



LUND UNIVERSITY

Toitures plates en Tunisie : études d'étanchéité et propositions d'améliorations

Aouididi, Abdessalem; Boström, Lars; Johansson, Bo; Johansson, Erik; Åstrand, Johnny

1989

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Aouididi, A., Boström, L., Johansson, B., Johansson, E., & Åstrand, J. (1989). *Toitures plates en Tunisie : études d'étanchéité et propositions d'améliorations*. (Report TVBM; Vol. 3041). Division of Building Materials, LTH, Lund University.

Total number of authors:

5

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

TOITURES PLATES EN TUNISIE

Etudes d'étanchéité et propositions d'améliorations

Abdessalem Aouididi

Bo Johansson

Johnny Åstrand

Lars Boström

Erik Johansson



Toitures plates en Tunisie

CODEN: LUTVDG/(TVBM-3041)/1-116/(1989)

RAPPORT TVBM-3041

Mots clés

- Présentation de différents types de toitures plates
- Examen des causes d'infiltration d'eau
- Revêtements d'étanchéité
- Protection du rayonnement ultra-violet
- Devis estimatif
- Capacité d'absorption des fissures
- Amélioration du revêtement d'étanchéité

Ce rapport a été publié avec la participation économique du BITS (Agence Suédoise pour la Coopération Technique et Economique Internationale) et de l'Université de Lund.

© 1989, Aouididi, A.; Boström, L.; Johansson, B.; Johansson, E.; Åstrand, J.

Ce rapport est publié par la Division Matériaux de Construction (Rapport TVBM-3041) et la Division Architecture 1 à l'Université de Lund, Suède, en collaboration avec le Laboratoire des Matériaux de Construction de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.

Traduction et contrôle texte: Franska Gruppen, Malmö, Suède.
Impression: KF-SIGMA, Lund, Suède, 1989.

ISBN 91-87014-01-7
ISSN 0348-7911

TOITURES PLATES EN TUNISIE

Etudes d'étanchéité et propositions d'améliorations

Abdessalem Aouididi *Ingénieur diplômé, génie civil*

Lars Boström *Ingénieur diplômé, génie civil*

Bo Johansson *Ingénieur, génie civil*

Erik Johansson *Ingénieur diplômé, génie civil*

Johnny Åstrand *Architecte SAR*

Division Matériaux de Construction
Université de Lund
Box 118
S-221 00 LUND
Suède

Division Architecture 1
Université de Lund
Box 118
S-221 00 LUND
Suède

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos plus vifs remerciements à toutes les personnes et organismes qui, à des degrés divers, nous ont apporté leur aide précieuse durant la réalisation de ce projet ainsi qu'à la rédaction de ce rapport. Et tout particulièrement:

- L'ASDEAR (Association pour le Développement et l'Animation Rurale), qui a contribué à rendre possible l'inventaire des toitures dans différentes régions de Tunisie,
- La SNIT (Société Nationale Immobilière de Tunisie), qui a contribué à rendre possible l'inventaire des maisons à Tunis,
- Monsieur Farhad Kalantari, qui a consacré beaucoup de temps à la réalisation et à l'analyse des résultats des essais du chapitre 3,
- Madame Britt Andersson, qui a dessiné les différentes figures du rapport,
- Monsieur Olof Peterson, qui nous a apporté son aide dans la rédaction de ce rapport et nous a toujours aidé de ses précieux conseils, tout au long de la réalisation du projet.

Sans oublier:

- Les membres du personnel de l'ambassade de Suède à Tunis, qui ont largement aidé à résoudre de nombreux détails pratiques se rapportant à notre travail en Tunisie.

Lund, septembre 1989

Les rédacteurs

PRÉFACE

La toiture occupe une place à part, très importante dans le bâtiment: outre ses propriétés techniques et sa résistance mécanique, elle doit aussi satisfaire l'esthétique et s'harmoniser avec le paysage, le site et les constructions environnantes; elle doit surtout présenter un ensemble de qualités pour protéger la construction contre les intempéries et lui assurer une étanchéité efficace et durable. C'est pour cela qu'en Europe on a pris l'habitude depuis l'antiquité à porter un soin particulier à la couverture; un véritable art de la couverture s'est même développé avec des artisans couvreurs capables de mettre en œuvre dans les règles de l'art n'importe quel matériau couvrant, depuis les plus traditionnels - ardoise, tuiles, zinc, amiante-ciment - jusqu'aux plus récents - bacs acier, bacs inox, bacs aluminium et toutes les variétés de plaques en matières plastiques - tout en respectant les traditions régionales, les exigences esthétiques ou des raisons historiques.

En Tunisie la situation est beaucoup moins bonne; on rencontre deux types de toitures:

- Les toitures traditionnelles, semi-cylindriques ou semi-sphériques.

Réalisées généralement avec des briques creuses, ces toitures sont peu coûteuses et nécessitent peu d'entretien; leur forme minimise l'exposition au soleil; elle facilite l'écoulement des eaux de précipitation et la circulation de l'air ce qui améliore ses qualités thermiques. Malheureusement ce type de toiture est en voie de disparition parce qu'il n'est plus à la mode et parce que sa réalisation exige une main-d'œuvre très spécialisée, aujourd'hui très rare.

- Les toitures plates.

Elles se composent principalement d'une dalle pleine ou avec des corps creux, généralement en terre cuite, appelés hourdis - qui est couverte de

deux ou plusieurs couches de mortier battu afin d'en assurer l'étanchéité. Ce type de toiture est soumis à des sollicitations importantes et diverses: mécaniquement le toit, utilisé très souvent comme terrasse, doit supporter des activités nombreuses, menées par plusieurs personnes; les conditions climatiques rigoureuses - températures très élevées en été, puis violentes en saison humide, écart de température entre le jour et la nuit souvent très important... - induisent des retraits, des gonflements et des déformations diverses qui provoquent l'apparition de micro-fissures et des fissures.

De plus, et surtout dans le cas de l'habitat populaire, ces toitures ne sont pas réalisées par des artisans spécialisés mais par des simple tache-rons, toujours pressés et donc imprécis et souvent ignorants des techniques tant anciennes que modernes et des produits d'étanchéité nouveaux et éffi-caces. Il est inévitable dans ces conditions que ces toitures plates soient le siège d'une pathologie aussi complexe qu'accélérée qui les rend inaptes à protéger l'édifice contre les infiltrations d'eau.

* * *

Les toitures plates posent donc des problèmes délicats. Il est normal qu'elles soient une préoccupation centrale pour tous ceux qui s'intéressent à l'habitat en Tunisie: c'est le cas de la Division Matériaux de Construction à l'Université de Lund - Suède - et du Laboratoire des Matériaux de Con-struction de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis - Tunisie. Ces deux in-stitutions ont entamé dès 1982, une collaboration fructueuse dans les domaines de la terre stabilisée et de la construction en terre; en 1987 a de-marré un nouveau projet commun relatif aux problèmes d'infiltration d'eau à travers les toitures.

Ce travail a nécessité à son début, la réalisation laborieuse, par suite de la rareté, sinon de l'inexistence de toute référence et de toute documenta-tion, d'un inventaire certes incomplet, mais aussi large que possible des types et des conceptions de toitures ainsi que des méthodes de mise en œuvre des matériaux utilisés. Cette partie est en elle même d'un très grand intérêt car elle constitue en quelque sorte une bonne bibliographie et l'unique présentation technique des toitures en Tunisie.

Le projet se continue ensuite par la mise au point de méthodes d'études et de mesures des infiltrations à travers différents types de toitures.

L'analyse des méthodes d'études et des résultats obtenus jointe à l'étude économique de l'application des solutions proposées terminent le projet.

* * *

Pour conclure, je voudrais saluer cette fructueuse collaboration entre l'Université de Lund et l'ENIT et je souhaite qu'elle se prolonge par de nouveaux projets aussi intéressants et utiles que les précédents; je voudrais d'autre part remercier Mrs Åstrand, J. et Johansson, E. pour leur efforts et féliciter Mrs Aouididi, A., Boström, L. et Kalantari, F. pour leur sérieux et leur efficacité.

Professeur Mohamed Tahar Chaïeb
Directeur du Profil Génie Civil - ENIT

CONTENU

REMERCIEMENTS	4
PREFACE	5
CONTENU	9
RESUME	13
1 INTRODUCTION	15
1.1 Historique du projet	15
1.2 Toiture plate, étanchéité et climat	17
1.3 Le projet	19
2 INVENTAIRE	21
2.1 Introduction	21
2.2 Tableau descriptif	22
2.3 Présentation des logements	26
2.3.1 Logements ruraux	26
2.3.1.1 Logements ruraux construits en auto-construction	26
2.3.1.2 Logements ruraux construits par des entrepreneurs	27
2.3.1.3 Logements ruraux privés	29
2.3.2 Logements urbains	30
2.3.2.1 Toiture type III	30
2.3.2.2 Toiture type IV	31
2.3.2.3 Toiture type V	32
2.4 Analyse de l'inventaire	33
2.4.1 Problèmes de toits en milieu rural	33
2.4.2 Problèmes de toits en milieu urbain (Tunis)	35
2.4.3 Contrôle des matériaux de l'inventaire	36
2.4.4 "Déballage d'idées" (Brainstorming)	37

2.5	Recherche bibliographique	38
2.5.1	Etude à base de données	38
2.5.2	Bibliographie particulièrement utilisée	41
3	ESSAIS D'ETANCHEITE	45
3.1	Développement de la technique opératoire	45
3.1.1	Différentes méthodes d'essai	45
3.1.2	Technique opératoire	47
3.2	Essai de revêtement étanche	50
3.2.1	Projet de revêtement étanche	50
3.2.2	Essai de revêtement étanche	53
3.2.2.1	Les premiers essais	53
3.2.2.2	Les essais suivants	56
3.3	Résultat des essais	56
3.3.1	Résultat des essais à LNTH	57
3.3.2	Résultat de l'essai no 1 à l'ENIT	61
3.3.3	Résultat de l'essai no 2 à l'ENIT	65
3.4	Analyse de la technique opératoire	68
3.4.1	Forme des courbes de résultat	68
3.4.2	Amélioration de la méthode	68
3.4.3	Calcul de la constant de diffusion	70
3.5	Devis estimatif des trois revêtements d'étanchéité	71
3.6	Analyse des essais d'étanchéité	73
4	ESSAIS DE DILATATION	75
4.1	Développement de la technique opératoire	75
4.1.1	Choix d'une méthode d'essai	76
4.1.2	Description de la méthode d'essais	77
4.2	Essais avec des couches étanches différents	80
4.2.1	Essais no 1	83
4.2.2	Essais no 2	85
4.2.3	Essais no 3	86
4.2.4	Essais no 4	87
4.3	Compte-rendu des résultats	88
4.4	Analyse des essais de fissuration	89

5	CONCLUSIONS	91
5.1	Conclusions partielles	91
5.1.1	Causes des infiltrations d'eau à travers les toitures	91
5.1.2	Expériences issues de différents revêtements	92
5.1.3	Appréciation sur les trois couches de protection proposés	93
5.2	Résumé	94
5.3	La suite des travaux	95
6	REFERENCES	97

PIECES ANNEXES

ANNEXE A	Le séminaire "Ciments et Bétons"; le programme du séminaire et lesi résumés des communications du séminaire.
ANNEXE B	Compte-rendus des essais d'étanchéité et des essais de dilatation.
ANNEXE C	Devis estimatif des trois propositions; coûts des matériaux, coûts de la main-d'œuvre et liste des prix des matériaux.

RÉSUMÉ

Ce rapport est le résultat de deux années de travaux de recherche tuniso-suédois menés en coopération par l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, l'ENIT, et Tekniska och Naturvetenskapliga Högskolan vid Lunds Universitet, LNTH (l'Ecole Supérieure des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund). Ils se sont étendus sur une période allant de juillet 1987 à juin 1989 et ont eu pour objectif d'étudier les infiltrations d'eau à travers les toitures plates en Tunisie. L'objectif a été de trouver une solution technique pour améliorer l'étanchéité.

Les travaux de ce projet ont débuté par l'inventaire de 50 maisons tunisiennes dans différentes régions du pays, tant en milieu urbain qu'en milieu rural. L'examen de ces maisons a montré que les infiltrations à travers les toitures sont dûes à la mauvaise qualité des revêtements ainsi qu'à l'apparition de fissures dans l'élément porteur. Ces dernières sont difficilement évitables.

Vu l'acuité du problème de ces infiltrations, nos travaux se sont orientés vers la recherche d'une solution sous la forme d'une couche étanche résistante à placer par-dessus l'élément porteur. Nous avons testé trois propositions de revêtement étanche. La plus naturelle consistant à utiliser une forme quelconque de produit bitumineux comme couche d'étanchéité.

Nous avons examiné du bitume distillé et oxydé ainsi que de l'émulsion bitumineuse. La couche constituée par ces matériaux ont été tour à tour testés quant à leur capacité étanche et une estimation des coûts a été réalisée pour savoir à combien reviendrait l'application de la couche étanche sur le toit. Lors des essais en laboratoire, des travaux pratiques ont été effectués avec les trois matériaux.

L'émulsion bitumineuse s'est avérée être le plus intéressant des trois matériaux. Des tests ont été effectués avec différents types de ce produit pour examiner sa capacité d'absorption des fissures. Nous avons ensuite

examiné les méthodes pouvant améliorer la capacité de recouvrement des fissures.

La capacité d'un revêtement bitumineux à suivre les mouvements du support diminue en cas d'exposition au rayonnement solaire et il est difficile également de marcher dessus. C'est pourquoi nous avons examiné différentes propositions de protection par-dessus la couche d'étanchéité. Nous en avons proposé et fabriqué trois types et nous en avons tiré certaines conclusions. Puis nous avons procédé à une comparaison des coûts entre les trois propositions.

A partir de ces essais, nous avons choisi la meilleure couche de protection et la meilleure couche d'étanchéité, dans la perspective d'éventuels essais sur une échelle réelle. Notre choix a été guidé par la qualité, les coûts et la maniabilité.

* * *

Dans la perspective d'un élargissement des contacts entre les deux partenaires, un séminaire sur le thème "Ciments et bétons" s'est tenu à l'ENIT, à mi-parcours de ce projet. Des chercheurs éminents ont été invités à cette rencontre où ils ont pris la parole.

1. INTRODUCTION

1.1 Historique du projet

En 1982 les "Journées d'études sur les matériaux locaux de construction en Tunisie" ont été organisées conjointement par l'Ambassade de Suède et l'ASDEAR, Association pour le Développement et l'Animation Rurale. L'ASDEAR est une association à but non lucratif qui travaille pour l'amélioration de la situation socio-économique dans le milieu rural. Elle collabore avec une association suédoise, la SADEL, Swedish Association for Development of Low-cost Housing. Cette association à but non lucratif travaille pour l'intégration de l'autoconstruction dans la campagne tunisienne sous forme d'animation et de gestion des activités d'autoconstruction. L'ASDEAR et la SADEL ont réalisé un projet expérimental d'autoconstruction de logements ruraux dans le gouvernorat de Siliana [1]. L'organisation des "Journées d'études..." était basée sur ce projet d'autoconstruction.

Les journées d'études ont consisté en une série de communications avec la participation de l'ENIT, l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, l'ENSET, l'Ecole Nationale Supérieure d'Enseignement Technique et de l'ITAAUT, Institut de Technologie, d'Art, d'Architecture et d'Urbanisme de Tunisie. Ainsi il a été présenté l'ensemble des résultats des recherches obtenus dans le laboratoire de Génie Civil de l'ENIT sur les briques en terre, le tuf en tant que liant et l'argile expansée. Il a été souligné que les matériaux doivent être aptes et bon marché. L'aptitude doit être vérifiée par des essais de résistance à la compression et aux intempéries et en plus il faut évaluer les divers aspects du matériau, notamment son intégration architecturale et son comportement dans le temps. Simultanément il faut étudier le coût de revient du produit pour rendre la commercialisation possible.

Le but des journées d'études était, d'une part, de discuter les problèmes et les possibilités en général, concernant l'utilisation des matériaux locaux dans la construction, et d'autre part de présenter et critiquer un projet de recherche réalisé par LNTH, l'Ecole Supérieure des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède. Ce projet comprend une étude, y compris recherches de laboratoire, d'un sol d'origine tunisien (torba) et le développement des techniques pour sa mise en œuvre comme matériau de construction [2]. L'étude a été réalisée comme une suite de la collaboration entre l'ASDEAR et la SADEL, tout d'abord pour traiter les questions suivantes:

- Quelle est la résistance au vieillissement du BTS (béton de terre stabilisée)?
- Comment peut-on éviter l'infiltration d'eau à travers un toit en BTS?

Il a été constaté que "La torba stabilisée au ciment (BTS) possède les propriétés de résistance au vieillissement qui sont requises pour pouvoir endurer les conditions climatiques en Tunisie. Ses propriétés de résistance rendent le BTS propre à être utilisé dans la plupart des maçonneries d'une maison d'habitation" [2].

Les résultats de l'étude concernant l'infiltration d'eau à travers un toit en BTS, n'étaient pas aussi favorables. "On ne peut pas éviter l'infiltration d'humidité à travers le toit sans faire appel à un matériau étanche. En traitant la surface enduite sur la construction en BTS avec une couche d'asphalte fluidifiée (émulsion) on ne peut pas espérer obtenir une étanchéité durable, compte tenu de l'action du climat et des passages humains.

Par contre, en intégrant le bitume fluidifié dans la composition de l'enduit ou en protégeant la couche d'asphalte par une autre matière quelconque, on peut compter sur une étanchéité qui tient. De toute manière, des études complémentaires seront nécessaires pour parvenir à 'une solution satisfaisante' " [2].

Les journées d'études sur les matériaux locaux ont montré que l'ENIT et LNTH ont acquis des expériences similaires dans les domaines de recherche et de méthodes de recherche. Il a été ainsi indiqué que le futur thème à étudier devrait être l'étanchéité des toitures plates.

Les contacts entre l'ENIT et LNTH ont été approfondis par un échange scientifique informel. Cette coopération a été poursuivie grâce à la colla-

boration entre l'ASDEAR et la SADEL. L'ASDEAR a joué un rôle important pour le développement du contact entre les deux institutions.

Il a été constaté, que les cas d'infiltration d'eau à travers des toitures sont courant pour tous les types de toitures plates. Cette infiltration n'est pas seulement mauvaise pour la construction et en conséquence pour la longévité de la maison mais aussi mauvaise pour l'hygiène et la santé. Vu les circonstances, il a été entendu d'établir une collaboration formelle entre l'ENIT et LNTH pour étudier ce problème. Un accord de coopération a été conclu concernant "Un projet de recherche se rapportant à l'étude des infiltrations d'eau à travers des toitures en Tunisie, 1987-89".

