1 cm de la surface du masque, à 6 cm et à 10 cm sont présentés sur les figures IV.38, IV.39 et IV.40, où on peut observer que:

- Le refroidissement le plus important est de 10.6 °C pour le béton poreux et 9.6 °C pour le béton armé à 12 PM, il débute à 11 AM jusqu'à 14 PM, cela à 1 cm de la surface du masque et à 6 cm, mais au thermocouple situé à 10 cm on observe aucun refroidissement.
- La présence des couches BP et BA au dessus du masque entraîne un réchauffement dans les périodes qui s'étale de 6 AM à 10 AM et de 15 PM à minuit, le réchauffement le plus important est situé à 1 cm de la surface du masque avec 15.2 °C, pour les deux matériaux.
- La protection par la surface réfléchissante (SR) entraîne un refroidissement pour toute la période d'essai et dans toute l'épaisseur du masque avec une valeur maximale enregistrée à 1 cm de la surface du masque avec une valeur de 10.73 °C à 13 PM.

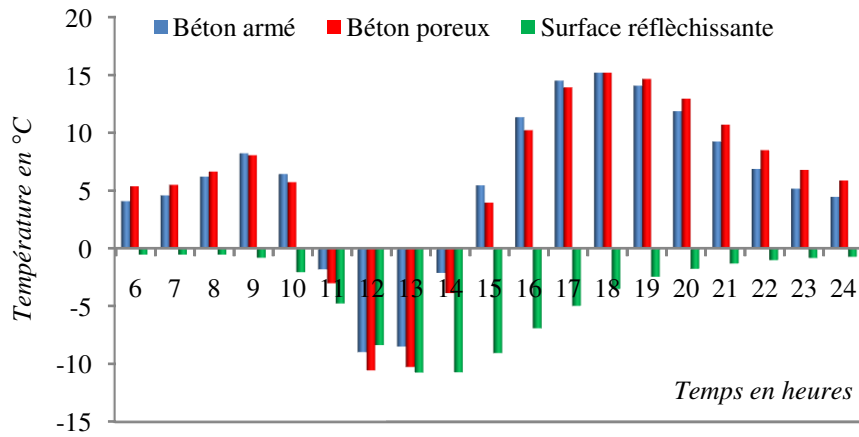


Fig. IV.38 : Différence de température à TH 1 cm protégé par le béton armé, le béton poreux et la surface réfléchissante en hiver, barrage Bouhnifia.

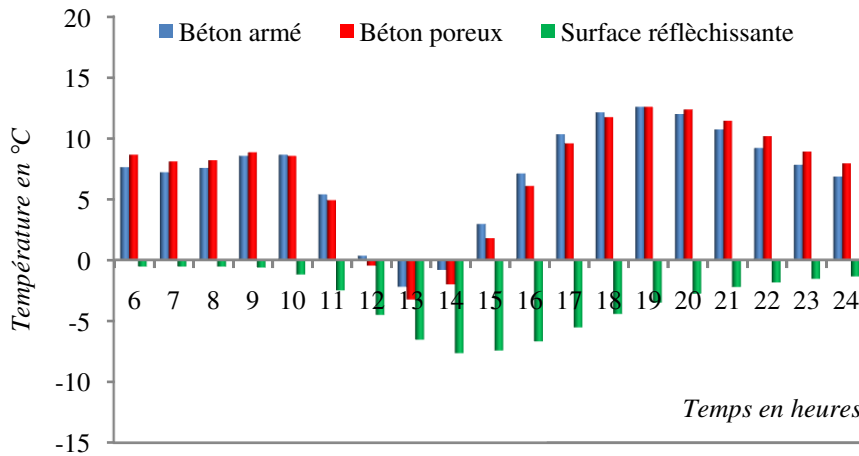


Fig. IV.39 : Différence de température à TH 6 cm protégé par le béton armé, le béton poreux et la surface réfléchissante, barrage Bouhnifia.