Le premier but de ce projet est de pouvoir éviter le problème des infiltrations d'eau à travers les toitures par des mesures à bas coût et aussi contribuer à l'utilisation des matériaux locaux, évitant ainsi l'importation et le transport. L'ENIT pourra avoir des possibilités nécessaires de recherche en laboratoire et sur le terrain. Le deuxième but de l'ENIT et de LNTH est un élargissement de la base de leurs connaissances dans les domaines de la recherche et de la construction en général dans les conditions actuelle en Tunisie. Le réalisation de ce projet a été possible grâce a un financement par la BITS, Agence Suédoise pour la Coopération Technique et Economique Internationale, et la participation aussi bien humaine qu'économique de l'ENIT et de LNTH.

1.2 Toiture plate, étanchéité et climat

Presque toutes les toitures des maisons individuelles en Tunisie sont plates comme dans les autres pays méditerranéens. La fonction des toitures dans l'Europe du Nord est limitée à la protection contre les effets du climat, tandis que les toitures dans les pays de la Méditerranée sont aussi très souvent utilisées par les habitants. Pendant l'été on dort souvent sur la toiture. Le séchage des légumes et des plantes pour la préparation de la nourriture se fait sur la toiture. La préparation de la laine et des fibres végétales pour l'utilisation artisanale est un exemple d'autres activités sur la toiture. Ces activités nécessitent des toitures horizontales et suffisamment solides pour pouvoir porter le poids des gens, des équipements, etc. Cette horizontalité

ou l'inclinaison est très faible, est naturellement mauvaise pour l'écoulement des eaux.

La construction et le matériau de la toiture ont également une influence sur le climat intérieur des bâtiments. Des mesures effectuées sur le terrain et simulées sur ordinateur par LNTH en collaboration avec le CNERIB, Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (Algérie), ont démontré qu'on obtient, en région désertique, un climat intérieur plus agréable en réalisant une isolation thermique de la toiture [18]. Compte tenu de ces données, il serait souhaitable de développer dans le Sud tunisien, où le climat intérieur constitue souvent un problème dans les logements modernes avec toits en béton, des toitures avec isolation thermique. Ce travail n'a pas été repris dans le compte-rendu de ce projet-ci, qui ne traite que de l'étanchéité, mais doit être pris en charge par des études ultérieures.

Dans la fin du siècle dernier, les toitures plates ont été construites comme des voûtins très bas en briques creuses d'une largeur de 60-70 cm entre poutrelles en fer. Pour avoir un durcissement rapide on a utilisé un mortier de plâtre. Une surface supérieure plate a été créée avec une couche de terre ou des résidus de briques ou des pierres, en formant une pente vers l'endroit de descente des eaux pluviales. Cette couche a été compactée en versant de l'eau et puis un mortier riche en chaux de 3-5 cm d'épaisseur a été mis en œuvre. Cette surface a été compactée également et ensuite travaillé à la truelle pour obtenir une surface lisse. Le mortier de chaux a donné une assez bonne étanchéité, surtout si l'entretien a été fait régulièrement par le badigeonnage de chaux grasse.

Aujourd'hui les toitures plates sont normalement construites avec une structure en béton. Les toitures des maisons les plus simples sont construites entièrement en béton comme dalle pleine. Par contre, les maisons d'un standard plus élevé sont construites en utilisant des corps creux en terre cuite, ou en béton. Récemment il a été introduit un système de pré-fabrication avec des poutrelles en béton précontraint et des entrevous, ce qui permet d'éviter le coffrage. Le béton est coulé au dessus d'une épaisseur de 3-6 cm avec du ferailage quadrillé. Sur le béton la forme de pente est créée par un béton maigre souvent mélangé avec des résidus de briques. La pente doit être de 2-3 cm par mètre vers la descente de l'eau. Pour ces types de toitures, il existe des différentes solutions d'étanchéité.

Pour la catégorie de maisons les plus simples, le badigeonnage est utilisé comme seule étanchéité si le béton n'a pas été laissé sans traitement. Dans le meilleur cas, le badigeonnage se fait au printemps et à l'automne. En plus, ce blanchissement réduit l'absorption du rayonnement solaire, un effet désirable en été [18]. La chaux s'infiltré dans les micro-fissures mais elle ne donne pas une étanchéité suffisante, surtout si l'entretien n'est pas régulier et de bonne qualité. Sûrement, ce type d'étanchéité existe sur la majorité des toitures, surtout à la campagne chez les gens aux ressources faibles.

Depuis longtemps, une autre méthode a été utilisée pour des immeubles et des villas. L'étanchéité a été créée par une couche (0,5-2 cm) d'asphalte pure et 1-1,5 cm d'asphalte sablé ou bien une multicouche. La multicouche se compose de plusieurs couches du feutre bitumé collé l'une sur l'autre par l'asphalte. L'étanchéité a été protégée contre les dégâts et le rayonnement solaire par du sable ou du gravier. Dans le cas où les toitures sont utilisées par les habitants, il a été mis des dalles en béton sur un lit de sable. Actuellement ces deux types d'étanchéité ont été remplacées par un tapis en caoutchouc fabriqué en Tunisie. Le tapis est mis sur le béton imprégné d'une émulsion de bitume froid et collé sur place par le bitume. Les joints sont soudés à l'air chaud. Très souvent, le tapis est protégé contre le rayonnement ultraviolet, dangereux pour le caoutchouc, par une peinture d'aluminium mais il existe d'autres solutions plus durables. Ce type d'étanchéité est caractérisé par une technique assez compliquée, un prix élevé, mais une longévité satisfaisante, si la protection contre le rayonnement ultraviolet persiste.

1.3 Le projet

Le but global du projet actuel de recherche a été de chercher des solutions techniques pour obtenir une bonne étanchéité à un coût limité. Il a été clair, dès le début du projet, qu'il faut prévoir que la toiture plate sera utilisée par les habitants, même dans le futur. Il n'est pas réaliste de proposer d'autres types de toitures remplaçant les toitures plates vu les habitudes et

les traditions de se servir des toitures. Il faut aussi tenir compte qu'il existe un grand nombre de toitures qui sont à améliorer.

La recherche a été concentrée à étudier la couche d'étanchéité pour arriver à un résultat concret dans un espace de temps limité. Il a été considéré que cette couche est l'élément le plus important. Egalement, il a été décidé de chercher une méthode qui peut être appliquée aux nouvelles maisons aussi bien qu'aux maisons déjà existantes. Naturellement, la toiture entière joue un rôle pour l'étanchéité aussi bien que le reste de la structure de la maison, surtout pour la fissuration. Ces effets restent à étudier.

Dans le chapitre 2. *Inventaire*, il est présenté la première phase du projet. Il est réalisé un inventaire sur place des maisons existantes pour identifier les problèmes d'étanchéité des différentes catégories de maisons. Il est présenté l'analyse de l'inventaire, y compris les conclusions pour la suite du projet. A la fin un inventaire de la littérature a été effectué afin d'analyser les connaissances existantes dans la domaine des toitures, d'étanchéité et de technique de mesure pour la recherche.

Dans le chapitre 3. *Essais d'étanchéité*, il est présenté la technique d'essai d'étanchéité en laboratoire qui a été développée dans le projet. Egalement le résultat des essais des différents revêtements d'étanchéité sont présentés et analysés. En plus, ont été calculés les coûts des revêtements d'étanchéité étudiés.

Dans le chapitre 4. *Essais de dilatation*, il est présenté la technique d'essai pour examiner, en premier lieu, la faculté d'absorption des fissures de la couche d'étanchéité. Le résultat des essais avec des couches étanches différentes est également présenté et analysé.

Au chapitre 5. *Conclusions*, sont présentés un résumé des causes des infiltrations d'eau, les enseignements retirés des expériences avec différents types de couches d'étanchéité, ainsi que les propositions de mesures destinées à améliorer l'étanchéité des toitures plates.

Au chapitre 6. *Références*, sont présentés la bibliographie et les ouvrages de référence utilisés dans le cadre de ce projet.

2. INVENTAIRE

2.1 Introduction

En Tunisie, la construction des logements est caractérisée par une diversité dans l'aspect architectural, l'utilisation des matériaux de construction, l'aménagement intérieur et les types de toitures (forme et constitution).

A l'exception des constructions avec des toitures inclinées, qu'on trouve dans le nord-ouest du pays ou celles en coupôles rencontrées surtout dans le Cap Bon et le Sahel (en général ce sont des constructions très anciennes), la majorité des constructions est couverte par des toitures plates.

Vu le climat froid, très humide et caractérisé par des pluies torrentielles pendant l'hiver et sec et très chaud l'été, les constructions et surtout leurs enveloppes externes subissent des cycles de chaleur puis de froid ou d'humidification puis de séchage qui pouvaient les endommager par manque d'éléments assez résistants, imperméables et durables (on rencontre des anomalies tels que de l'humidité dans les locaux surtout dans les plafonds, des infiltrations des eaux à travers les toitures et des fissures). Pour bien se familiariser avec les problèmes et les anomalies concernant les toitures plates, nous avons fait un inventaire.

L'inventaire a été réalisé sur un ensemble de logements ruraux dans quatre villages à la délégation de Rouhia, un village appelée Ain Sodgha dans la délégation de Bargou tous au gouvernorat de Siliana et ainsi que des logements urbains dans la cité populaire d'Ibn Khaldoun dans la banlieue Nord de Tunis. Il comporte un interview sur le type de logement, en mentionnant l'année de la construction, l'année de l'utilisation, le mode d'acquisition et d'autres informations générales puis des précisions concernant les précipitations, l'emplacement et la durée des taches d'humidité, de l'infiltration des eaux etc...

Nous avons fait des relevés des plans des logements en précisant les pentes des toitures, l'emplacement de l'évacuation des eaux et nous avons noté toutes nos observations et remarques et en plus nous avons les documentés par des photos.

2.2 Tableau descriptif

Les types de toitures I-V décrits ci-dessous renvoient au tableau 2.1 de la page 25.

I. Toiture en poutrelles et blocs de BTS: formée par des poutrelles préfabriquées en béton armé sur lesquelles s'appuient des blocs de BTS, voir fig. 2.1. Elle est constituée essentiellement par (du haut vers le bas):

- de la chaux à blanchir;
- une forme de pente en BTS (90% torba, 10% ciment) (50 mm - 100 mm);
- une couche de lait de chaux et de ciment;
- des blocs en BTS (300 mm × 150 mm × 100 mm) reposant, en forme d'arc, sur des poutrelles en béton armé;
- enduit intérieur, mortier batard (chaux/ciment) (10-30 mm).

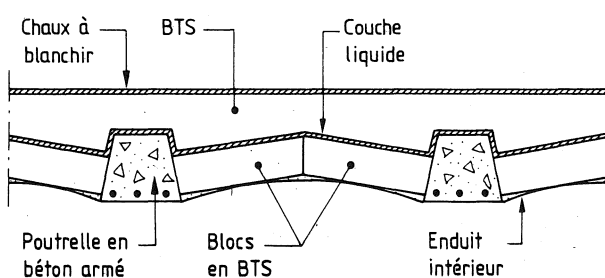


Fig. 2.1. Toiture type I.

II. Toiture formée par un plancher en dalle pleine (voir fig. 2.2) et constituée par:

- de la chaux à blanchir;
- une forme de pente (30 mm + 30 mm/m);
- une dalle pleine en béton armé de 120 mm (ciment 350 kg/m³);
- enduit intérieur (20 mm).

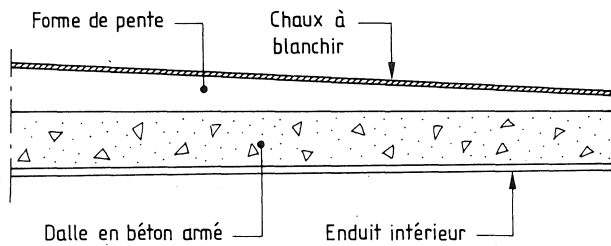


Fig. 2.2. Toiture type II.

III. Toiture formée par un plancher en dalle à corps creux (voir fig. 2.3) et constituée par:

- mortier batard (20 mm);
- une couche de feutre bitumé appliquée comme étanchéité;
- une forme de pente (30 mm + 30 mm/m);
- une dalle en béton armé avec des corps creux (hourdis) (200 mm);
- enduit intérieur (20 mm).

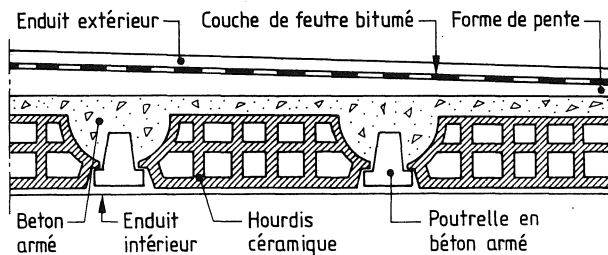


Fig. 2.3. Toiture type III.

- IV. La toiture est sous forme de plancher à corps creux avec, sur la forme de pente, des dalles en béton (500 mm × 500 mm × 70 mm) reliées par du Flintkote, voir fig. 2.4.

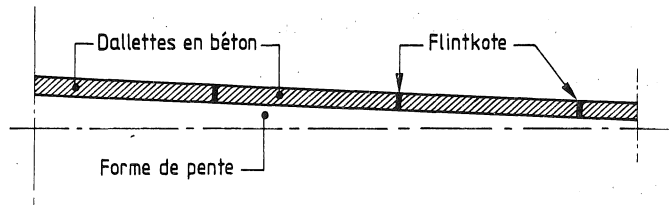


Fig. 2.4. Toiture type IV.

- V. La toiture est en plancher à corps creux (200 mm) avec une couche d'étanchéité en Derbigum avec protection en aluminium, voir fig. 2.5.

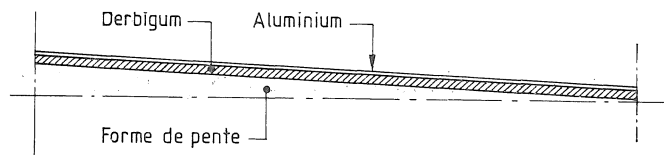


Fig. 2.5. Toiture type V.

Type de logement et emplacement	Nombre	Année de constr.	Type de toiture	Problèmes rencontrés	Réparations éventuelles
Auto-construction, <i>Ouled Zina</i> (délégation de Rouhia)	5	1984	I	- Humidité et fissures partout, surtout entre les poutrelles et blocs en BTS*, toiture très endommagée; - Décollement du mortier de la toiture et de l'acrotère.	- Mortier de ciment.
Auto-construction, <i>Ouled Khadhra</i> (délég. de Rouhia)	3	1985	I	- Mêmes remarques que précédemment, surtout entre les blocs en BTS* en arc.	- Mortier de ciment.
Développement rural, <i>Zgaag</i> (délég. de Rouhia)	7	1978	II	- Taches d'humidité au plafond; - Fissures et décollement du mortier au niveau de l'évacuation des eaux pluviales.	- Pas de réparations.
Développement rural, <i>Cité Ettahrir</i> (délég. de Rouhia)	5	1978	II	- Humidité à la jonction entre murs et plafond; - Décollement de l'enduit intérieur.	- Mortier batard; - Peinture au lait de chaux.
Ruraux privés, <i>Ain Sodgha</i> (délégation de Bargou)	10	1975	II	- Taches d'humidité, sur toute la toiture, apparues après trois ans; - Fissures parfois profondes et fuites d'eau lors des pluies violentes;	- Pas d'entretien.
Urbains construits par la SNIT**, <i>Cité Ibn Khaldoun</i>	10	1973	III	- Des bandes de taches noires suivant les nervures et entre les murs et le plafond; - Fissures et champignons sur la toiture.	- Mortier batard sur toute la toiture.
Urbains construits par la SNIT**, <i>Cité Ibn Khaldoun</i>	5	1975	IV	- Taches d'humidité aux joints entre murs et plafond; - Mauvaise application du Flintkote; - Fissures aux alentours de l'évacuation des eaux pluviales.	
Urbains construits par la SNIT**, <i>Cité El Intilaka</i>	5	1984	V	- De légères taches d'humidité; - Mauvaise application du Derbigum (joints et au niveau de l'acrotère); - Décollement de la protection de l'étanchéité.	

*) BTS: Béton de terre stabilisée ou la torba (terre locale) stabilisée au ciment.

**) SNIT: Société Nationale Immobilière de Tunisie; principal promoteur, étatique, dans le domaine de l'habitat.

Tableau 2.1. Description des logements.

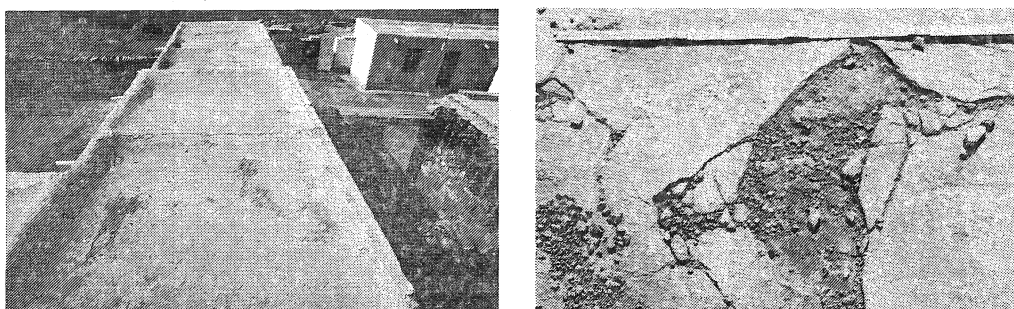
2.3 Présentation des logements

L'inventaire a porté sur une trentaine de logements ruraux, dans le gouvernorat de Siliana dans la partie centrale de la Tunisie et une vingtaine de logements urbains dans la banlieue Nord de la ville de Tunis.

2.3.1 Logements ruraux

L'ensemble des logements ruraux visités et cités dans l'inventaire représentent pratiquement toutes les catégories de constructions rurales; nous remarquons les logements isolés dans des terrains agricoles cultivables ayant un aspect fonctionnel s'adaptant au mode de vie et des habitations groupées pour former des petites agglomérations.

2.3.1.1 Logements ruraux construits en auto-construction



(a)

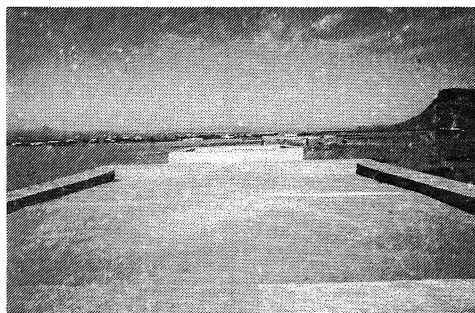
(b)

Fig. 2.6. Toitures type I, Ouled Zina (a). Décollement de l'enduit extérieur (b).

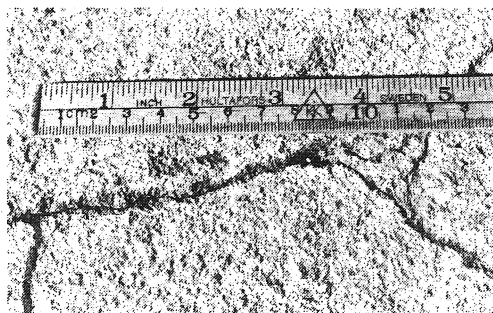
Les deux groupes de logements réalisés, par l'ASDEAR et la SADEL citées ci-avant, dans un projet expérimental d'autoconstruction sont Ouled Zina et Ouled Khadhra. Situés à quelques kilomètres de la délégation de Rouhia, ces toitures sont construits presque en totalité par des blocs de BTS. Les observations nous ont convaincu que ces blocs absorbent de l'humidité et foisonnent ce qui nécessite leur protection contre les agressions extérieures et surtout des intempéries. Au niveau de la toiture, le problème est plus sérieux puisque nous rencontrons de l'humidité, de l'infiltration

des eaux et des fissurations ce qui rend indispensable la couche d'étanchéité (ces problèmes sont dûs en partie à la mauvaise mise en œuvre...).

2.3.1.2 Logements ruraux construits par des entrepreneurs



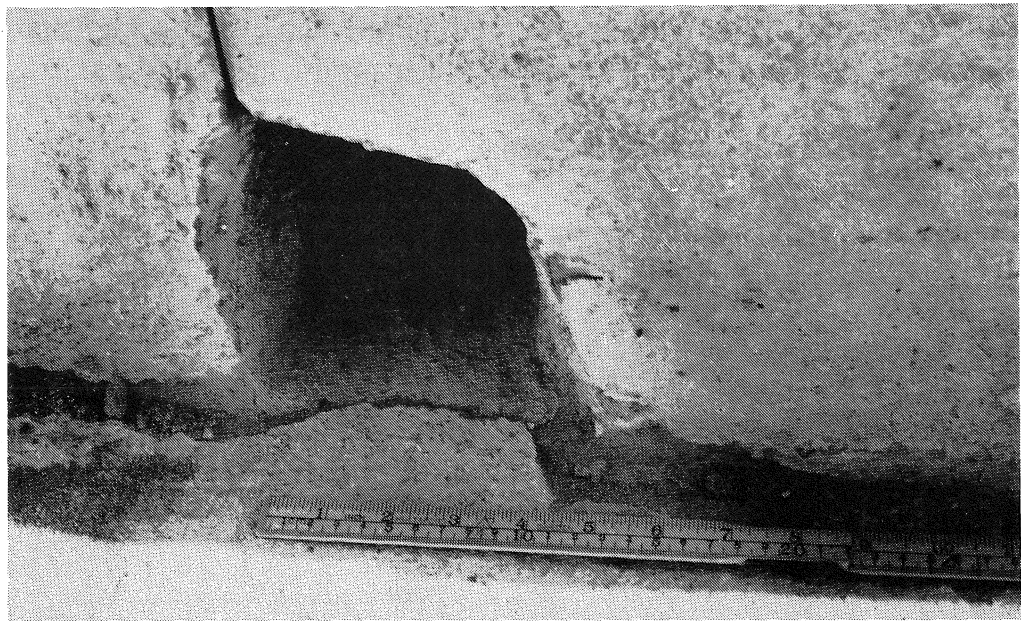
(a)



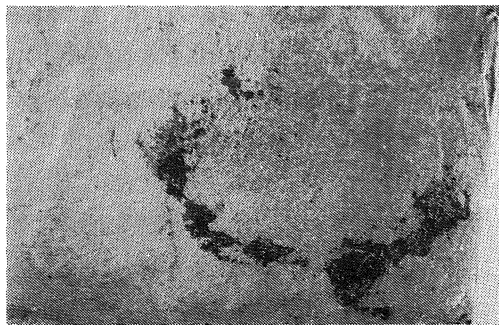
(b)

Fig. 2.7. Toiture type II, Zgaag (a). Fissures sur la toiture (b).

Les deux groupements de logements sont construits avec des prêts et des subventions de l'état tunisien dans le but de promouvoir les zones rurales. Ils sont construits par des petits entrepreneurs ou tacherons de la région. Outre la qualité de la toiture, nous remarquons dans presque tous les logements ruraux des tassements différentiels de la fondation qui causent des grandes fissures dans les murs et dans les joints entre les murs et la toiture. Ceci est dû à la mauvaise qualité de la fondation et son exécution sans connaissance au préalable de la nature du sol. D'autres problèmes liés au manque de qualification de la main-d'œuvre - et c'est général pour toutes les constructions rurales ou urbaines - sont la finition des habitations (second œuvre), l'exécution de la dalle du béton armé pendant la saison chaude sans prévoir de protection ce qui provoque l'évaporation d'une partie de l'eau du béton et le rend trop poreux et la mauvaise application des différentes couches de la toiture. Les logements visités pour cet inventaire sont situés comme suit:



(a)



(b)



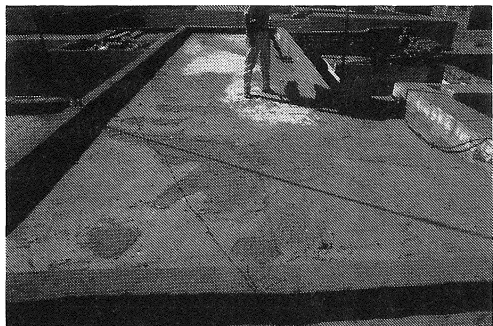
(c)

Fig. 2.8. Zgaag. Fissures entre les joints, entre le mur et la toiture (a). Taches d'humidité (b) et décollement de l'enduit intérieur (c).

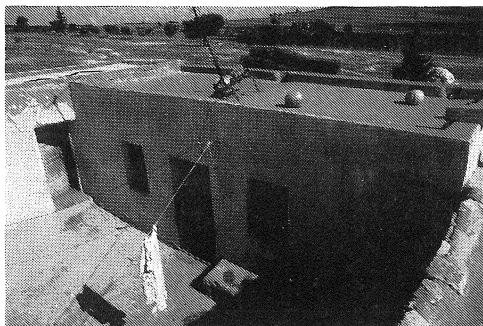
L'un, appelé Zgaag, est situé à une dizaine de kilomètres de la délégation de Rouhia. Les logements sont construits avec de la pierre recueillie de la montagne voisine et les toitures sont constituées par des planchers en dalle pleine sans aucune couche d'étanchéité appropriée. Les planchers ont des taches d'humidité dues au manque de ventilation des locaux, des fissures se trouvant sur la toiture surtout au niveau de la zone d'évacuation des eaux

pluviales et des décollements de mortier. Nous remarquons que les toitures ne sont ni entretenues ni peintes périodiquement (le lait de chaux par exemple) pour réduire les dommages (fissures de surface, légers décollements...).

L'autre, appelée Cité Ettahrir, située au centre de la délégation de Rouhia, dont les logements sont relativement mieux entretenus que ceux de Zgaag mais la porosité de la dalle pleine constituant la toiture, le manque de la couche d'étanchéité et le manque de ventilation périodique des locaux ont causé des taches d'humidité à la jonction entre les murs et le plafond et entraîné un décollement de l'enduit intérieur.



(a)



(b)

Fig. 2.9. Toitures type II de Cité Ettahrir (a) et Ain Sodgha (b).

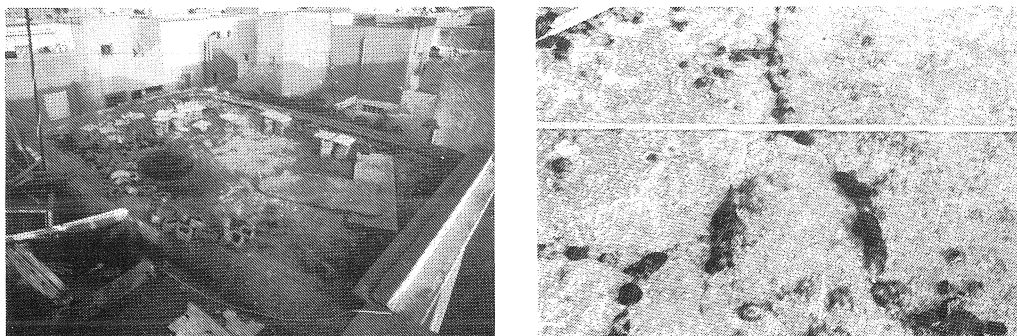
2.3.1.3 Logements ruraux privés

Ces logements sont situés parfois de façon groupée et dense et d'autres fois isolés dans une zone agricole appelée Ain Sodgha. Ils sont construits de façon artisanale par des maçons de la région sans aucune assistance technique. Le plafond construit, en dalle pleine, a beaucoup de taches d'humidité et même parfois des gouttes d'eau et des fissures sur la toiture, qui deviennent dans certains cas, profondes et traversent la dalle en béton armé, ce qui exige de bien étudier le sol et la structure de la construction et de prévoir la pose d'une couche d'étanchéité avec sa protection.

2.3.2 Logements urbains

Les logements visités sont situés dans la cité Ibn Khaldoun faisant un tissu architectural dense avec des ruelles, des passages et des grandes rues formant les axes principaux. Les habitations, sont groupées et superposées de façon à avoir des ruelles brisées dans un but de garder l'aspect des cités anciennes traditionnelles. Les logements ont des surfaces habitées de 80 mètres carré environ. La réalisation, de cette cité puis de ses successeurs tels que la cité El Intilaka par la SNIT a été suivi par plusieurs phases allant de 1973 à 1986. Pour avoir une idée globale sur l'ensemble de la cité, nous avons choisi des logements de trois périodes de construction et trois aspects différents de la toiture:

2.3.2.1 Toiture type III



(a)

(b)

Fig. 2.10. Toiture type III, Cité Ibn Khaldoun. Mauvaise utilisation de la toiture (a). Champignons sur la toiture (b).

Ces logements constituent la première tranche de réalisation de la cité. Construits en 1973, ils sont groupés et superposés deux à deux avec des entrées indépendantes formant le type d'habitat semicollectif. Le logement est formé par deux pièces et une cuisine avec une possibilité d'extension d'une pièce. Malgré l'application d'une couche de feutre bitumé comme étanchéité (voir fig. 2.3), nous avons remarqué des bandes de taches d'humidité suivant les nervures et à la jonction entre les murs et le plafond. Des fissures et des champignons sont sur la toiture ce qui demande son entretien et sa peinture périodique aussi faudrait-il étudier la couche d'étan-

chéité et suivre des mesures de prescriptions techniques lors de son application.

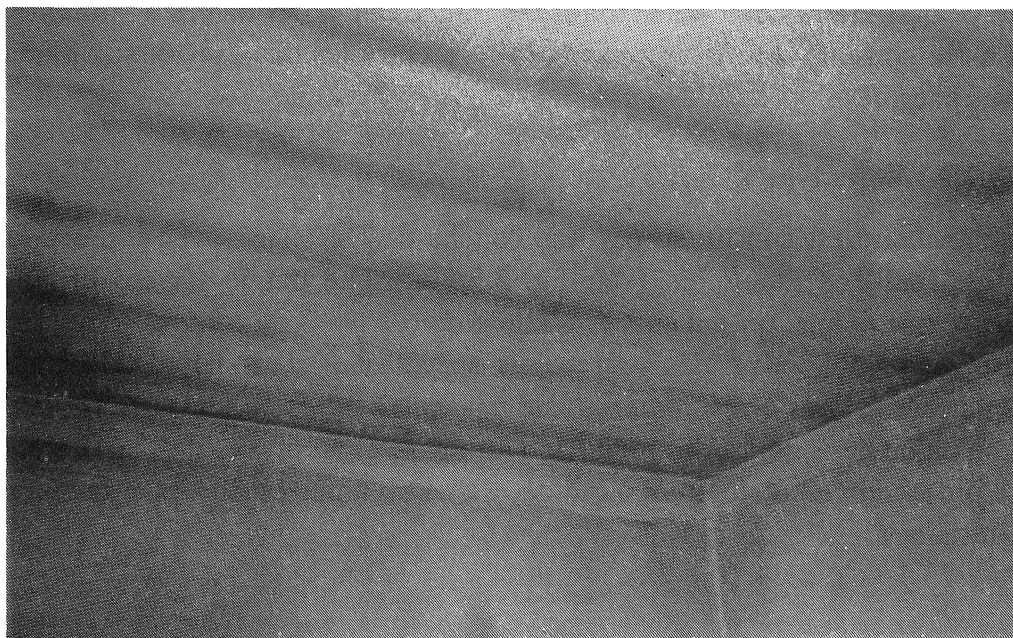


Fig. 2.11. Toiture type III, Cité Ibn Khaldoun. Bandes de taches d'humidité suivant les nervures et à la jonction entre les murs et le plafond.

2.3.2.2 Toiture type IV



(a)



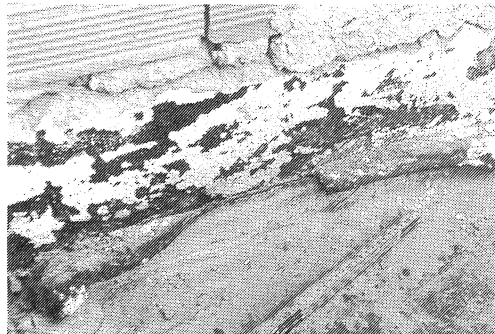
(b)

Fig. 2.12. Toiture type IV, Cité Ibn Khaldoun (a). Mauvaise application du Flintkote entre les dalles (b).

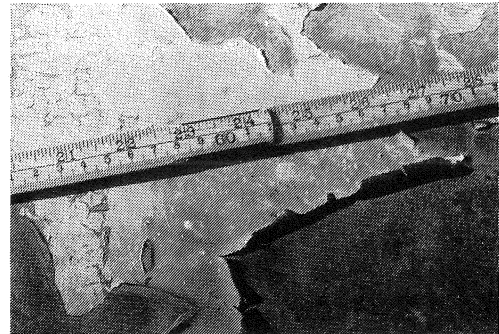
Ces logements sont construits durant l'année 1975. Ils sont construits en bande et jumelés à deux niveaux. L'étanchéité est constituée par des dalles en béton jointes par du Flintkote (voir fig. 2.4). Sur ces types de toitures nous avons remarqué la mauvaise application du Flintkote entre les dalles ce qui retient l'eau sur la toiture et donne lieu à des taches d'humidité. Il a été constaté des fissures sur la toiture entre les dalles et aux joints avec l'acrotère.

2.3.2.3 Toiture type V

L'étanchéité est constituée par une couche de Derbigum avec protection d'une feuille d'aluminium (voir fig. 2.5), fabriqué par la société l'Étanchéité tunisienne, posé à chaud. L'étude de ces types de toitures a montré que bien qu'il existe des entreprises spécialisées dans l'application de l'étanchéité, nous avons remarqué de mauvaises mises en œuvre telles que le manque de soudure des joints de Derbigum et au niveau de l'acrotère... La protection en aluminium a été décollée et n'a pu résister aux agressions extérieures.



(a)



(b)

Fig. 2.13. Toiture type V, Cité Ibn Khaldoun. Mauvaise application de Derbigum au joint entre le mur et la toiture (a). Décollement de la protection d'aluminium (b).

Il s'ajoute à ces considérations et remarques le fait que ce produit, le Derbigum, avec sa mise en œuvre revient relativement cher alors que le but de cette étude, comme cela a été précisé en introduction, était de rechercher un corps d'étanchéité convenable et économique puisqu'il doit s'appliquer aux toitures de logements ruraux et urbains.

2.4 Analyse de l'inventaire

L'objectif de cet inventaire était de faire le point des problèmes des infiltrations d'eau dans des toits plats. Lors de cet inventaire, nous avons examiné les toits pour ce qui est de leur pente, des fissures, des taches d'humidité et de ce qui pourrait présenter un intérêt quelconque. Les toitures des habitations rurales et urbaines ne sont pas entretenues; nous avons remarqué des légumes à sécher, des gargouilles bouchées par de la pierre et des jouets, des champignons et des meubles abandonnés. Nous avons en outre interviewé les propriétaires des maisons pour nous faire une opinion sur la construction de la maison ainsi que de l'importance des problèmes. Après avoir examiné une cinquantaine de maisons, dont une trentaine en milieu rural, il est apparu une différence de qualité notable entre les constructions urbaines et les constructions rurales. Les habitations à Tunis étaient d'une qualité bien meilleure que celles construites à la campagne. Mais de là à pouvoir cerner les causes directes de ces problèmes, cela n'était pas facile.

De façon à pouvoir examiner de plus près cet inventaire, on fait la différence entre le milieu rural et le milieu urbain.

2.4.1 Problèmes de toits en milieu rural

En milieu rural, la qualité des maisons est très variable. Il y avait des maisons qui étaient carrément inadéquates comme habitations alors que celle du voisin pouvait être d'excellente qualité. Cela peut être dû à plusieurs raisons. Une maison demande de l'entretien et si celui-ci fait défaut, elle ne tarde pas à se dégrader. Quel matériau a été utilisé et qui a construit la maison?

Un des problèmes importants était celui des fissures provoquées par l'affaissement et par des défauts dans la structure. Les fondations étaient défectueuses et les maisons se sont donc affaissées. Dans un cas bien précis, les fissures de la toiture avaient plusieurs décimètres de large et partageaient la maison en deux parties. Ces problèmes ne peuvent se résoudre facilement, surtout pour des maisons déjà existantes. La seule solution possible est d'avoir des fondations solides (étude de la résistance du sol) et

un prédimensionnement convenable de la structure porteuse. Nous nous devons toutefois de préciser que ce problème des fissures dûes à l'affaissement n'est pas un problème général mais que ces phénomènes apparaissent dans certaines régions du pays où le sol n'a pas suffisamment de capacité portante, compte tenu des fondations simples exécutées.

La plupart des habitations ont été construites durant l'été, c'est à dire pendant la saison la plus chaude. Cela peut constituer une cause supplémentaire d'infiltrations d'eau. Au moment du bétonnage, il faut empêcher l'évaporation de l'eau du béton, pour éviter tout risque de ce qu'on désigne sous le nom de retrait plastique. On constatera un retrait du béton pendant le temps de prise, avec apparition d'un grand nombre de fissures avant le durcissement du béton. Ces fissures vont subsister durant toute la durée de vie du béton, ajoutant des raisons supplémentaires à l'apparition de fissures ultérieures. Une fois qu'ils existent, il est impossible de remédier à ces problèmes et c'est au niveau du processus de fabrication du béton qu'il faut agir. Il faut donc, d'une manière ou d'une autre, empêcher l'évaporation. La meilleure solution consiste à arroser le béton, c'est à dire qu'on projete sans arrêt de l'eau sur le béton frais jusqu'à ce qu'il ait durci. Cela peut poser des problèmes, lorsque l'approvisionnement en eau est difficile. Une autre solution consiste à protéger le béton de l'évaporation en le recouvrant d'une feuille de plastique. L'eau ne peut donc pas disparaître dans l'atmosphère mais reste dans le béton. Il peut s'avérer onéreux d'utiliser une feuille de plastique; on peut essayer avec par exemple du papier, à condition de le maintenir mouillé.

Il faut, si possible, éviter de couler du béton pendant la saison chaude, mais plutôt en automne ou au printemps, lorsque l'évaporation n'est pas trop importante.