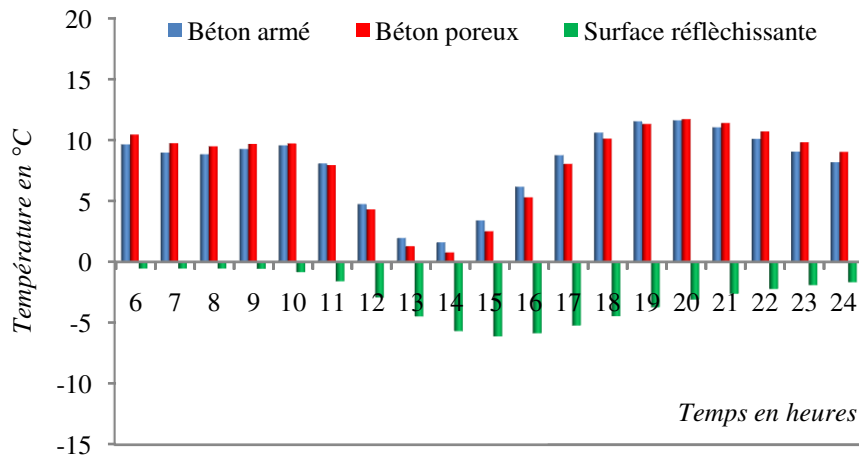


Fig. IV.40 : Différence de température à TH 10 cm protégé par le béton armé, le béton poreux et la surface réfléchissante, barrage Bouhnifia.

➤ *Période estivale :*

- Pour cette période le refroidissement s'étale de 6 AM jusqu'à 13 PM avec un maximum de 9.4 °C pour le béton poreux et 8.3 °C pour le béton armé. Pour le thermocouple situé à 6 cm le refroidissement débuté à 8 AM jusqu'à 13 PM, pour le béton armé et s'allonge par une heure pour le béton poreux par rapport au béton armé. On remarque, pour le masque protégé par la surface réfléchissante un refroidissement pour toute la durée d'essai avec un maximal 11.1 °C à 10 AM au thermocouple situé à 6 cm.
- Le réchauffement est varié de 10.8 °C à 10.9 °C à 1 cm de la surface du masque pour les deux matériaux, il diminue en allant vers la profondeur. La période de réchauffement s'étale de 14 PM à 24 PM (figures IV.41, IV.42 et IV.43).

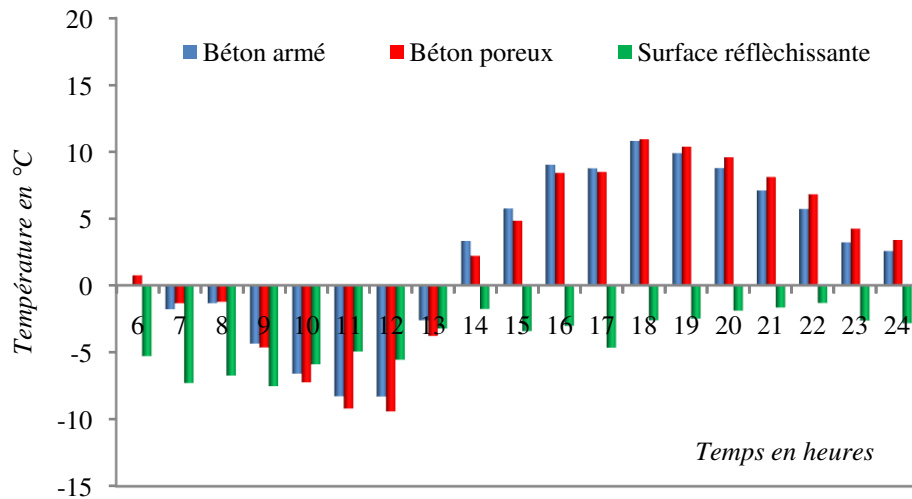


Fig. IV.41 : Différence de température à TH 1 cm protégé par le béton armé, le béton poreux et la surface réfléchissante en été, barrage Bouhnia.

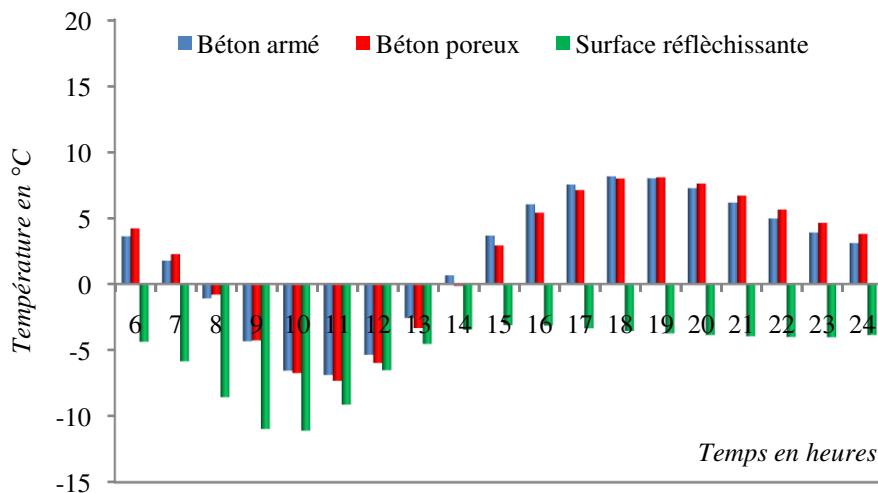


Fig. IV.42 : Différence de température à TH 6 cm protégé par le béton armé, le béton poreux et la surface réfléchissante en été, barrage Bouhnia.