Une déclivité trop faible de la toiture pourrait constituer une autre cause des infiltrations. Comme on sait déjà, cette enquête ne concerne que les toits plats, mais même ces derniers doivent avoir une certaine déclivité. Il s'est avéré que les maisons que nous avons examiné présentaient une déclivité suffisante. Elle était située entre 1,5 et 3 degrés et était toujours orientée vers la descente, qui était souvent bouchée par des détritrus. De plus les descentes d'écoulement étant souvent trop courtes, l'eau coulait le long du mur et provoquait des dégâts.

2.4.2 Problèmes de toits en milieu urbain (Tunis)

Les maisons qui, à Tunis, faisaient partie de l'inventaire étaient toutes construites par la SNIT, l'entreprise immobilière nationale. On peut affirmer clairement que la qualité des maisons construites à Tunis par la SNIT était bien supérieure aux maisons en milieu rural. Mais même si les maisons étaient de meilleure qualité, le problème des infiltrations d'eau existait de toute façon dans de nombreux cas. Nous avons remarqué dans plusieurs cas (40% des logements urbains) que les toitures ont des bandes d'humidité et des décollements de l'enduit intérieur aux niveaux des nervures et à la jonction entre les murs et le plafond ceci représente le problème de la condensation produite lors du chauffage des locaux tout en ayant des parois froides. Ce problème est causé surtout par le manque de ventilation et la constitution des parois extérieures (non isolées thermiquement). Ces dégâts n'étaient pas aussi graves qu'en milieu urbain, mais d'autre part les maisons étaient souvent de construction assez récente. On peut se demander comment seront ces maisons dans quelques années, si les problèmes commencent dès à présent.

Les maisons qu'on construit aujourd'hui ont un tapis bitumineux (Derbigum) comme revêtement d'étanchéité. Ce produit est parfait, mais il est aussi relativement cher. Pour qu'il soit efficace, il faut le poser d'une façon satisfaisante, ce qui exige une main-d'œuvre qualifiée.

Si le bitume est exposé au rayonnement ultraviolet, il deviendra cassant et commencera à se fendiller, perdant son effet d'étanchéité. Il faut donc protéger ce tapis bitumineux du rayonnement solaire. A Tunis, on a utilisé une pellicule d'aluminium comme protection. Pendant l'inventaire, on a pu constater que cette pellicule d'aluminium s'était souvent déchirée et commençait à se craqueler. Dans certains cas, la feuille avait complètement disparu. S'il n'est pas porté remède à cet état de chose, les toits ne pourront pas, à l'avenir, faire face aux infiltrations d'eau.

En Tunisie, on construit souvent les maisons par tranches, c'est à dire qu'on commence d'abord par construire un étage et ensuite, lorsque la situation financière le permet, on rajoute encore un étage ou on agrandit la maison en surface. C'est souvent le propriétaire qui effectue ces agrandissements, ce qui peut entraîner certains problèmes, étant donné qu'il ignore la manière d'utiliser des nouveaux matériaux. Nous avons pu voir une maison où le propriétaire avait construit un escalier qui menait au toit et qui

avait coupé le revêtement bitumineux à l'endroit où l'escalier aboutissait. L'eau s'engouffrait sous le tapis bitumineux et se répandait sur une grande partie du toit. Comme conséquence, une pièce ainsi que la cuisine avaient été complètement endommagées.

2.4.3 Contrôle des matériaux de l'inventaire

Le matériau issu de l'inventaire était très important. Il était difficile de pouvoir discerner directement des causes spécifiques des infiltrations d'eau.

Nous avons établi le tableau suivant, afin d'arriver à une vue d'ensemble des infiltrations d'eau. Le nombre total de maisons examinées était une cinquante, dont une trentaine en milieu rural et les vingt restantes à Tunis. De plus, le tableau 2.2 indique quel est le nombre de maisons qui avait des problèmes avec des fissures dues à des affaissements.

	Total (50 maisons)	Tunis (20 maisons)	Milieu rural (30 maisons)
Grands problèmes	68%	60%	73%
Petits problèmes	28%	35%	23%
Pas de problèmes	4%	5%	4%
Fissures dues à l'affaissement	20%	15%	23%

Tableau 2.2. Nombre de maisons qui avait des problèmes avec des fissures.

Le tableau n'indique que le nombre de maisons qui ont des problèmes d'infiltration, mais ne dit rien de l'aspect de la maison. Mais on peut prétendre, sans grand risque de se tromper, que toutes les maisons avaient beaucoup trop de fissures. Les problèmes ne peuvent que s'accroître avec le temps, si aucune mesure n'est prise.

Comme indiqué plus haut, il existe de graves problèmes de construction. Voici résumés un certain nombre de points que l'on doit garder à l'esprit pour les constructions futures:

- Les fondations doivent être parfaitement exécutées;
- Eviter le coulage du béton en été;
- Protéger le béton de l'évaporation après coulage;
- Protéger les produits bitumineux du rayonnement ultraviolet;
- Informer les propriétaires de la façon d'effectuer leurs agrandissements;
- Exécuter les descentes d'eau jusqu'au sol;
- Eviter les obstacles des écoulements et des descentes.

Pour nous résumer, nous pouvons dire qu'une grande partie des maisons ont un besoin urgent de mesures destinées à empêcher une poursuite des infiltrations et les dommages qui s'ensuivent. Sinon les dégats peuvent être si importants que toute mesure ou réparation serait financièrement impossible à réaliser. A l'avenir, il serait souhaitable de s'attacher plus au problème d'infiltrations à travers la toiture, et de construire des maisons de façon à éviter ce problème.

2.4.4 “Déballage d'idées” (Brainstorming)

Grâce à cet inventaire, nous avons pu avoir un large aperçu des problèmes d'infiltrations de toitures. Il n'a pas été aisé de pouvoir suggérer des mesures directes. Afin d'éclairer le problème sous un nouveau jour, nous avons organisé ce qu'on appelle un “brainstorming” (déballage d'idées), c'est à dire qu'un groupe de personnes de compétences diverses, se réunit et débat du sujet. On discute ensuite des différentes mesures à prendre pour tenter de résoudre le problème.

Une longue liste de différentes constructions et matériaux ont été le résultat de ce “déballage d'idées”. La plupart des constructions et des matériaux proposés sont difficilement utilisables ou sont trop chers, mais il a été présenté une liste de solutions intéressantes. Nous sommes partis de cette liste et nous avons abouti à un certain nombre de constructions réalisables et de matériaux à utiliser sur le plan pratique.

A la suite de ce “déballage d'idées”, les perspectives de pouvoir apporter une solution à la structure de la toiture sont très minces. Il est préfér-

able d'orienter les recherches pour trouver un matériau dont on puisse recouvrir la structure et par là même prévenir toute infiltration d'eau.

On a choisi de tester en laboratoire trois différents types de dispositif d'étanchéité, pour ce qui est de leur comportement en cas de surcharge d'eau. Nous en discuterons dans le chapitre suivant.

2.5 Recherche bibliographique

2.5.1 Etude à base de données

Une recherche bibliographique basée sur ordinateur a été réalisée en mai 1987 avec comme objectif d'examiner ce qui a été publié au sujet de toits horizontaux et de leur étanchéité, ainsi que des méthodes éventuelles pour mesurer cette étanchéité. Grâce à la bibliothèque universitaire de Lund, nous avons eu accès à ces informations, essentiellement des revues avec des articles en suédois, anglais, français et allemand.

Cette recherche a été menée à l'aide des deux bases de données PASCAL/BATIMENT et ICONDA.

PASCAL/BATIMENT est une base de données française ayant pour objectif principal les matières: construction, génie civil, urbanisation en milieu citadin et rural. La langue en est le français avec des titres en anglais ainsi que des mots de recherche en anglais et en espagnol. Il contient environ 150.000 articles (livres, revues, rapports, thèses et matériel de conférences). L'aire de recherche du matériel concerne essentiellement l'Europe et s'étend de 1973 jusqu'à aujourd'hui.

ICONDA (International Construction Database) est une base de données allemande ayant une orientation vers les mêmes secteurs que PASCAL/BATIMENT. La langue utilisée avec ICONDA est l'anglais et la base de données a le monde entier comme aire de recherche. Il contient environ 195.000 articles, avec résumés. Les articles, se composant du même matériel qu'avec PASCAL/BATIMENT, datent d'après 1976.

A partir de la base de données PASCAL/BATIMENT nous avons choisi des informations sur 34 articles. Dans l'opération de recherche, nous avons choisi les questions codées 12, 22, 29 et 32. Voir figure 2.14.

SET	ITEMS	DESCRIPTION
1	2053	ROOF?
2	0	TUITURE?
3	2053	1 + 2
4	3298	TOITURE?
5	3905	1 + 4
6	3121	TUNIS?
7	3238	ALGER?
8	1298	LIBY?
9	1983	MOROCC?
10	3991	MAROC?
11	11057	6 + 7 + 8 + 9 + 10
12	3	5*11
13	22001	HUMIDIT?
14	1173	HYGROMETR?
15	5776	MOISTUR?
16	23775	13 + 14 + 15
17	104	5*16
18	26730	PERMEAB?
19	12089	INFILTRAT?
20	58922	TRANSFER

-MORE-

?P

SET	ITEMS	DESCRIPTION
21	96914	18 + 19 + 20
22	14	17*21
23	134063	TEST
24	31696	TESTS
25	24926	TESTING
26	119470	ESSAI
27	241764	23 + 24 + 25 + 26
28	16	17*27
29	14	28-22
30	80617	TRANSFERT/CT
31	11	17*30
32	3	31-(22 + 29)

Fig. 2.14. Opération de recherche de la base PASCAL/BATIMENT.

A partir de la base de données ICONDA, nous avons choisi des informations sur 123 articles. Dans l'opération de recherche nous avons choisi les questions codées L13, L19, L21, L24, L28, L36, L38, L40 et L45. Voir plus loin fig. 2.15.

Sur ce total de 157 articles, nous nous sommes procurés des copies sur 50 d'entre eux. La majeure partie des articles traitait, malgré le choix arrêté, de constructions de toitures compliquées et très avancées. La plupart

FILE ICONDA

L1	7313	S	ROOF?
L2	5161	S	ROOF?/TI,CT
L3	3567	S	(TEST# OR TESTING OR MEASURING) (L) METHOD#
L4	70	S	L1 AND L3
L5	1781	S	HUMIDIT? OR MOISTUR?
L6	829	S	INFILTRAT? OR PERMEAB?
L7	7	S	L4 AND (L5 OR L6)
L8	507	S	WATERPROOF?
L9	164	S	INVESTIGATION(W)METHOD#
L10	0	S	FL1 AND (L3 OR L9)
L11	70	S	L1 AND (L3 OR L9)
L12	9	S	L4 AND L8
L13	15	S	L7 OR L12
L14	459	S	L1 AND (L5 OR L6 OR L8)
L15	44	S	NORTH?(W)AFRICA# OR TUNISIA
L16	5	S	HOT(L)HUMID(L)CLIMAT#
L17	0	S	L14 AND (L15 OR L16)
L18	2	S	L1 AND (L15 OR L16)
L19	2	S	L18 NOT L13
L20	6	S	L1 AND (L5 OR WATER) AND L6
L21	6	S	L20 NOT (L13 OR L18)
L22	51	S	L1 AND (L5 OR WATER) AND DIFFUSION
L23	47	S	L22 NOT (L13 OR L18 OR L21)
L24	7	S	L23 AND DIFFUSION/TI,CT,ST
L25	191	S	L1 AND L5
L26	97	S	L25 AND (DAMAGE? OR PROTECT?)
L27	61	S	L25 AND (DAMAGE? OR PROTECT?)/TI,CT,ST
L28	57	S	L27 NOT (L13 OR L18 OR L21 OR L24)
L29	982	S	FLAT ROOF/CT
L30	10	S	CONSTRUCTION/CT
L31	61608	S	CONSTRUCTION
L32	731	S	L29 AND L31
L33	29541	S	CONSTRUCTION?/CT
L34	518	S	L29 AND L33
L35	420	S	TRADITIONAL?
L36	3	S	L34 AND L35
L37	503	S	L34 NOT (L36 OR L18 OR L13 OR L21 OR L24)
L38	31	S	L37 AND (CONCRETE OR BRICK#)
L39	472	S	L37 NOT L38
L40	1	S	L39 AND (L3 OR L9)
L41	3	S	L1 AND ALGER?
L42	2	S	L1 AND TUNIS?
L43	9	S	L1 AND (LIBYA? OR EGYPT? OR MAROCK? OR MOROCK?)
L44	14	S	L41 OR L42 OR L43
L45	12	S	L44 NOT L18

Fig. 2.15. Opération de recherche de la base ICONDA.

correspondaient à des conditions d'Europe de l'Ouest et du Nord et non pas à la condition en question.

La combinaison Roof/Toiture/Tunisia était très inhabituelle. Si en plus on y ajoutait d'autres mots de recherche comme par exemple Moistur? Infiltrat? le résultat n'était guère encourageant.

Les articles copiés renfermaient aussi des méthodes et des équipements très compliqués et coûteux destinés à mesurer l'étanchéité des toitures. Certains d'entre eux étaient toutefois utilisables et un certain nombre se trouvent indiqués sur la liste, au chapitre 6.

2.5.2 Bibliographie particulièrement utilisée

Un article jugé particulièrement intéressant se trouvait dans "Materials and Structures/Matériaux et Constructions", 1987, 20, 403-407. Il a été rédigé par C. Jaegermann et M. Puterman sous le titre "The evaluation of the crack-bridging ability of exposed roof coatings" (L'évaluation de la capacité d'absorption des fissures des revêtements de toitures exposées).

On affirmait, dans cet article, que l'un des principaux problèmes des toitures en climat subtropical est la médiocre capacité à long terme du revêtement à recouvrir les fissures. On y avait mis au point une installation d'essais destinée aux essais accélérés. Cette installation se composait d'une dalle de béton de 100 cm × 50 cm × 5 cm. La dalle était installée sur un support mobile, horizontal. Sur cette dalle on "créa" une fissure volontaire, dans le sens de la longueur. Les mouvements de la fissure furent ensuite obtenus en raison des mouvements thermiques entre la dalle de béton et deux profils d'aluminium peints en noir fixés tout le long de la dalle. Pendant la partie chaude de la journée, la fissure s'entrouvrait d'environ 0,7 mm, pour se refermer complètement pendant la nuit.

Les conclusions de ces essais étaient que les résultats étaient utilisables comme éléments de *comparaison* entre les différents matériaux. On était cependant arrivé à aucune valeur absolue. Les essais effectués plus tard montraient que, après seulement quelques mois d'exposition durant l'été, il était possible de comparer et d'analyser les capacités de recouvrement des fissures des revêtements.

Les idées autour de cette installation d'essais ont été par la suite à la base des essais réalisés en laboratoire et rapportés dans ce projet, voir chapitre 4.

En plus de cette recherche bibliographique basée sur langage de programmation, nous avons utilisé une certaine bibliographie déjà connue. Parmi les livres suédois utilisés dans le cadre de ce projet, nous pouvons citer:

Betonghandbok (Manuel sur le béton), Materiel (Matériau), publié par Svensk Byggtjänst.

- HusAMA 83. Description générale des matériaux et du travail de construction de maisons.
- Allmän kurs i Byggnadsmateriallära (Cours général de Technique des matériaux de construction), del 1 (1ère partie). Publication de l'Ecole Supérieure Technique de Lund, 1983.

“Manuel du béton, Matériau” traite des caractéristiques du béton et des matériaux annexes. On y trouve aussi des méthodes de calcul des caractéristiques des constructions en béton basées sur la connaissance des matériaux entrant dans sa composition.

Pour arriver à comparer l'étanchéité des différents types de toitures, il a fallu mettre au point une méthode de mesure. Cette méthode se devait d'être simple et d'une utilisation pas trop compliquée. Dans la publication “Cours général de Technique de matériaux de construction”, nous avons trouvé ce qu'on appelle “La méthode du bol”, que nous avons utilisé dans ce projet, après y avoir apporté quelques retouches.

Dans le but d'améliorer nos connaissances sur les différents produits bitumineux, nous avons utilisé, entre autres:

- Byggnadstekniska föreskrifter och allmänna råd (Dispositions techniques sur la construction et conseils généraux), 1984, publié par Statens Vägverk (la Direction générale des routes).
- Bitumen Emulsion (Les émulsions bitumineuses), publié par Nynäs Petroleum.
- Das Dachdecker-Handwerk, numéro 5, 1978. Un article “Bitumen für Dachabdichtungen” (Le bitume pour l'étanchéité des toitures), rédigé par B. Haushofer.

Le premier ouvrage donne différentes recettes traitant des composants pierres et bitumes ainsi que des courbes de répartition des grains de pratiquement tous les bétons d'asphalte utilisés en Suède.

Le deuxième est un ouvrage décrivant la fabrication, les caractéristiques et décrit les différents secteurs d'application des émulsions bitumineuses.

Le dernier article montre et décrit en images comment on arrive aux différentes normes caractéristiques du bitume.

Pour se faire une idée des prix actuellement pratiqués en Tunisie dans le secteur de la construction, nous avons utilisé une revue tunisienne: "UTICA-Flash", qui paraît six fois par an. Elle est publiée par "L'Union Tunisienne de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat", UTICA.

On y suit de très près les nouvelles concernant le commerce et l'économie en Tunisie. On y précise également les prix actuels de nombreux matériaux de construction, les coûts de la main-d'œuvre et des charges sociales.

Les devis estimatifs dans le chapitre 3 du rapport sont basées sur les informations tirées de cette revue.



3. ESSAIS D'ÉTANCHÉITÉ

3.1 Développement de la technique opératoire

Nous avons, à LNTH, étudié les différents types de technique opératoire pouvant servir à l'étude de l'étanchéité d'un nombre limité de types de toitures. Après avoir procédé à un examen des différentes possibilités, nous avons choisi une technique opératoire que nous avons utilisé pour l'ensemble des essais d'étanchéité. La technique décrite au paragraphe 3.1.2 a été plus explicitement détaillée dans un compte-rendu antérieur [13].

3.1.1 Différentes méthodes d'essais

L'objectif était de trouver une méthode de mesures simple et peu coûteuse. On examina, dans les laboratoires de LNTH, les instruments de mesures possibles existants. Nous avons pu constater qu'il existe un certain nombre de méthodes et d'instruments pas trop compliqués servant à mesurer le degré d'humidité, tant du matériau lui-même que de la surface.

La mesure du degré d'humidité du béton peut être réalisée à l'aide de ce qu'on appelle des capteurs par capacitance. Ceux-ci se basent sur le principe que la capacitance entre deux plaques métalliques est influencée par l'humidité existant dans l'espace les séparant. Les capteurs sont installés à l'extrémité d'une tige enfoncée dans un trou déjà percé ou dans des tubes encastrés, voir figure 3.1 (a). En limitant un volume d'air par une garniture, les capteurs enregistrent l'humidité relative présente dans l'air. Ils réagissent à toute variation de cette dernière.

Pour mesurer le degré d'humidité de la surface d'un matériau, on peut utiliser un instrument particulièrement simple et qu'on appelle un indicateur d'humidité. Une condition indispensable pour pouvoir s'en servir est

toutefois que la surface soit entièrement plate; la moindre irrégularité influant la mesure d'une façon négative.

L'instrument réagit en fonction de la quantité d'humidité se trouvant à la surface et on peut également l'utiliser pour des mesures plus ou moins précises effectuées sous le plafond. L'avantage, avec un indicateur d'humidité, est qu'on peut facilement mesurer la présence d'humidité dans les toitures où l'on soupçonne des infiltrations. La seule condition préalable à remplir est que le plafond soit parfaitement plane.

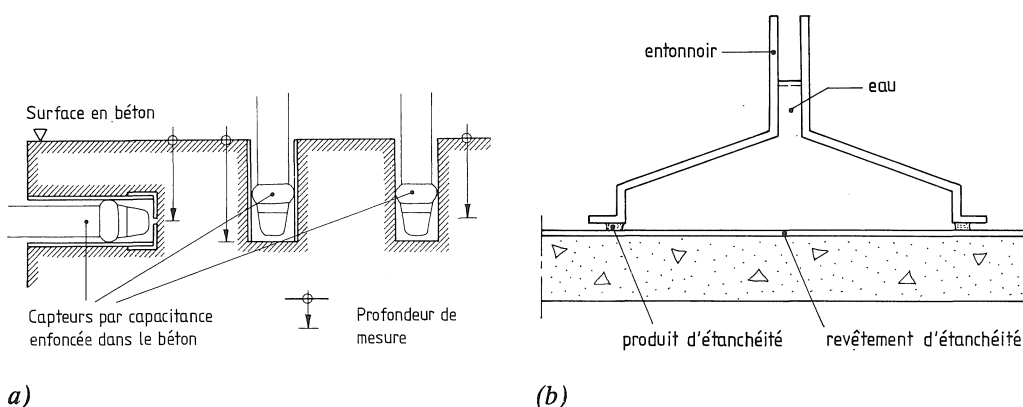


Fig. 3.1. Croquis des méthodes de (a) mesure des variations de l'humidité à l'intérieur du béton et (b) mesure de l'étanchéité du revêtement.

Pour examiner l'étanchéité des matériaux de revêtement de sols, on utilise dans les Pays Nordiques, une méthode normalisée [20], que l'on pourrait utiliser pour mesurer l'étanchéité des matériaux employés pour les toits plats.

La méthode de mesure, utilisable aussi bien en laboratoire qu'avec des toits réels, fonctionne en plaçant un entonnoir retourné sur le matériau à examiner, et en le remplissant ensuite avec de l'eau comme sur la figure 3.1 (b). La rapidité avec laquelle l'eau s'écoule de l'entonnoir donne une idée de l'étanchéité du matériau de toiture. Cette méthode est intéressante, mais n'a été que tardivement portée à notre connaissance, dans le cadre de ce projet.

Ce que l'on désigne sous l'appellation de "méthode du bol" est une méthode de laboratoire utilisée pour mesurer la diffusion à travers un matériau [10]. La quantité de vapeur d'eau diffusible à travers un échantillon

du matériau, peut se mesurer en plaçant cet échantillon au-dessus d'un bol rempli d'une solution saturée en sel. En pesant régulièrement le bol et l'échantillon, on peut suivre la rapidité de passage de l'humidité à travers le matériau. Il est important que le bol et l'étanchéité entre celui-ci et l'échantillon soient d'une matière imperméable à la diffusion, afin que celle-ci se fasse exclusivement à travers le matériau.

3.1.2 Technique opératoire

Afin de mesurer la diffusion de l'eau à travers différents types de toitures, nous avons choisi d'utiliser une technique qui rappelle, à bien des égards, la méthode du bol. La technique consiste à placer dans des tubes de 300 mm de diamètre et de 80 mm de hauteur, des échantillons circulaires constitués d'une coupe de la toiture dont l'étanchéité doit être examinée. Le tube est en polyéthylène, qui est une matière plastique imperméable à la diffusion.

Les échantillons, qui ont une forme circulaire avec un diamètre de 290 mm, se composent d'une couche comme support en béton d'une épaisseur de 20 mm sur laquelle on a ajouté un revêtement étanche. La jointure entre l'échantillon et le tube est rendue étanche et on verse de l'eau dans le tube au-dessus de l'échantillon, après quoi on ferme le tube avec un couvercle en polyéthylène pour prévenir une évaporation de l'eau.

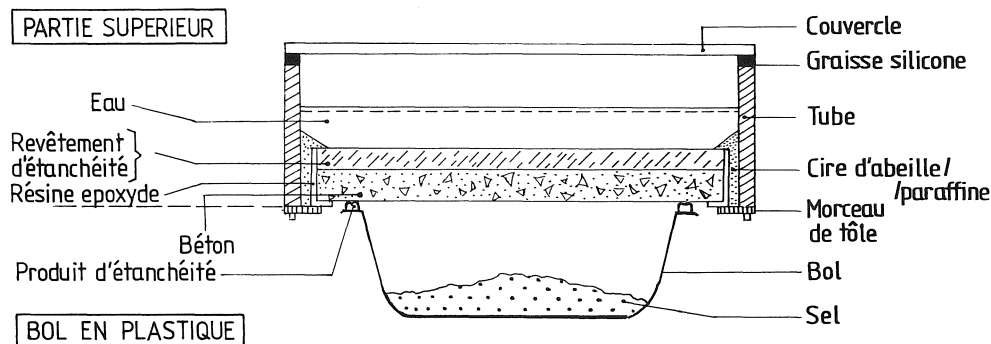


Fig. 3.2. La méthode d'essai employé.

Le tube, avec l'échantillon, est ensuite placé dans un bol en polyéthylène contenant un sel avec un faible degré d'humidité relative. La raison d'être

du sel est d'accélérer le passage de l'eau à travers l'échantillon, tout en conservant un climat constant sous l'échantillon. L'eau sur l'échantillon ne pourra arriver au bol de sel qu'en traversant l'échantillon.

On peut réaliser une mesure de l'étanchéité des échantillons en mesurant la diminution de poids de la partie supérieure, se composant du tube en plastique, de l'échantillon, de l'eau et du couvercle, comme fonction de temps.

Les bords des échantillons sont recouverts d'un mastic pratiquement imperméable à la diffusion, constitué de résine époxyde mélangée avec du sable. La résine époxyde empêche l'eau de ressortir par les parois latérales de l'échantillon.

Lors des expériences réalisées, le bol avec le sel avait un diamètre inférieur à l'échantillon lui-même, comme on le voit sur la figure 3.2. Afin d'amener la totalité de l'eau traversant l'échantillon dans le bol de sel, on applique également la résine époxyde sur la partie inférieure de l'échantillon non recouverte par le bol de sel.

L'espace entre l'échantillon et le tube est rendu étanche par l'application d'un mélange composé à 70% de cire d'abeille et à 30% de paraffine, qui est considéré comme imperméable à la diffusion. Le mélange est chauffé pour arriver à une consistance très liquide, pour être ensuite versé à la jointure entre le tube et l'échantillon. On peut considérer comme superflu l'utilisation de la résine époxyde sur les bords de l'échantillon, mais l'expérience a montré que la cire d'abeille n'est pas étanche à 100%.



(a)



(b)

Fig. 3.3. Application de la résine époxyde sur le bord de l'échantillon (a) et application étanche avec de la cire d'abeilles et de la paraffine à la jointure entre l'échantillon et le tube (b).

L'essai a débuté en versant 1 kg d'eau sur l'échantillon, après quoi on place le couvercle en polyéthylène sur le tube. On rend étanche la jonction entre le tube et le couvercle avec de la graisse silicone, qui est imperméable à la diffusion. L'étanchéité existant entre le tube et l'échantillon ainsi qu'entre le tube et le couvercle fait que l'eau qui se trouve au-dessus de l'échantillon ne peut disparaître qu'en passant à travers l'échantillon.

Chaque échantillon est maintenu en place près de son tube à l'aide de morceaux de tôles d'aluminium, qui sont vissés sous le tube.

Le bol salé contient 500 grammes de chlorure de magnésium cristallisé, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, et 50 grammes d'eau. La pression de la vapeur sur une solution de chlorure de magnésium saturée est telle que l'air à la température ambiante de la pièce autour de la solution, atteint un taux d'humidité relative de 33%. Le bol salé utilisé a un diamètre de 230 mm et une hauteur d'environ 120 mm.

Comme produit d'étanchéité entre le bol et la partie inférieure de l'échantillon, on utilise une bande en silicone auto-collante. On l'applique sur le bord supérieur du bol qui a une largeur d'environ 10 mm. A la jointure des deux extrémités de la bande, subsiste une petite ouverture non étanche. Il subsiste même une petite surface non étanche entre la bande et la résine époxyde sur la partie inférieure de la plaque. Ces manques d'étanchéité ne devraient pas avoir de conséquences sur les résultats des mesures qui sont basées sur la diminution du poids de la partie supérieure du dispositif d'essai et non sur l'augmentation du poids du bol salé.

On pèse à peu près tous les deux ou trois jours la partie supérieure et le bol salé sur une balance, avec une précision de 0,1 gramme. On pèse le bol salé pour s'assurer que la diminution du poids de la partie supérieure en gramme/heure correspond à une augmentation de poids équivalente du bol salé. Si tel n'était pas le cas, cela prouverait qu'on a eu un problème d'étanchéité. Entre les pesées, la partie supérieure repose sur le bol salé.

Il serait possible de laisser l'augmentation de poids du bol salé être à la base des résultats de mesures, mais on a estimé que le manque d'étanchéité existant entre le bol salé et la partie inférieure de l'échantillon pourrait entraîner un transfert de la vapeur d'eau de l'air ambiant dans le bol salé, le sel dedans ayant un taux d'humidité relative plus faible que la pièce, ce qui pourrait, à son tour, donner des résultats incertains.

L'ensemble des essais a duré un millier d'heures, c'est à dire environ un mois et demi. Les résultats ont été consignés dans un procès-verbal du modèle identique à celui représenté à l'annexe B.

Le résultat des mesures est présenté sous forme de courbes indiquant la diminution de poids de la partie supérieure comme fonction de temps, voir au paragraphe 3.3. La diminution de poids étant proportionnelle à la diffusion à travers la couche étanche, l'inclinaison de la courbe sur le diagramme indique son taux d'étanchéité. En comparant les courbes d'essais des différents types de couches d'étanchéité, on arrive à avoir l'étanchéité relative des différents types de revêtements.

3.2 Essai de revêtement étanche

3.2.1 Projet de revêtement étanche

Comme nous l'avons mentionné dans notre introduction à ce rapport, les revêtements d'étanchéité actuellement utilisés présentent beaucoup d'inconvénients. Il serait pour cela souhaitable de trouver d'autres variants. Une solution serait de construire des toitures en béton imperméable, mais cela est difficile à réaliser en Tunisie étant donné qu'il n'est pas facile d'obtenir la granulométrie du matériau en pierre qui est la condition indispensable d'une bonne imperméabilité.

Il ne reste en conséquence pas d'autre solution que d'appliquer une couche étanche sur la toiture. Un avantage avec cette solution est qu'on peut recouvrir les toitures existantes d'une couche étanche, même celles présentant déjà des fuites. Beaucoup de couches étanches s'avèrent peu pratiques étant donné qu'il n'est pas recommandé de marcher dessus, comme le font souvent les habitants de ces maisons.

Il est donc fortement conseillé de recouvrir la couche étanche d'un matériau protecteur et durable. Celui-ci aura également comme fonction de protéger la couche étanche contre les effets des rayons ultra-violet et, dans une certaine mesure, contre les variations de température. Les études se sont donc bornées à arriver à des types de toitures comprenant des couches

étanches recouvertes de matériau protecteur. Lors du choix du type de revêtement étanche, nous avons respecté les conditions suivantes:

- Les matériaux de construction utilisés devront être disponibles en Tunisie,
- Les types de revêtement proposés devront être construits à un prix peu élevé,
- Les types de revêtement devront être le plus simple possible, pour réduire au maximum les risques d'échec,
- Les types de construction devront être adaptés au climat de la Tunisie,
- La toiture ne devra nécessiter aucun entretien particulier pendant au moins 10 années.

Il a été décidé d'étudier trois types de revêtements d'étanchéité telles qu'elles sont représentées sur la figure 3.4. Les trois propositions de couches d'étanchéité sont à base des produits bitumineux.

1. Notre première proposition se compose d'une couche étanche de bitume distillé d'environ 2 mm d'épaisseur. Celle-ci est renforcée avec de la toile de jute. Comme couche protectrice sur celui-ci, nous avons choisi une couche de béton d'asphalte. Celui-ci protège la couche étanche des rayons du soleil et de l'usure mécanique. Il a également un certain effet d'imperméabilité aux infiltrations d'eau, mais n'est pas complètement étanche.

La toile de jute a pour fonction d'empêcher le bitume, qui est un liquide pâteux, de couler du toit par les évacuateurs d'eau et de renforcer la couche de bitume contribuant ainsi à diminuer les risques de formation de fissures.

2. La deuxième proposition consiste en une couche d'étanchéité en bitume oxydé de 5 mm d'épaisseur, que l'on recouvre d'une couche de sable de 40 à 50 mm d'épaisseur. On pose ensuite sur le sable des dalles de béton, qui forment le revêtement supérieur.

La raison pour laquelle on utilise le bitume oxydé est qu'il est pâteux, ce qui est un avantage pour une couche épaisse; il présente une certaine élasticité à la différence du bitume distillé. En cas de précipitations, une grande partie de la pluie qui tombe sur le toit va traverser les dalles de

béton pour ensuite, à travers le sable, atteindre la couche de bitume, qui a pour fonction de canaliser l'eau vers les évacuateurs d'eau.

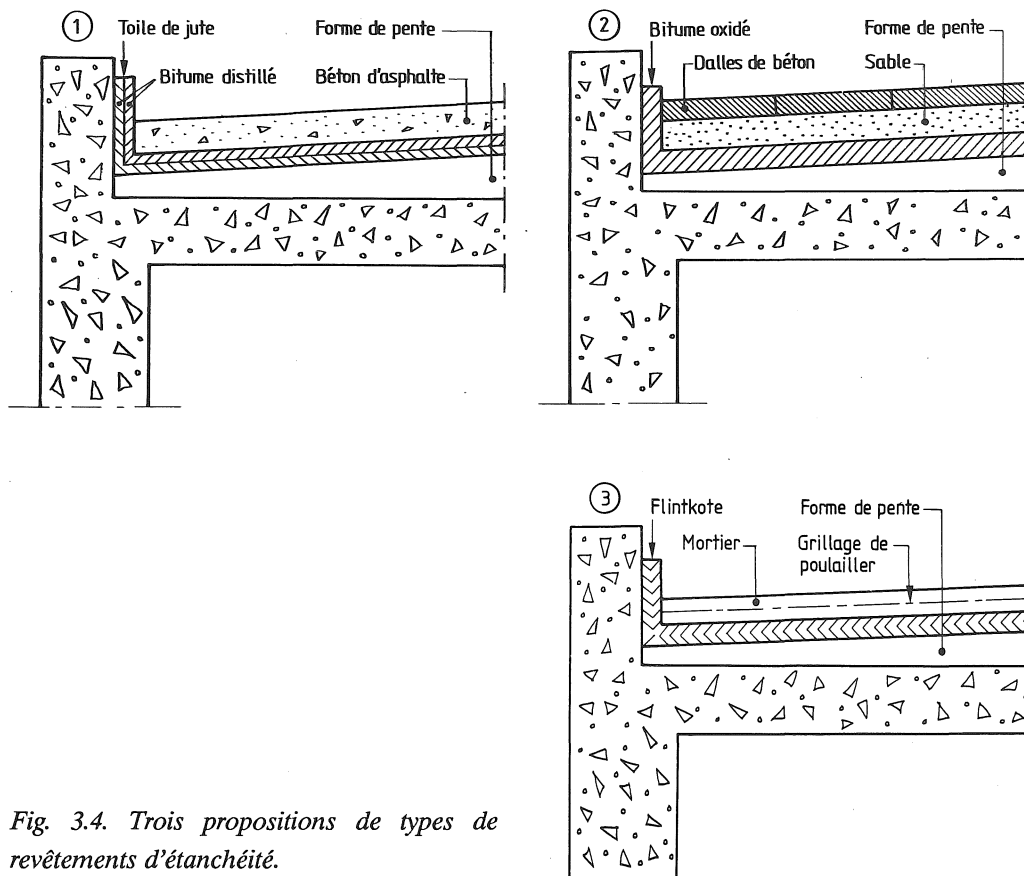


Fig. 3.4. Trois propositions de types de revêtements d'étanchéité.

3. Dans la troisième et dernière proposition, le revêtement d'étanchéité se compose d'une couche de Flintkote (ou Shellkote). C'est un bitume froid, une émulsion à base d'eau.

La couche étanche est protégée des rayons du soleil et de l'usure mécanique par un mortier de 25 à 30 mm d'épaisseur. Cette couche ne remplit aucune fonction d'étanchéité. Le mortier est renforcé par des grillages de poulaillers prévenant ainsi des décollements éventuels du mortier de la toiture, en cas de fissures.

On aurait pu, bien sûr, combiner les couches étanches avec les couches protectrices de plusieurs manières, mais nous nous sommes bornés à essayer les types de revêtements décrits ci-dessus.

3.2.2 Essai de revêtement étanche

Les échantillons ont été confectionnés et essayés tout d'abord par les soins de LNTH. Il s'en est suivi une série de tests à l'ENIT où l'on a utilisé des matériaux disponibles en Tunisie.

Le béton de support des échantillons a été confectionné par LNTH sans grande exigence de qualité, l'essentiel étant d'étudier l'étanchéité des différentes couches. A l'ENIT on a utilisé du béton de qualité standard tunisienne, qui est un béton beaucoup plus compact que celui utilisé par LNTH.

3.2.2.1 Les premiers essais

Lors des essais à LNTH, ainsi que lors du premier test à l'ENIT, les échantillons ont été fabriqués selon les trois propositions exposées au paragraphe 3.2.1 avec aussi bien la couche d'étanchéité que la couche protectrice par-dessus le béton de support.

Les couches protectrices étaient au fond sans grand intérêt, puisque en règle générale ils ne jouent aucun rôle dans l'étanchéité des types de constructions, mais on les a tout de même confectionnés pour acquérir une expérience pratique des matériaux et des types de construction. De plus les couches protectrices ont maintenu les couches d'étanchéité en place de manière à ce que ces derniers ne soient pas endommagés ou déformés par la pression de l'eau lorsque les échantillons ont été exposés à l'eau une longue période. Pour la proposition 2, on n'a fabriqué cependant aucune couche protectrice de l'échantillon, celle-ci n'ayant aucune influence sur les résultats des essais.