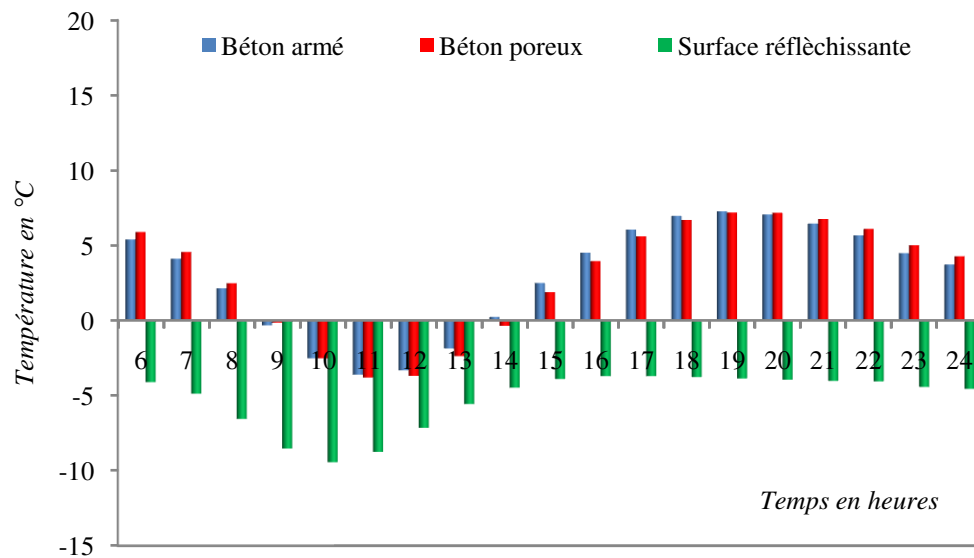


Fig. IV.43 : Différence de température à TH 10 cm protégé par le béton armé, le béton poreux et la surface réfléchissante en été, barrage Bouhnifia.

A la lumière des résultats de simulation obtenues, on peut conclure que :

1. En été, la présence de la couche convective en béton poreux permet d'obtenir un refroidissement maximale du masque en béton bitumineux par rapport à la couche en béton armé existante et la surface réfléchissante à la surface du masque, mais on allant vers la profondeur du masque on trouve que la surface réfléchissante peut refroidir le masque avec des écarts de :

- 3.8 °C par rapport au BP et 4.2 °C par rapport au BA (couche existante) pour le TH 6 cm.
- 5.64 °C par rapport au béton poreux et 5.84 °C par rapport au béton armé (couche existante) pour le TH 10 cm.

Le masque est réchauffé par les deux matériaux, soit le béton poreux ou bien le béton armé avec des valeurs plus ou moins proches.

2. En hiver, le masque protégé par la surface réfléchissante refroidi le masque avec des écarts de 0.7 °C à 1 cm de la surface du masque, 4.35 °C à TH 6 cm et 6.12 °C à 10 cm par rapport au BP. Concernant les écarts par rapport au BA, on trouve 2.23 °C à 1 cm de la surface, 5.54 °C à TH 6 cm et 6.12 °C à TH 10 cm.

La couche en béton poreux réchauffe mieux le masque en hiver, d'une durée qui s'étale de 6 AM à 10 AM et de 15 PM à 24 PM pour la surface du masque avec 15.2 °C par rapport au masque brut, pour la surface réfléchissante on ne remarque aucun réchauffement.

La comparaison des effets des différentes solutions pratiques à montré que la surface réfléchissante et la couche convective en béton était beaucoup plus efficace pour diminuer considérablement les températures en été.

Ainsi, il a été observé que la couche convective et la couche en béton armé permettaient de rehausser considérablement les températures en hiver, alors que la surface réfléchissante refroidit le masque, allonge les durées de gel, et augmente le nombre répété de cycles gel/dégel, qui conduit au phénomène de la fatigue thermique, qui a un impact sur la propagation de fissures dans le béton bitumineux.