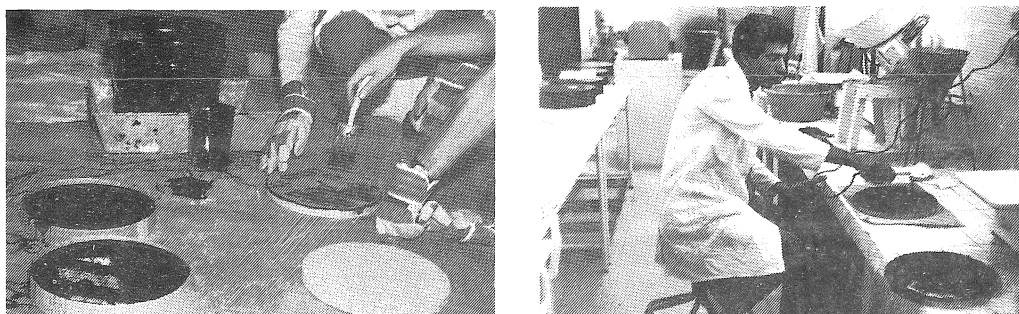
Afin de pouvoir apprécier l'importance de l'amélioration du revêtement d'étanchéité par rapport à une absence totale de revêtement étanche, on a fabriqué des échantillons de référence, correspondant à la base d'appui, uniquement en béton. On a fabriqué, tant à LNTH qu'à l'ENIT, 16 échantillons, quatre pour chacune des trois propositions ainsi que quatre échantillons comme référence.

La couche étanche de la proposition 1, constitué du bitume distillé renforcé par la toile de jute, a été réalisé en chauffant le bitume à 180°C. A la suite de quoi il est devenu si liquide qu'on a pu en recouvrir les échantillons avec une brosse. Afin d'examiner la différence d'étanchéité et d'appli-

cation entre le bitume distillé et oxydé, nous avons confectionné à LNTH, deux échantillons de chaque sorte.

Nous avons appliqué une première couche, après quoi nous avons posé la toile de jute en l'appuyant et finalement enduit une deuxième couche de façon à recouvrir entièrement la toile de jute. Nous avons ensuite réchauffé la couche d'étanchéité avec un chalumeau, de façon à supprimer tous les pores éventuels.

Deux des échantillons de LNTH ne furent cependant pas réchauffés, ce qui eut une influence certaine sur le résultat, voir paragraphe 3.3. La couche d'usure en béton d'asphalte a été confectionnée à l'aide d'un malaxeur d'asphalte. A 180°C, on mélange le bitume distillé, les pierres, le sable et le filler, après quoi on pose la masse bitumineuse sur les échantillons et on la compacte.



(a)

(b)

Fig. 3.5. Application sur le béton de support de la couche d'étanchéité en (a, gauche) bitume oxydé selon la proposition 2 et (a, droite) en bitume distillé renforcé avec de la toile de jute selon la proposition 1. Traitement à chaud de la couche d'étanchéité selon la proposition 1 (b).

La seconde couche d'étanchéité de la proposition a été réalisé à LNTH avec du bitume oxydé, un produit qui s'est révélé extrêmement difficile à manier. Après l'avoir réchauffé jusqu'à le rendre liquide, il a durci très rapidement à la température ambiante de la pièce et il a été très difficile de le verser sur les échantillons.

A Tunis, nous n'avons jamais réussi à nous procurer du bitume oxydé, et c'est pourquoi nous avons utilisé, à la place, du bitume distillé. Deux échantillons furent également confectionnés à LNTH avec du bitume distillé, et l'un d'eux a été rejeté.

Dans la troisième proposition, la couche d'étanchéité était constituée de Flintkote (ou Shellkote) qui a été peint sur les échantillons. Nous avons procédé à une première application dans un sens, et, après le séchage, à une deuxième application perpendiculaire à la première.

Le produit est d'une utilisation aisée, étant donné qu'il n'est pas nécessaire de le chauffer au préalable et que l'on peut facilement nettoyer les outils utilisés avec de l'eau. La couche protectrice, c'est à dire le mortier renforcé par le grillage de poulailler, a été placé sur la couche d'étanchéité.

Il était prévu de tester quatre dalles de béton non traitées comme échantillons de référence. Nous avons toutefois utilisé, lors des essais à LNTH, une des dalles pour réaliser un essai spécial afin d'avoir une idée de l'importance de la quantité d'eau mesurée qui a passé à travers les échantillons et qui représente l'eau de surface, et quelle est l'importance de l'humidité de l'échantillon.



(a)



(b)

Fig. 3.6. Type de revêtement d'étanchéité selon la proposition 3. Application de Shellkote (a) ainsi que pose du mortier renforcé du grillage de poulailler (b).

L'essai de l'humidité de la construction a été réalisé en appliquant une couche de résine époxyde sur le dessus et le côté de la dalle de béton. La dalle devant ensuite être placée sur un bol salé, on a également recouvert la

partie inférieure de la dalle de béton se trouvant à l'extérieur du bol. Le but était de diriger de la dalle vers le bol salé, l'évaporation de l'humidité de la construction, à l'aide de résine époxyde étanche à la diffusion.

3.2.2.2 Les essais suivants

Un autre essai a suivi le premier essai réalisé à l'ENIT. Un des enseignements de l'essai réalisé à LNTH et de l'essai 1 à l'ENIT était que l'émulsion bitumineuse était d'une utilisation très pratique. On décida donc, de comparer différentes émulsions bitumineuses par un deuxième test.

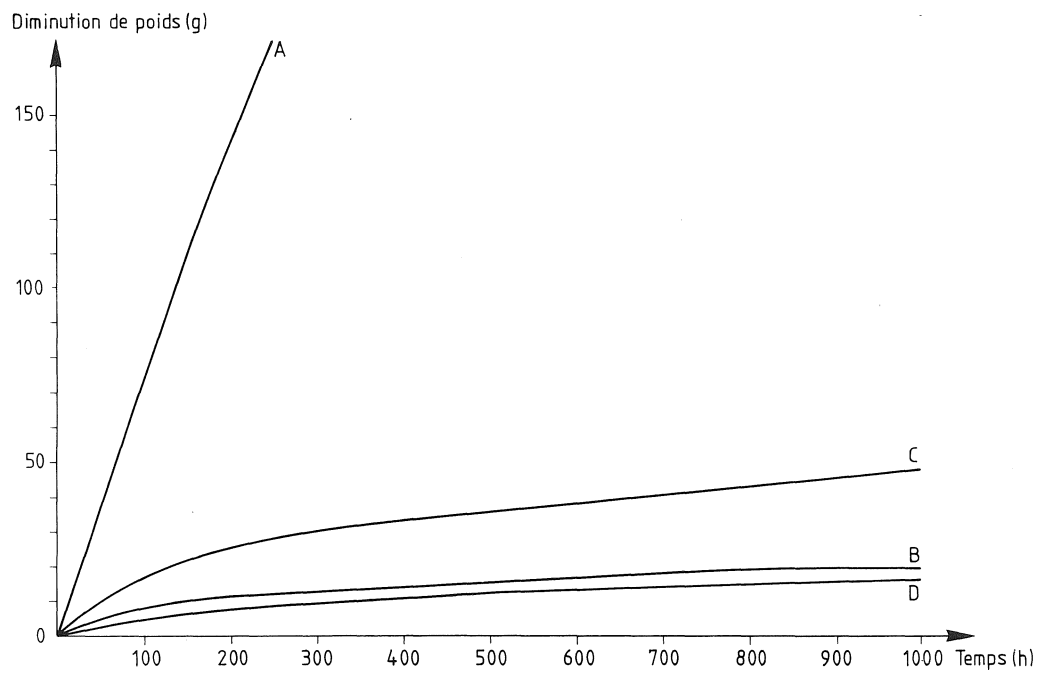
Dans le test 2, on a comparé la différence entre le Shellkote et le Derbicote, les deux produits les plus courants et les moins chers existant sur le marché. On confectionna ensuite des échantillons avec du Derbicote renforcé par la toile de jute ainsi qu'avec du Derbicote renforcé par un filet en plastique.

3.3 Résultat des essais

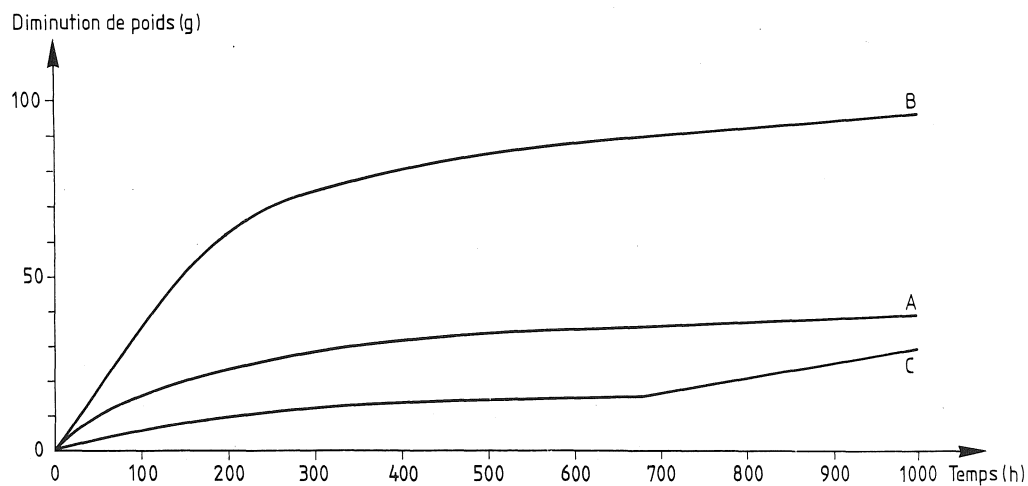
Le compte-rendu des résultats est présenté sous forme de diagramme, avec en abscisse le temps en heures et en ordonnée la diminution de poids de la partie supérieure de l'installation d'essai, à savoir la quantité d'eau qui quittait de la surface inférieure du support en béton. Nous avons confectionné en tout 16 échantillons. Le support en béton a été coulé à deux reprises, 8 dalles à chaque fois.

Il s'est avéré que, en général, la diminution de poids de la partie supérieure de l'installation d'essai était supérieure à l'augmentation de poids du bol salé. Ce qui ne concorde pas avec la théorie suivant laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air autour du bol salé, y pénétrerait à la faveur du manque d'étanchéité. Il est probable, au contraire, qu'une partie de l'eau passant à travers l'échantillon se diffuse à l'extérieur du bol salé à cause de l'absence d'étanchéité qui existe entre celui-ci et la résine époxyde sur la partie inférieure de l'échantillon.

3.3.1 Résultat des essais à LNTH



(a)



(b)

Fig. 3.7. Diagramme de résultat de (a) la dalle de béton avec couche d'étanchéité en bitume distillé renforcé de toile de jute et couche protectrice de béton d'asphalte et (b) dalle de béton avec du bitume oxydé comme couche d'étanchéité.

Le résultat de la proposition 1, tel qu'il est représenté sur la figure 3.7 (a) peut s'expliquer de la manière suivante. Dans deux cas, courbe C et D, on a utilisé du bitume distillé, alors que les courbes A et B indiquent le résultat du bitume oxydé. Un des échantillons avec le bitume distillé (D) et un avec le bitume oxydé (B) ont subi un traitement calorifique. Celui-ci a entraîné une amélioration notable du résultat de l'essai, particulièrement dans le cas du bitume oxydé.

Les courbes B et D indiquent une diminution de poids d'environ 20 grammes après mille heures, ce qui correspond à l'assèchement de l'humidité de la construction de la dalle de béton pendant la même période, voir la figure 3.10 (a). Le revêtement d'étanchéité de B et D est donc parfaitement étanche.

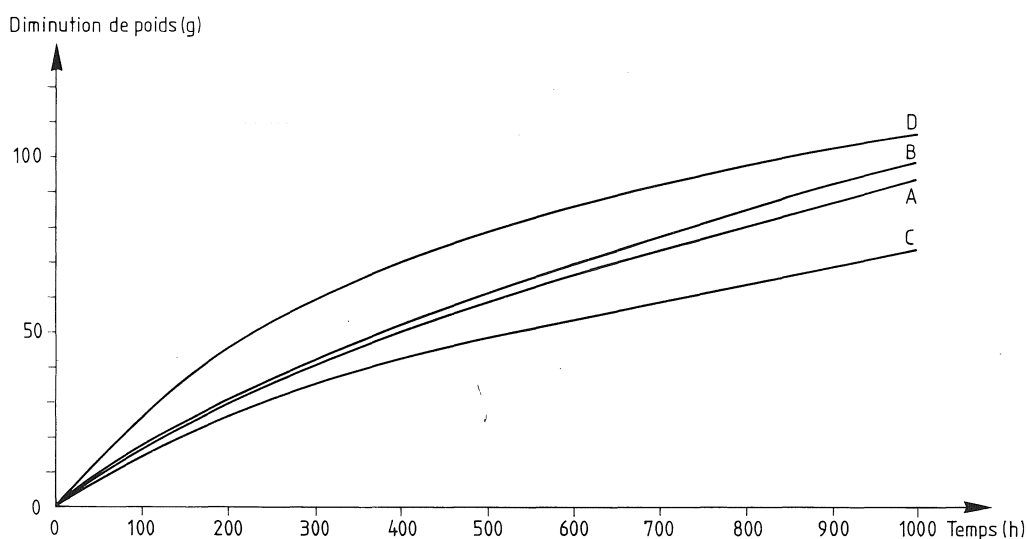


Fig. 3.8. Diagramme de résultat de la dalle de béton avec couche étanche de Flinkote plus une couche protectrice de mortier.

Le résultat de la proposition 2, figure 3.7 (b), ne montre que trois courbes, un des échantillon ayant été détruit. Remarquez bien aussi que l'une de ces courbes, C, n'indique pas le résultat d'un échantillon avec du bitume oxydé mais avec du bitume distillé. On note que les courbes sont très différentes; la courbe A semble normal, alors que la courbe B est sensiblement plus mauvais, pour une raison inconnue. La courbe C, qui indique le bitume dis-

tillé, présente un aspect inhabituel, car ce bitume plus liquide, a pu être déformé, durant le déroulement de l'essai, par la pression de l'eau.

Sur la figure 3.8 est indiqué le résultat de la proposition 3 sous la forme de quatre courbes (A-D) très proches les unes des autres. Si on compare avec le diagramme de l'humidité de la construction, on remarque que le revêtement d'étanchéité n'est pas parfaitement étanche.

La figure 3.9 indique la quantité d'eau qui passe par les dalles de béton (A-C) et qui n'avait pas de revêtement d'étanchéité. Le diagramme indique clairement que les trois courbes ont la même tendance et que le béton d'une qualité médiocre laisse passer beaucoup d'eau.

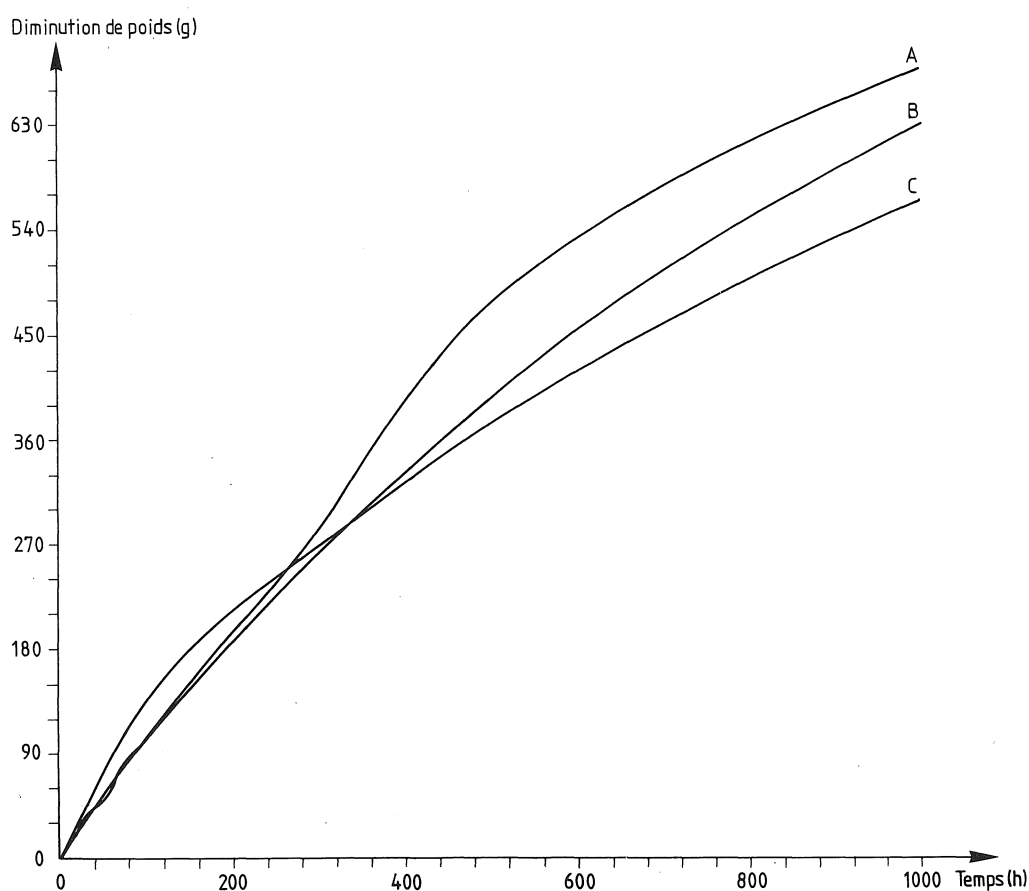


Fig. 3.9. Diagramme de résultat d'uniquement béton de support.

L'essai sur l'humidité de la construction fut donc réalisé à l'aide d'une dalle en béton. Cette dalle fut coulée en même temps que les autres dalles et a

séché aussi longtemps avec la même température et les mêmes conditions d'humidité. L'essai a été réalisé de la même façon que pour les autres échantillons et le résultat est indiqué sur la figure 3.10 (a).

Un diagramme comparatif entre les trois propositions de types de revêtement d'étanchéité et le cas du béton seul se trouve sur la figure 3.10 (b). Les courbes représentent les valeurs moyennes des courbes pour des échantillons identiques. L'humidité de la construction n'a pas été soustraite des résultats de mesures des échantillons, mais leur courbe de résultat se trouve sur la figure 3.10 (b).