La solution optimale déduite de cette étude, sans prise en compte de contraintes externes comme le coût des installation, est l'utilisation du béton poreux convectif pour protégé le masque en béton bitumineux contre les effets des rayonnements en été, et aussi contre les effets de gel en hiver, pour éviter toute dégradation du masque.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté à simuler des solutions pratiques pour protéger les masques en béton bitumineux contre les effets des rayonnements solaires dans les saisons chaudes et contre les cycles de gel-dégel dans les saisons froides. À partir des résultats obtenus, on peut conclure que :

1. La couche convective en béton poreux permet de refroidir le masque en béton bitumineux pendant les durées de hautes température au TH 1cm avec plus de 10 °C pendant l'été et le réchauffe par plus de 15 °C en hiver, pour empêcher la formation des gels, et donc de limiter les conséquences résultantes des cycles de gel-dégel, cela pour le masque du barrage de Bouhnifia. Cependant pour le masque du barrage de Ghrib le refroidissement atteint une valeur maximale de 12.61 °C au TH 1cm, le réchauffement peut atteindre 7.13 °C ;
2. La couche en béton armé utilisée pour protéger le masque du barrage de Bouhnifia, à la même influence que le béton poreux sur le réchauffement, surtout au TH 1 cm où on observe la même valeur de 15.2 °C pendant l'hiver et 10.6 °C pendant l'été ;
3. La présence d'une surface réfléchissante sur le masque en béton bitumineux, permet de refroidir le masque sur toute son épaisseur soit dans les saisons chaudes ou bien froides, avec plus de 11 °C pour le masque de Ghrib, de 11.6 °C en été, et de 7.65°C en hiver pour le masque de Bouhnifia.

Ce travail montre que la solution optimal pour la protection des masques en béton bitumineux contre les effets des hautes températures en été et les effets des cycles répétés de gel-dégel pendant l'hiver, est la couche en béton poreux à cause des avantages présentés dans le refroidissement des différentes couches en béton bitumineux pendant l'été, pour éviter les dommages par déformation permanente, et de les réchauffer pendant l'hiver, pour protégé le masque en béton bitumineux contre les cycles répété de gel-dégel, à fin d'éviter la fissuration thermique de ce dernier.

Conclusion générale

D'une façon générale, l'effet des changements climatiques sur les masques en béton bitumineux varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de l'enrobées bitumineux utilisé, le climat et la position géographique. Les travaux ont donc cherché à prendre ces aspects en compte. Naturellement, il existe plusieurs incertitudes quant aux simulations du climat pour les prochaines décennies et plusieurs scénarios d'augmentation des gaz à effet de serre existent. Comme ces scénarios sont variables, les résultats des simulations climatiques peuvent grandement différer en fonction des intrants utilisés pour celles-ci. C'est une des raisons pour lesquelles la plupart des résultats présentés dans le cadre de cette thèse sont abordés selon une approche plus ou moins optimiste.

L'augmentation des températures est aussi au cœur des préoccupations liées aux changements climatiques et, selon les régions géographiques de l'Algérie, les saisons et les horizons considérés, une augmentation de celles-ci de 1 à 6% peut être anticipée. Ces résultats sont fonction, entre autres, des scénarios d'augmentation de gaz à effet de serre et des modèles utilisés pour effectuer les simulations. Néanmoins, le changement anticipé de ce paramètre climatique (température) est susceptible d'affecter de manière significative les barrages en remblais en Algérie. Les masques en béton bitumineux sont des structures particulièrement sensibles aux effets climatiques et il est anticipé que les changements climatiques pourraient grandement influencer leur comportement.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont permis de montrer les effets que pourraient avoir les changements climatiques sur les masques en béton bitumineux. Les analyses ont été concentrées sur l'effet de la variation des champs de températures au sein des masques en béton bitumineux, ainsi que sur l'effet de l'augmentation des températures sur leur comportement et de l'effet de gel.

Avec le développement des logiciels de modélisation, les simulations sur outils numériques s'avèrent, la solution pour étudier le comportement thermique des masques en béton bitumineux pour une variété de configurations et sous différentes conditions opérationnelles, à condition de disposer d'une procédure fiable pour la validation des résultats numériques. Dans ce cadre, le logiciel de calcul FLUENT a été utilisé au cours de cette étude doctorale pour décrire le processus de différents types de transfert de chaleur soit par conduction seule dans des cas et couplées avec la convection et la radiations dans autres cas.

Cet outil numérique a été développé afin de mieux appréhender le transfert de chaleur dans les masques en béton bitumineux, par l'introduction dans le code de calcul des Subroutines réalisées en langage informatique -C- appelée (*UDF*), regroupant des paramètres tels que les profils de température, le rayonnement solaire, ainsi que les paramètres physico-thermiques des matériaux.