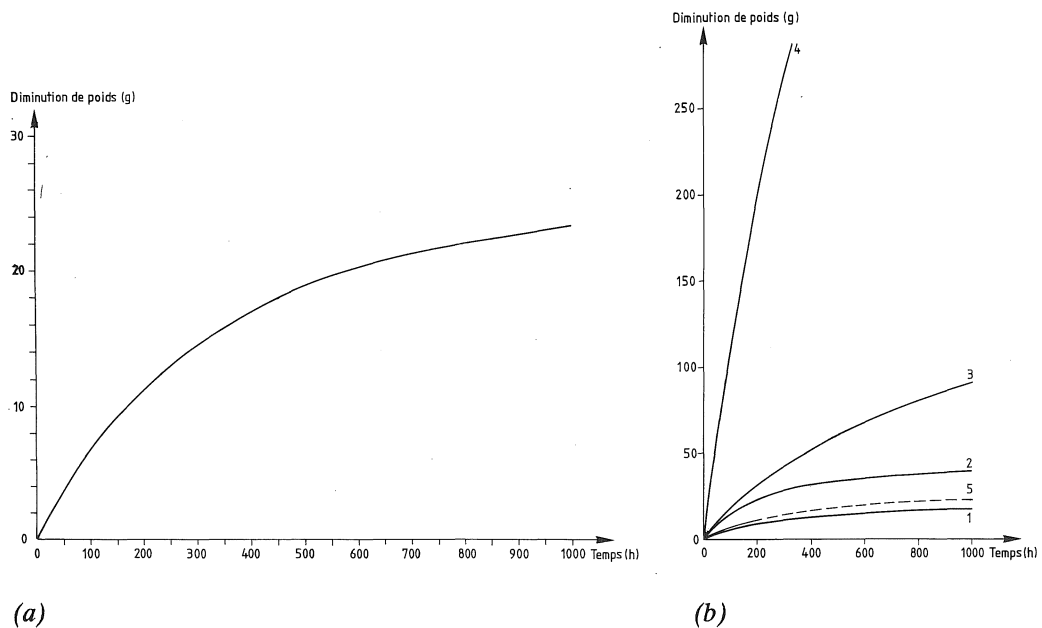


Fig. 3.10. Diagramme de résultat de (a) l'essai d'humidité de la construction comprenant une dalle de béton recouverte de résine époxyde et (b) comparaison entre la proposition 1-3 et le cas uniquement béton de support (courbe 4) et le cas humidité de la construction (courbe 5). La courbe 1 est la valeur moyenne des deux échantillons (B et D) traités à chaud, selon la proposition 1. La courbe 2 montre une courbe (A) des échantillons avec du bitume oxydé dans la proposition 1. La courbe 3 et 4 indique la valeur moyenne de tous les échantillons selon la proposition 3 (A-D) ainsi que le cas uniquement du béton de support (A-C). La courbe 5 est la courbe de la figure 3.10 (a) placée sur la figure 3.10 (b).

Si on compare les courbes de valeurs moyennes avec la courbe de l'essai d'humidité de la construction, on peut estimer que la proposition 1 a laissé passer moins d'eau que celle provoquée par l'humidité de la construction! On peut l'expliquer par le fait que, lors de la confection des échantillons

selon la proposition 1, et même selon la proposition 2, les dalles de béton ont été chauffées, ce qui a provoqué une émission d'humidité et donc moins de retenue d'humidité que pour les autres dalles de béton, lors du début des essais.

Le diagramme de comparaison indique l'amélioration sensible apportée aux dalles de béton par le revêtement d'étanchéité. Le bitume distillé donne le meilleur résultat des trois types de couche d'étanchéité, et peut être considéré comme parfaitement étanche. Il précède le bitume oxydé et l'étanchéité la moins bonne est le fait de l'émulsion bitumineuse.

3.3.2 Résultat de l'essai no 1 à l'ENIT

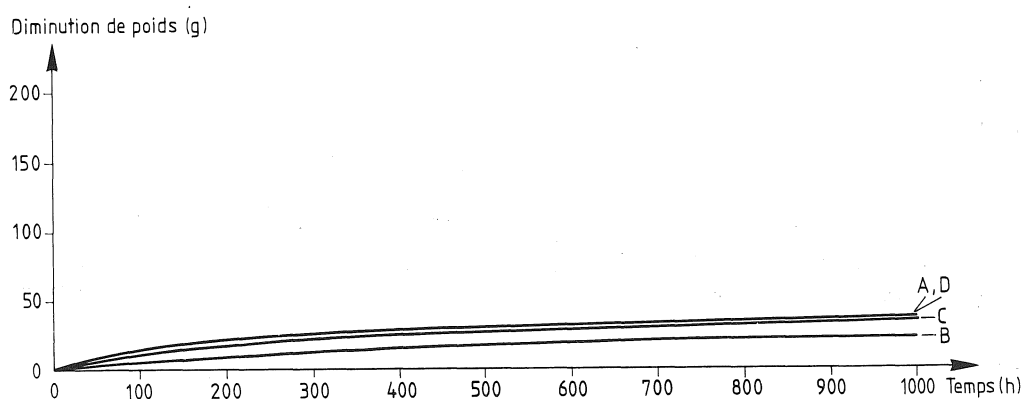
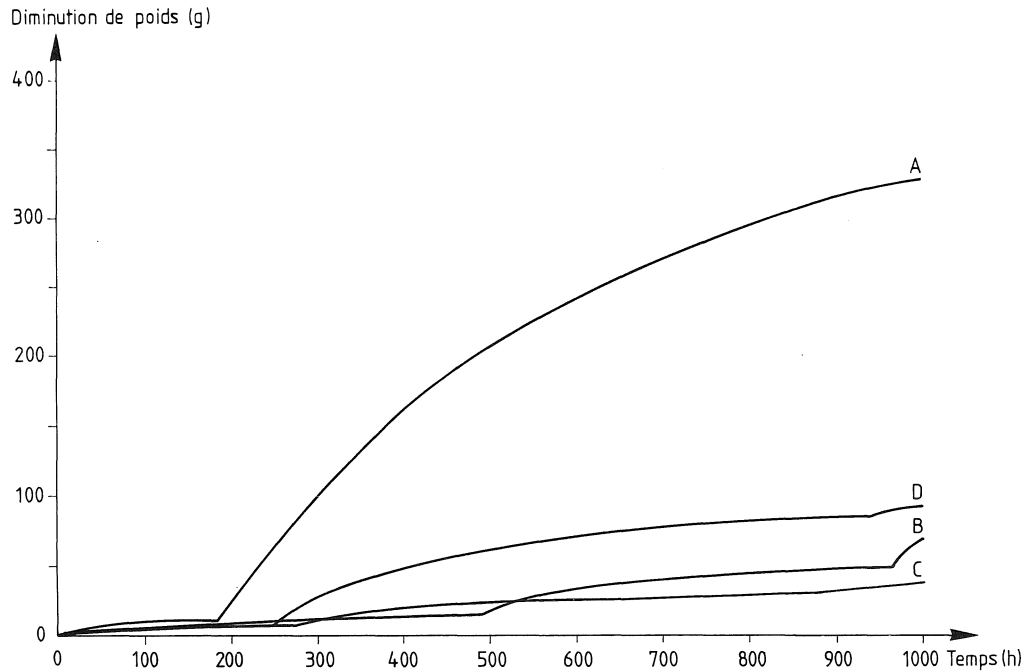


Fig. 3.11. Le diagramme de résultat de la dalle de béton avec couche d'étanchéité en bitume distillé renforcé de toile de jute plus couche protectrice en béton d'asphalte.

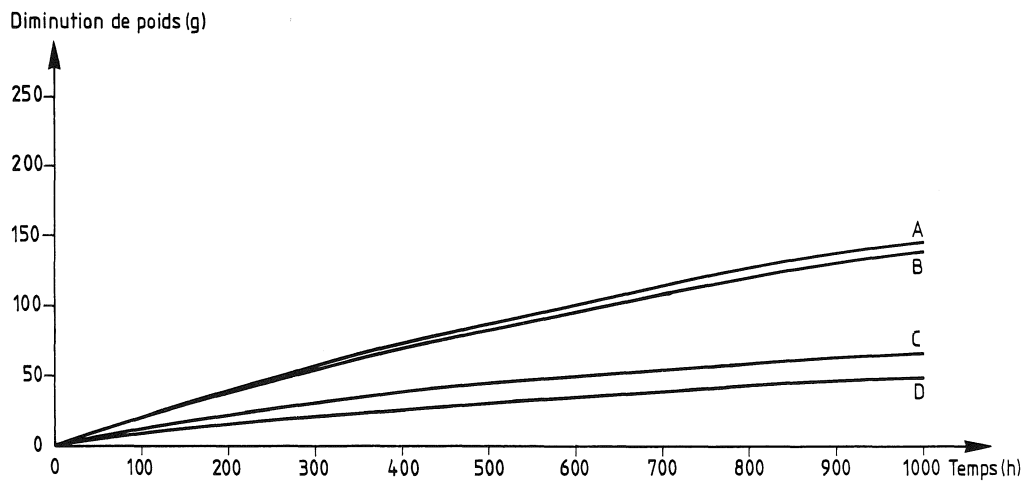
Il y a lieu de noter qu'il y a eu différents types de bétons étanches, les dalles de béton ayant été coulées à deux occasions différentes. La première série avait une imperméabilité moins bonne que la deuxième, ce qui, dans certains cas, a sensiblement influé sur les résultats. Les deux qualités de béton étaient donc plus imperméables que ceux de LNTH. Chacune des trois propositions comprenait deux dalles de béton de la première série et deux de la seconde.

La figure 3.11 indique le résultat de quatre essais avec la proposition 1. Les courbes A et B devraient indiquer un résultat plus mauvais que C et D à cause de la différence de qualité des dalles de béton. Mais étant donné

que le revêtement d'étanchéité ne laisse pratiquement pas passer d'eau du tout, on n'observe aucune différence. Les revêtements d'étanchéité ont tous été traités à chaud.



(a)



(b)

Fig. 3.12. Diagramme de résultat de (a) la dalle de béton avec bitume distillé comme couche d'étanchéité et (b) couche d'étanchéité en Flintkote plus couche protectrice de mortier.

Le résultat de la proposition 2 est illustré à la figure 3.12 (a). Etant donné qu'il avait été impossible de se procurer du bitume oxydé, on l'a remplacé par du distillé. Ce produit est entièrement plastique, ce qui peut expliquer l'aspect curieux des courbes (ça doit dépendre de la déformation causé par la pression d'eau de la manière que les cratères se sont constitués ainsi fortement diminuant l'épaisseur de la couche étanche). Le même phénomène que celui observé lors de l'utilisation du bitume distillé à LNTH, s'est également manifesté ici.

La figure 3.12 (b) indique le résultat de la proposition 3. On voit très bien ici, la différence entre, d'une part les courbes A et B et d'autre part, les courbes C et D. Comme cela a déjà été précisé ci-dessus, cette différence est dûe au fait qu'on a utilisé des qualités de béton différentes. L'eau passe à travers le Flintkote qui n'est pas parfaitement étanche, et la perméabilité dépend de la qualité du béton.

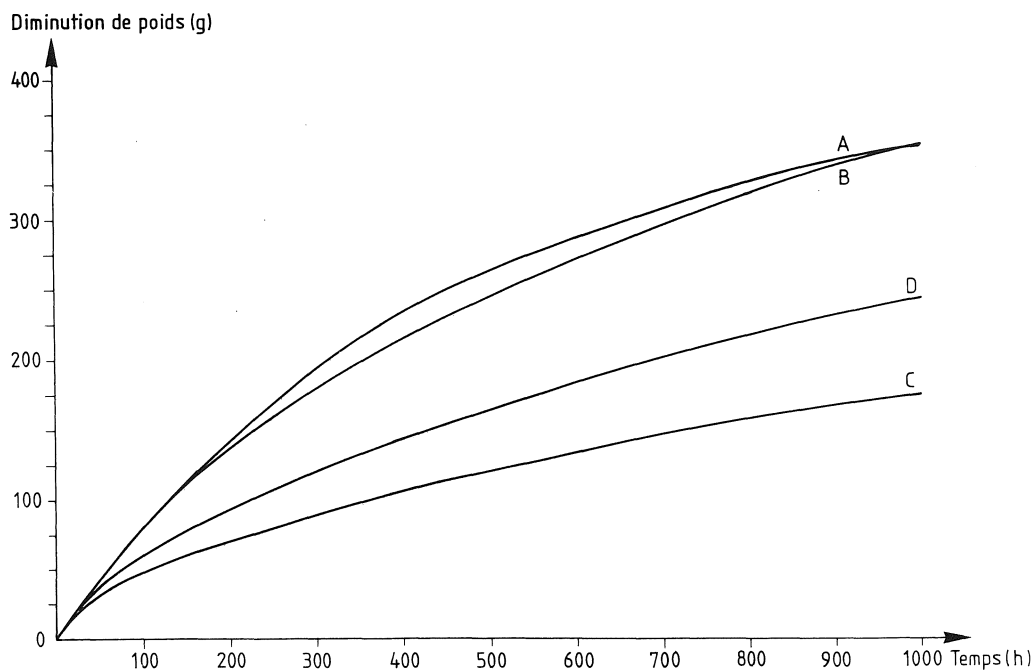


Fig. 3.13. Diagramme de résultat de la dalle d'uniquement béton de support.

La figure 3.13 indique la quantité d'eau qui passe à travers les dalles de béton qui n'ont pas de revêtement d'étanchéité. Les courbes indiquent

clairement qu'un béton de meilleure qualité a été utilisé pour la deuxième série de dalles de béton.

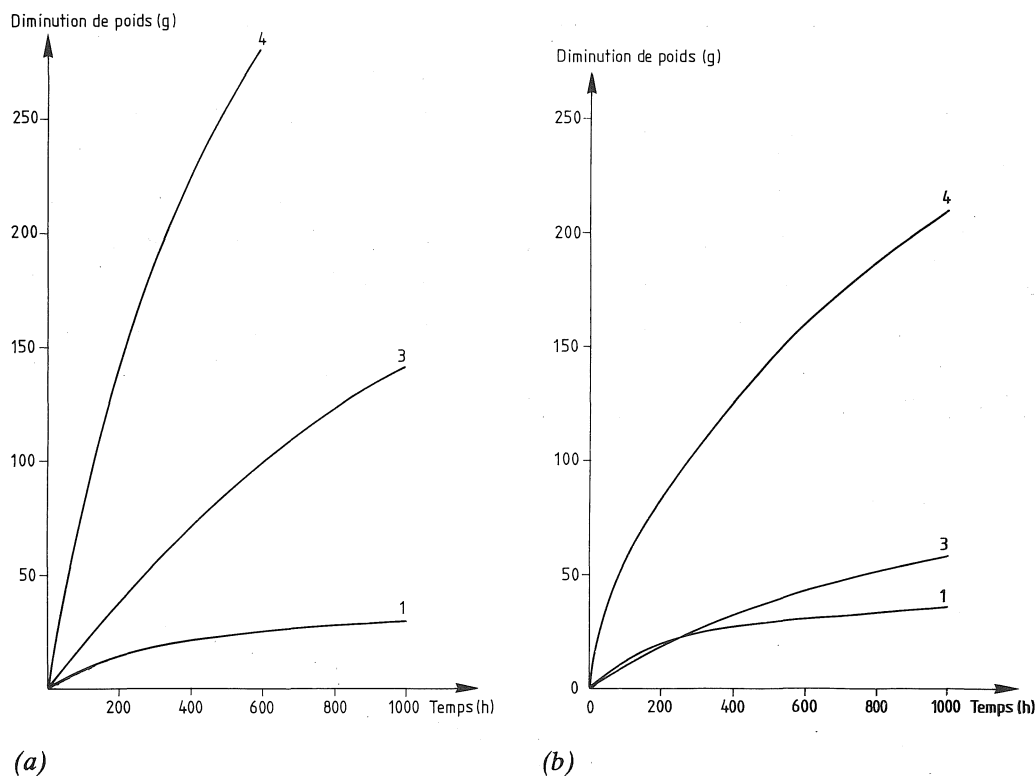


Fig. 3.14. Diagramme de comparaison entre la proposition 1, 3 et le cas du béton seul (courbe 4) pour (a) le premier béton coulé (moins étanche) et (b) le béton coulé plus tard (plus étanche).

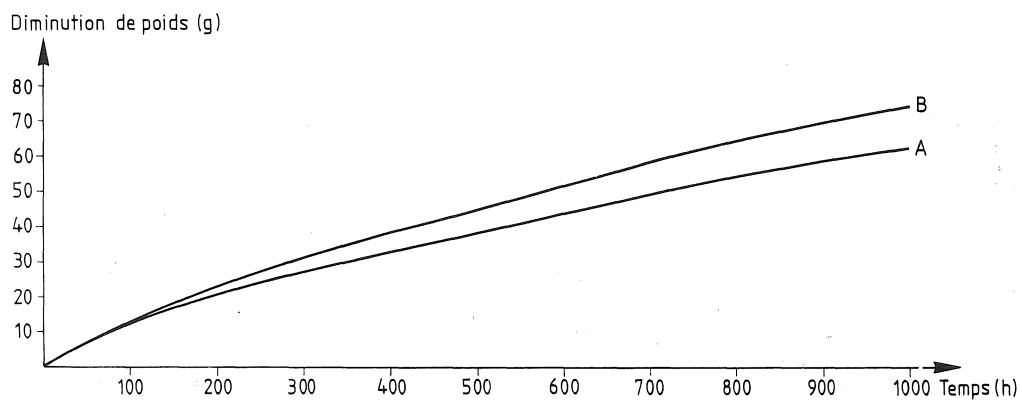
Les résultats des essais effectués à l'ENIT durant l'automne 1988 coïncident généralement avec ceux des essais de l'été de la même année à LNTH. Du fait que deux qualités de béton différentes ont été utilisées à l'ENIT, les résultats sont résumés sur deux diagrammes. Les courbes sur la figure 3.14 (a) sont les valeurs moyennes du premier béton coulé (une valeur moyenne entre les courbes A et B sur chaque diagramme) qui est le plus perméable.

Les courbes sur la figure 3.14 (b) indiquent la valeur moyenne (entre les courbes C et D) du second béton plus étanche. Les courbes 1 sont très semblables à la fois pour (a) et (b), alors que la différence est importante entre les courbes 3 et 4. Ce qui signifie que le revêtement d'étanchéité laissant

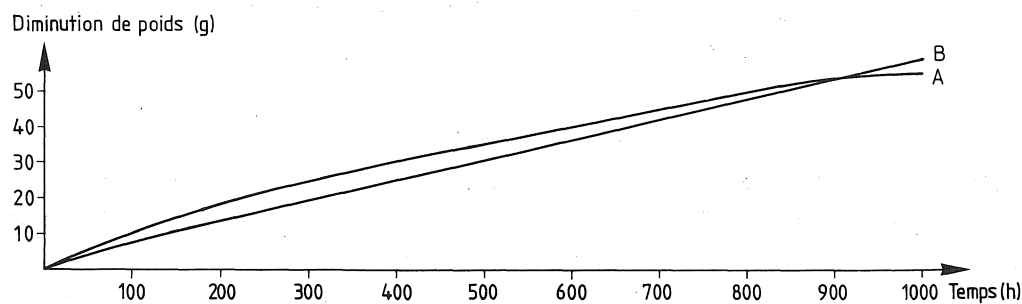
passer l'eau, la qualité du béton a une grande influence sur la perméabilité de l'échantillon.

3.3.3 Résultat de l'essai no 2 à l'ENIT

Lors de la seconde série d'essais à l'ENIT, nous avons abouti à des résultats malheureusement en partie difficiles à expliquer. Les résultats des huit premiers échantillons étaient normaux, ce qui n'était pas le cas pour les huit derniers. Lors de la vérification du procès-verbal des mesures, il s'avéra que l'augmentation du poids du bol salé ne représentait que 20 à 45% de la diminution du poids de la partie supérieure. L'étanchéité entre l'échantillon et le tube en plastique ne peut donc pas avoir été parfaitement imperméable.