Après une étude de validation de la procédure de simulation pour les deux sites étudiés barrage de Ghrib et de Bouhnifia, en utilisant les mesures expérimentales disponibles, le travail a été poursuivi par la simulation de différentes solutions pratiques telles que la couche de protection en béton poreux convectif, pour profiter du transport de la chaleur de manière significative par le mouvement d'air entre ses interstices, et la surface réfléchissante par modification de l'albédo de la surface afin de ralentir les effets des rayonnements solaires.

Ce travail montre que la solution optimal pour la protection des masques en béton bitumineux contre les effets des hautes températures en été et les effets des cycles répétés de gel-dégel pendant l'hiver, est la couche en béton poreux à cause des avantages traduits par le refroidissement des différentes couches en béton bitumineux pendant l'été pour éviter les dommages par déformation permanente et de les réchauffer pendant l'hiver, pour protégé le masque contre les cycles répété de gel-dégel, afin d'éviter la fissuration thermique de ce dernier.

Pour chacune des solutions pratiques simulées, il existe une façon optimale de les employer, et que chacune possède à la fois des avantages et des inconvénients. En confrontant les solutions pratiques entre elles, différents points majeurs en ressortent. La solution de la surface réfléchissante est la moins performante des trois, mais la plus simple à mettre en œuvre, car elle ne nécessite pas de gros œuvres. Cependant, son effet est positif seulement dans la période d'été ou elle présente un refroidissement important par rapport aux autres solutions, par contre en hiver elle allonge les cycles de gel-dégel. Concernant les deux autres solutions pratiques, la couche convective en béton poreux permet d'obtenir un taux plus faible de cycles gel-dégel, à cause de l'influence de son épaisseur sur le réchauffement des différentes couches du masque en hiver et leurs refroidissement en été, mais le béton armé permet d'obtenir un maintien bien plus fort des cycles de gel-dégel en hiver, mais elle refroidie moins le béton bitumineux en été. Il est donc préférable d'utiliser une couche convective en béton poreux. La solution optimale devient donc l'utilisation d'une couche convective en béton poreux recouvrant toute la surface du masque.

Il est également indispensable de prendre en compte les aspects économiques, techniques et logistiques associés à la solution proposée, on peut aussi, procéder à une analyse de cycle de vie, afin de déterminer si cette solution est financièrement acceptable; par ailleurs, cette solution n'est pas forcément adaptée pour toutes les situations.

Suite à la réalisation de ce travail et aux éléments de discussion apportés dans le cadre de cette thèse, il est possible de formuler certaines recommandations quant aux suites à donner à ces travaux de recherche, les recommandations et les travaux futurs proposés sont les suivants :

- Augmentation du contenu de la base de données sur la mesure des températures dans les différentes couches des masques en béton bitumineux existant en Algérie ;
- Réalisation de projets de recherche davantage axés sur les gains pouvant être obtenus lors de l'application des méthodes de mitigation et sur leurs avantages coûts-bénéfices;

- Réalisation des analyses économiques détaillées sur les coûts associés aux différentes solutions pratiques ;
- Réalisation d'essais en vraie grandeur sur l'effet de l'augmentation des températures estivales et la diminution des températures hivernales (Fatigue thermique);
- Réaliser des essais de laboratoire conventionnels est une étape importante dans la poursuite des travaux pour la quantification des effets des changements climatiques sur les masques en béton bitumineux en Algérie (basses et hautes températures);
- Chercher d'autres types de matériaux qui protégeront plus le masque en béton bitumineux contre les effets du changement climatique ;
- Améliorer la modélisation et nécessairement passer par un modèle 3D, La convection dans le corps du barrage et l'évapotranspiration de la retenue pourraient être considérés.
- Utilisation d'autres modèles numériques ;

En fin, on peut dire que la solution optimale proposée à l'issue de toute l'étude à permis pour les deux sites étudiés barrage de Ghrib et barrage de Bouhnifia de faire réchauffer le masque en béton bitumineux en hiver et le refroidir en été. Cela signifie que grâce à cette solution optimale, le masque est protégé durant toute l'année, et permet donc d'éviter la détérioration du masque, ce qui était l'objectif principal à respecter. On peut donc considérer que de ce point de vue, cette étude a été concluante et a répondu aux exigences de départ.

Références bibliographiques :

- AbouFoul M.**, 2014. Effects of air void content on heat transfer properties of asphalt concrete for energy harvesting applications. Master of science in transportation engineering. Université Nottigham unied kingdom –China-Malizia.
- ANBT, ?**. Monographie des grands barrages (barrage de Bouhanifia).
- ANBT, ?**. Monographie des grands barrages (barrage de Ghrib).
- ANBT, ?**. Monographie des grands barrages (barrage de Sarno).
- Anonyme, ?**. Barrage en terre et en enrochement.
- Anthony C.**, 2006. Transferts de chaleur couplés rayonnement - conduction - convection Application `a des rideaux d'eau soumis `a une intense source Radiative. Thèse doctorat. Université Henri Poincaré - Nancy 1.
- Azizou A., Madani H.**, 2015. Contribution à l'étude climatique et bioclimatique du barrage Ghrib dans la wilaya d'Ain Defla, Mémoire Master, Université de Djillali Bounaama Khemis Miliana.
- Belbachir K., Montel B., Chervier L.**, 1973. Comportement des masques d'étanchéité en béton bitumineux des barrages du Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique Algérien, XIème ICOLD, Madrid. pp 891 -922.
- Bellouz D et Touati A.**, 2018. Etude climatique des vents de la région d'El Khemis en fonction de quelques paramètres météorologiques ; wilaya de Ain Defla , Mémoire Master, Université de Djillali Bounaama Khemis Miliana.
- Bitume Québec.**, 2008. Guide de bonnes pratiques. La mise en œuvre des enrobés, ISBN 978-2-923714-01-1.
- Bounaadja Z.**, 2009. Comportement mécanique du masque du barrage Bouhnifia (Algérie) en absence de la protection thermique. Mémoire de magister. Université de Badji Mokhtar Annaba.
- Bouvenot A.**, 1981. Transferts de chaleur, collection technologique, Masson, Paris.
- Cauchepin JL.**, 1995. Manuel pratique du génie climatique, Données fondamentales, Tome 1, PYC édition Livres, Fresnes.
- Cazzuffi D., Giroud J.P, Vachetti G., Scuero A.**, 2012. Cinquante ans de différentes applications des géomembranes dans les barrages. Revue des sciences des eaux et territoires n°8.
- CETE.**, 2010. Formation des laboratoires départementaux matériaux de chaussées. Essais de laboratoire contrôles de chantier.
- CETMEF.**, 2011. Conception des ouvrages en rivières et en canal. CETMEF.
- Chataigner Y.**, 2008. Modélisation du transfert thermique dans un remblai sur pergélisol et elaborations de stratégies pour faire face aux changements climatiques. Thèse de maître es sciences (M.Se.). Université de Laval, Québec.
- Chiblak M .**, 1989. Essais sur la stabilité du bitume dans des conditions chaudes, Thèse de Doctorat. Université technique Dryden, Allemagne.
- CIGB.,CAGB., ?**. Le barrage de Bouhanifia, Notice présentée par les entreprises Léon Chagnaud et S.E.C, édité par la diffusion du livre, Alger.

- Comité Français des Géo synthétiques.** 1991. Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géo membrane, Rueil-Malmaison. 325p.
- Ditter K., Haug W.,** 1989. Refurbishment of bituminous slope lining on dams and pumped-storage reservoirs. Asphalt-Wasserbau IIIa. Teil A Strabag, p. 43-48.
- Djemili L.,** 2006. Critères de choix de projet des barrages en terre étanchéité par le masque en béton bitumineux. Thèse de doctorat. Université de Batna.
- Estienne P., Godard A.,** 1998. Climatologie", Nouvelle Présentation, Armand Collin, Paris.
- Fadel I.,** 2005. Asphalt mixture-designing basics in dams sealing - designing of impermeable asphalt shell used in AL-Sorani Dam. Tishreen university journal for studies and scientific research- engineering sciences series Vol. **27** No 2, 200.
- Ghouilem K.,** 2014. Impact du fluage et de température sur les organes de lutte contre les infiltrations dans les barrages. Thèse de doctorat. Université de Mouloud Maameri, Tizi ouzzou.
- Glebov PD., Popchenko SN.,**1969. Use of asphaltic concrete facings in hydraulic engineering. Power Technol Eng (formerly hydrotechnical construction) Vol **3** No 8, 700-705.
- Greegan PJ., Monismith CL.,** 1996. Asphalt-concrete water barriers for embankment dams. New York City: American society of civil engineering.
- Guestal M.,** 2010. Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi chauffée partiellement. Mémoire de magister. Université de Constantine.
- Hamdani M.,** 2011. Etude et effet de l'orientation de deux pièces d'un Habitat en pierre situé à Ghardaïa. Mémoire de magister. Université Abou-bakr Belkaïd, Tlemcen.
- INCROPERA FP., DE WITT DP.,** 2002. Introduction to Heat Transfer, Fourth Edition, Wiley pp.817-843.
- Jannot Y.,** 2003. Thermique Solaire, CNRS.
- Jaromir R., Buchtovi J.,** 2005. The asphalt and geomembrane dam lining database and its use at the Dlouhe Strane dam rehabilitation. Technische Universitat Dresden. Wasserbaukolloquium-"Stauanlagen am Beginn des 21. Jahrhunderts" Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 29.
- Justo JL.,** 1991. Chapter 20: Asphaltic concrete face dams. Edition E. Maranha das Never. Advances in rockfill structures 611-650. Kluwer academic publishers.
- Kerkouche K., Cherfa F., Hadj Arab A.,** 2013. Evaluation de l'irradiation solaire globale sur une surface inclinée selon différents modèles pour le site de Bouzaréah. Revue des Energies Renouvelables. Vol **16** No 2, 269 - 284.
- Khoudrane I.,** 2014. Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques. Mémoire de Master, université d'Ouargla.
- Kreitmam M.,** 1959. "Variation journalière de la température dans le masque en béton bitumineux de barrage Ghrib", Rapport n° III du 2/9/59, Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics d'Algérie, pp 2 - 8.
- Lahmer K.,** 2015. Modélisation thermique du stockage d'hydrogène par absorption dans un réservoir d'hydrures. Thèse de doctorat. Université de Constantine.

- Lambert S.**, 1997. Les géomembranes. Ingénieries - E A T, IRSTEA édition 1997.
- Léger P., Venturelli J., Bhattacharjee S.S.**, 1993. Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams. Part 1: modeling. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 20 No 6, 999-1017. DOI: 10.1139/193-131.
- Legge G H H.**, 1970. Mulungushi and Mila Hills dams operation and maintenance. 16th Congo Large Dams, Montreal, 3:71-90.
- Livet J.**, 1996. Evaluation des bétons bitumineux drainants en termes d'exploitation hivernale d'un réseau routier Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées. 204 Juillet /Aout 1996 - RÉF. 4051 - PP. 15-23.
- Livet J., Roussel JJ.**, 1993. Comprendre le comportement hivernal des enrobés drainants. Guide pédagogique. Laboratoire central des ponts et chaussées. France.
- Lombardi L.**, 2005. Bitume info manager, construire et innover, numéro spécial édition.
- Maken D D0.**, 2012. Fissuration thermomécanique des barrages en béton soumis aux variations saisonnières de température en régions nordiques. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées (Génie Civil). Université de Montréal.
- Mauduit V., Mauduit C., Vulcano Greullet N., Coulon N., Hammoum F, Hamon D., Kerzreho JP., Piau JM., Chabot A.**, 2013. Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel : Analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire. BLPC - Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp 47-63. hal-00850949.
- Messaïd B.**, 2009. Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre. Thèse de doctorat. Université de Batna.
- Miloudi L.**, 2012. Etude et Simulation de la poursuite de la trajectoire du soleil par un panneau solaire. Mémoire de magister. Université de Boumerdas.
- Ott, J.C.**, 1955. Comportement du barrage de Bou-Hanifla durant la 1re décade d'exploitation. Bulletin technique de la Suisse romande, <http://dx.doi.org/10.5169/seals-61327>.
- Perrot O.**, 2011. Cours de rayonnement. Université de Saint-Omer Dunkerque, Lille.
- Pilate O.**, 2007. Evolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée ISSN: 1376 – 9359.
- Plaisant. A.**, 2013. Analyse numérique du comportement sismique d'un barrage en enrochement avec un noyau en béton bitumineux. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées en génie civil. Université de Montréal.
- Robert N., Hunter; Self A., Read J.**, 2003. The shell bitumen handbook. Sixth edition Shell Bitumen.
- Rolley R.**, 1977. Technique des barrages en aménagement rural, Ministère de l'agriculture française. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées (Génie civil). Université de Montréal.
- Rychen R.**, 2013. Impact du changement climatique sur les infrastructures routières – Analyse de risque et mesures d'adaptation. Thèse de doctorat. EPFL.
- Schonian E.**, 1990. The shell bitumen, hydraulic engineering habdbook. Edition shell bitumen.

- Sherard J L., Woodward R J., Gizienski S F., Clevenger WA.,** 1963. "Earth and Earth-Rock Dams". Wiley, N.Y.
- Synnefa A., Santamouris M., Livada I.,** 2006. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. Solar energy, Vol **80**, 968–981.
- Tadili R., Bargach M N.,** 2005 : Une méthode d'estimation du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée. Application aux sites marocains. La Météorologie Revue de l'atmosphère et du climat , No 50 , 46-50.
- Van Asback B.,** 1962. Le bitume dans les travaux hydrauliques. Edition Dunod Paris
- Wang W.,** 2008. Research on the suitability of asphalt concrete as water barrier in dams and dikes. Ph.D. University of Oslo, Oslo.
- Wang W., Hoeg,K.,** 2009. The asphalt core embankment dam – a very competitive alternative. Paper presented at the Modern Rockfill Dams, Chengdu, China.
- Wang W., Hoeg,K.,** 2011. Cyclic behavior of asphalt concrete used as impervious core in embankment dam. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. Vol **137**, Issue 5.
- Yahiaoui D.,** 2015. Impact des variations climatiques sur l'agriculture en Oranie. Mémoire de magister. Université d'Oran 1.
- Zinzi M., Fasano G.,** 2009. Properties and performance of advanced reflective paints to reduce the cooling loads in buildings and mitigate the heat island effect in urban areas. International journal of sustainable energy. Vol **28**, 123–139.

Références internet :

- www.eurovia.com/fr/liens-viraux-externes/le-bitume-histoire
- www.asphaltes.org/_img/Histoire_du_bitume
- [www.cea-coop.it/cataloghi.../CEA_SARTI_CATALOGO_ENG\).pdf](http://www.cea-coop.it/cataloghi.../CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).pdf)
- [http://www.soprema.fr/fr/article/dossier-thematique/l-etancheite-des-ouvrages-hydraulique.](http://www.soprema.fr/fr/article/dossier-thematique/l-etancheite-des-ouvrages-hydraulique)
- <http://www.coletanche.com/fr/references/hydraulique/canaux/canal-black-canyon-irrigation-district>
- <http://www.gramme.be/unite9/pmwikiOLD/pmwiki.php?n=PrGC0607.Etanch%E9it%E9DeLaTerre>
- [http://www.pdf-pro.blogspot.com/2014/09/les-barrage-types-de-barrages.html.](http://www.pdf-pro.blogspot.com/2014/09/les-barrage-types-de-barrages.html)
- <http://www.cfg.asso.fr/les-membres/presentation/activite/3>
- [www.cea-coop.it/cataloghi.../CEA_SARTI_CATALOGO_ENG\).pdf](http://www.cea-coop.it/cataloghi.../CEA_SARTI_CATALOGO_ENG).pdf)
- http://encyclopedie-afn.org/Barrage_-_Bouhanifia
- <http://popodoran.canalblog.com/archives/2015/06/12/32207930.html>
- <http://photos-kherrata-sahel.e-monsite.com/album/kherrata-le-lac/barrage-d-ighil-emma.html>
- <http://www.algermiliana.com/medias/images/84729769-o>
- www.monsite-a-oim.pagesperso-orange.fr/thai
- www.lmm.jussieu.fr/~lagree/COURS/ENSTA/C2cond.ENSTA
- www.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/Chap4
- www.docinsa.insa-lyon.fr/polycop/RPNE000028F
- www.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/Chap3

Références bibliographiques

<http://www.meridienne.org/index.php?page=coordonnees-horaires>)

www.cosmodixi.fr/lexique/c.php)

<http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire>)

http://septdeniersweb.free.fr/son%20histoire/berge_01.htm

Fluent user's guide, www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/main_pre.htm

Gambit user-s guide, www.sharcnet.ca/Software/Gambit/html/users_guide/ug01.htm

Production scientifiques

1. **Chebbah L; Djemili L; Kabour A.** Optimisation de la formule empirique la plus fiable pour la détermination de la température de la surface du masque en béton bitumineux. Cas du barrage Ghrib (Ain Defla , Algérie). 1^{er} Séminaire National : Eau et Environnement –SNEE 01– Mila Novembre 2016.
2. **Chebbah L; Djemili L; Chiblak M; Bouziane M T.** Comparison of the Thermal Behaviour of the Asphaltic Concrete Facing Protected by the Reflective Surface and Reinforced Concrete, Case of the Bouhnifia Dam, Northwest Algeria. *Arabian Journal For Science And Engineering*, (2020) 45:4013-4021.
3. **Chebbah L; Djemili L; Chiblak M; Bouziane M T.** Modélisation d'un Masque en béton bitumineux (brut et protégé) sous sollicitations thermiques en régime transitoire. cas du masque de barrage Ghrib (Ain Defla, Algérie). *La houille blanche*, 2020 ,1, 42-49.
4. **Chebbah L; Djemili L; Chiblak M; Bouziane M T.** Effect of the protective layer on the temperatures, in asphaltic concrete facing. Case of Bouhnifia dam, North-West Algeria. *International journal for hydrology*, 2020 (accepter)