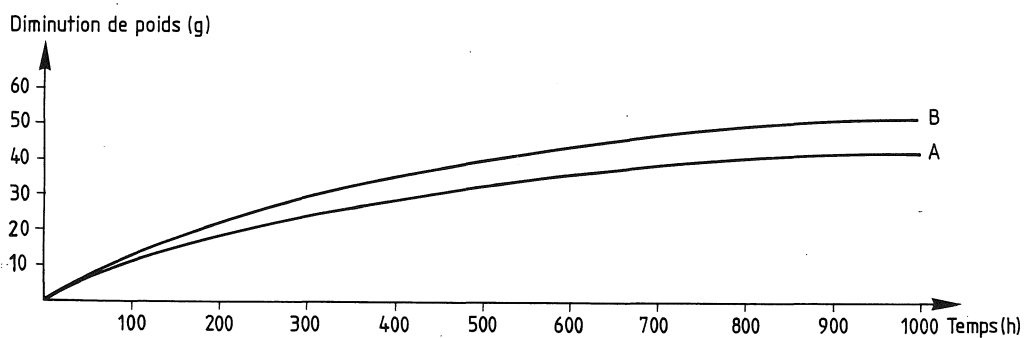
(a)



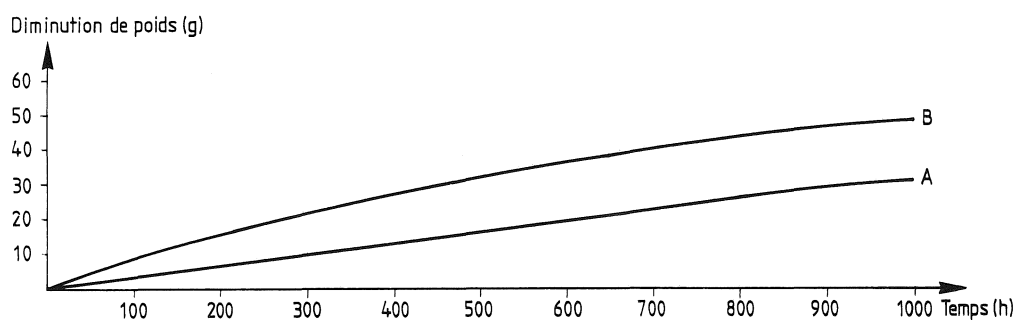
(b)

Fig. 3.15. Diagramme de (a) Shellkote seule et (b) Derbicote seule.

Etant donné que les résultats de ces huit essais sont complètement faussés, nous n'en avons pas rendu compte. Le diagramme des résultats sur les figures 3.15 (a = uniquement le Shellkote; b = uniquement le Derbicote), 3.16 (a = Derbicote renforcé par la toile de jute; b = Derbicote renforcé par un filet en plastique) n'indiquent ainsi que deux courbes (A et B) par type de couche étanche.



(a)



(b)

Fig. 3.16. Diagramme de résultats de l'essai 2 à l'ENIT avec couche étanche de (a) Derbicote renforcé avec toile de jute et (b) Derbicote renforcé avec filet en plastique.

Sur la figure 3.17 nous montrons un diagramme avec le résultat de valeur moyenne pour chaque couche étanche (valeurs moyennes des courbes A et B sur les figures 3.15 et 3.16). Si l'on se base sur les diagrammes, on ne peut se ranger à l'idée qu'il y a une différence d'imperméabilité entre les émulsions bitumineuses Shellkote et Derbicote. Le renforcement du Derbicote n'a qu'un très faible effet sur l'étanchéité. Les différences d'étanchéité con-

cernant les couches et indiquées par le diagramme sur la figure 3.17 sont en-deça des marges d'erreurs acceptées.

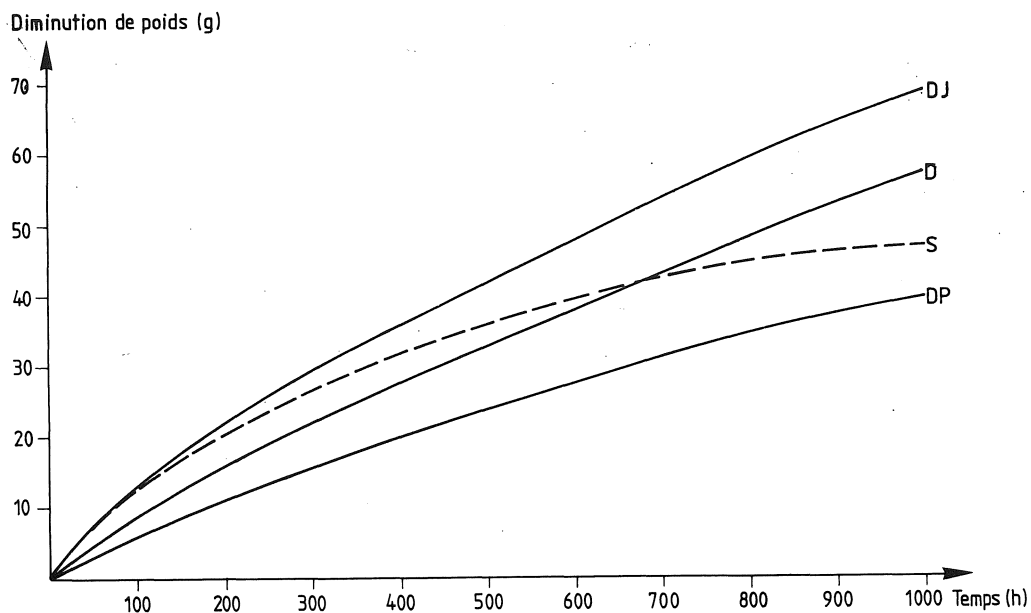


Fig. 3.17. Diagramme de comparaison de l'essai 2, ENIT. Courbe S = Shellkote, D = Derbicote, DJ = Derbicote renforcé par toile de jute et DP = Derbicote renforcé par filet en plastique.

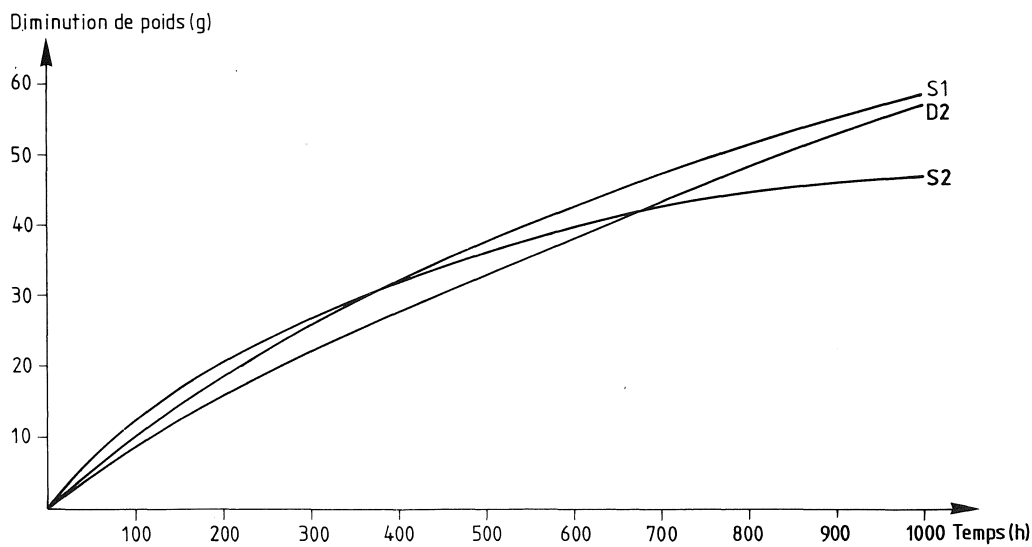


Fig. 3.18. Tous les essais avec l'émulsion bitumineuse de l'ENIT appliquée sur le béton de support de la même qualité, le S1 = Shellkote pour l'essai 1, le S2 = Shellkote pour l'essai 2 et le D2 = Derbicote pour l'essai 2.

Sur la figure 3.18 apparaissent les valeurs moyennes de tous les tests effectués à l'ENIT avec des émulsions bitumineuses ayant la même qualité de béton de support. La courbe S1 indique le Shellkote, essai 1, la courbe S2 indiquant le Shellkote, essai 2 et la courbe D2 indique le Derbicote, essai 2.

3.4 Analyse de la technique opératoire

3.4.1 Forme des courbes de résultat

Les dalles de béton n'ayant séché que pendant deux semaines, ni l'hydratation, ni la dessiccation n'ont pu être complets lorsque les essais ont démarré. Etant donné qu'une hydratation accrue (la prise chimique de l'eau avec le ciment) contribue fortement à la diminution de la porosité, la perméabilité des dalles de béton a diminué durant la durée des essais. Pour nos essais, cela a eu pour conséquence que l'imperméabilité des dalles de béton a augmenté avec le temps.

L'hydratation peut en partie expliquer l'aspect parabolique des courbes de résultats, mais même la dessiccation a également joué un rôle important. Les échantillons n'ayant que deux semaines lorsque les essais ont commencé, la dessiccation des dalles de béton n'en était qu'au début. Il est donc difficile de juger dans quelle proportion la diminution du poids des échantillons est due à la dessiccation et dans quelle proportion elle est due au passage de l'eau à travers.

On a examiné la proportion de l'humidité de la construction dans une des dalles et cela est indiqué sur la figure 3.10 (a). Celle-ci a un effet sur l'aspect des courbes de la même façon que l'augmentation de l'hydratation.

3.4.2 Amélioration de la méthode

Dans les essais réalisés jusqu'à présent avec la technique existante, on a pu seulement aboutir à des résultats comparables entre les différents couches d'étanchéité. En ne commençant les essais qu'après une dessiccation complète et une hydratation des dalles de béton, il devrait être possible d'ar-

river à une valeur quantitative de la perméabilité de la couche d'étanchéité. Afin de rendre possible un tel essai, il faut procéder aux modifications suivantes lors de la fabrication des échantillons.

Si on veut, autant que possible, éviter des différences individuelles dans les dalles de béton, il est recommandé de les fabriquer en respectant des normes de qualité bien définies et de les fabriquer en grande quantité à la fois. Dans le but d'éliminer l'influence de l'hydratation sur le résultat, il faudrait que les dalles, avant leur utilisation, aient trempé assez longtemps pour que le ciment soit presque entièrement hydraté. Elles peuvent par exemple être trempé pendant trois mois dans de l'eau de chaux.

Il est également souhaitable de diminuer l'influence de l'humidité de la construction sur le résultat, et c'est pourquoi une dessiccation totale du béton devrait intervenir avant de commencer les essais. Le mieux serait de laisser sécher le béton pendant environ un mois sous le même climat que le bol salé, dans ce cas précis dans une humidité relative de 33%. Cela peut être réalisé en plaçant les bols salés avec les dalles de béton entièrement sèches, dans une pièce fermée à température ambiante normale.

Une autre méthode consiste à accélérer la dessiccation, en séchant les dalles dans une étuve à une température correspondant à l'humidité relative du sel.

Une dessiccation plus complète signifie une disparition totale de l'eau interstitielle. Quand l'eau, au démarrage des essais, traverse ensuite la couche étanche, il faut d'abord remplir ces pores de la dalle de béton avant que l'eau arrive jusqu'au bol salé. Ce qui entraîne une diminution du poids plus lente au début des essais. Ensuite, on arrive théoriquement à un état stationnaire. Voir figure 3.19 (a).

La pose de la couche d'étanchéité doit s'effectuer avec le plus grand soin pour ce qui est de son épaisseur. La méthode la plus simple pour arriver à une épaisseur homogène est de peser les échantillons avant et après la pose, de façon à être sûr d'avoir mis la même quantité sur tous les échantillons du même type.

L'étanchéité des bords des échantillons et de l'ouverture entre la paroi du tube et l'échantillon est réalisée selon la manière décrite précédemment. Pour ce qui est de l'étanchéité réalisée avec de la résine époxyde sur la partie inférieure de l'échantillon, on pourrait s'en passer si on utilisait un bol salé ayant le même diamètre que l'échantillon.

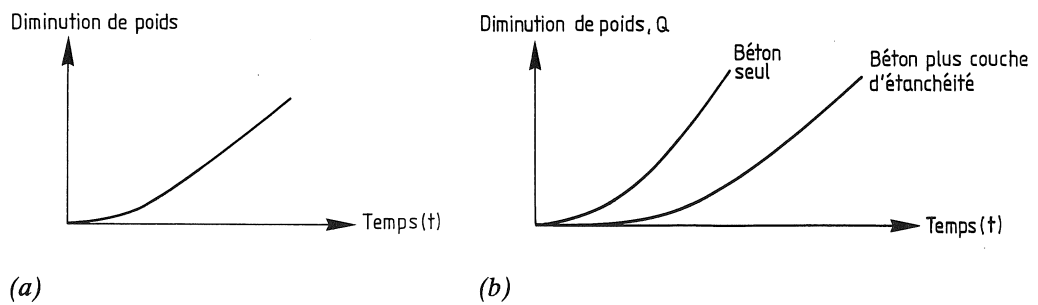


Fig. 3.19. Aspect dû au fait que cela prend du temps de remplir les pores de béton (a). Résultat attendu du cas avec béton seul, ainsi que le cas du béton plus revêtement d'étanchéité (b).

3.4.3 Calcul de la constante de diffusion

Pour pouvoir évaluer le résultat, il faudrait procéder aux essais avec d'une part des échantillons se composant de dalles de béton sur lesquelles on pose un revêtement étanche, et d'autre part des échantillons constituant seulement des dalles de béton. Ces dernières servant de référence pour calculer l'étanchéité de la couche étanche

Les essais vont être poursuivis jusqu'à ce qu'on arrive à un état stationnaire, c'est à dire lorsque la diminution du poids comme fonction du temps est représentée par une ligne droite suivant la figure 3.19 (b). Le flux d'humidité qui pénètre à travers la couche d'étanchéité est égal au flux passant à travers de la dalle de béton vers le bol salé, et l'inclinaison des courbes est proportionnelle à la constante de diffusion.

La constante de diffusion, k , peut être tirée des diagrammes de résultats avec la formule

$$k = \frac{Q}{A \cdot \Delta p \cdot t} \quad (1)$$

où

k = constante de diffusion [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$],

Q = diminution du poids [kg],

A = surface de l'échantillon [m^2],

Δp = différence de la pression de la vapeur entre les surfaces supérieures et inférieures de l'échantillon [Pa],

t = temps [s].

Δp peut être calculé si on connaît l'humidité relative de la solution salée et la pression de saturation de la vapeur, compte tenu de la température ambiante. Notez bien que le débit d'eau à travers l'échantillon n'est pas proportionnel à l'humidité relative sous l'échantillon. La constante de diffusion calculée ne peut donc pas être comparée à une constante de diffusion calculée pour un essai où on utilise un sel ayant une autre humidité relative.

Q et t s'obtiennent à partir du diagramme de résultats et A est connu. Avec (1) on peut calculer la constante de diffusion de la dalle de béton, k_b , et la constante de diffusion de la dalle de béton et de la couche d'étanchéité, k_{b+e} . Avec la formule

$$k_{b+e} = \frac{k_e \cdot k_b}{k_e + k_b} \quad (2)$$

on peut ensuite facilement calculer la constante de diffusion de la couche d'étanchéité, k_e . On a alors négligé l'effet de la résistance de transition entre la dalle de béton et l'air ainsi que l'effet de la couche d'air sur le sel.

3.5 Devis estimatif des trois revêtements d'étanchéité

Etant donné que l'économie joue un rôle important, nous avons établi un devis estimatif pour chacun des trois types de revêtements d'étanchéité proposés dans le paragraphe 3.2. Nous avons d'une part tenu compte des

coûts des matériaux, d'autre part des coûts de la mise en œuvre sous forme d'entreprise, voir tableau 3.1.

PROPOSITION	1	2	3
Coûts des matériaux/m²			
Revêtement d'étanchéité	1 ^D 330	2 ^D 965	0 ^D 690
Couche protectrice	0 ^D 410	2 ^D 030	1 ^D 480
Coût total des matériaux/m ²	1 ^D 740	4 ^D 995	2 ^D 170
Coûts de la main-d'œuvre/m²			
Revêtement d'étanchéité	4 ^D 850	1 ^D 940	1 ^D 260
Couche protectrice	3 ^D 880	1 ^D 720	2 ^D 715
Coût total de la main-d'œuvre/m ²	8 ^D 730	3 ^D 660	3 ^D 975
Coût total/m²	10^D470	8^D655	6^D145

(a)

PROPOSITION	1	2	3
Revêtement d'étanchéité/m²			
Coûts des matériaux	1 ^D 330	2 ^D 965	0 ^D 690
Coûts de la main-d'œuvre	4 ^D 850	1 ^D 940	1 ^D 260
Coût total du revêtement d'étanchéité/m ²	6 ^D 180	4 ^D 905	1 ^D 950
Couche protectrice/m²			
Coûts des matériaux	0 ^D 410	2 ^D 030	1 ^D 480
Coûts de la main-d'œuvre	3 ^D 880	1 ^D 720	2 ^D 715
Coût total de la couche protectrice/m ²	4 ^D 290	3 ^D 750	4 ^D 195
Coût total/m²	10^D470	8^D655	6^D145

(b)

Tableau 3.1. Coûts des matériaux et coûts de la mise en œuvre sous forme d'entreprise (a) et coûts du revêtement d'étanchéité et de la couche protectrice (b) des trois types de revêtements d'étanchéité. (Proposition 1=Bitume distillé renforcé en toile de jute, recouvert de béton d'asphalte; proposition 2=Bitume oxidé recouvert de sable et des dalles de béton; proposition 3=Shellkote recouvert d'un mortier, renforcé de grillages de poulaillers.)

Quelques uns des prix indiqués sont incertains, particulièrement ceux concernant la réalisation des travaux, car il est difficile de prévoir exactement à la durée de certains travaux et dans quelle mesure on utilise l'équipement matériel ainsi que le rôle joué par une certaine routine pour réaliser les différents types de revêtements d'étanchéité.

Les salaires de la main-d'œuvre ainsi que la plupart des prix des matériaux (voir annexe C) sont tirés du magazine tunisien UTICA-Flash [24]. L'estimation du temps consacré aux différentes phases des travaux, les coûts d'équipement ainsi que l'évaluation des différents frais ont été établis en collaboration avec Mr Lars Hermansson, ingénieur, antérieurement ingénieur conseil en Tunisie [9].

Une majoration de 30% a été ajoutée aux coûts de matériaux. Elle est destinée à couvrir les pertes, les transports de livraison et sur chantier, les frais généraux et les bénéfices. La majoration sur les coûts de main-d'œuvre a été estimée à 40% et concerne les coûts d'encadrement, du chantier, les frais généraux et les bénéfices.

Les devis estimatifs ont été établis en décembre 1988 et dans la monnaie du pays (1 dinar Tunisien était équivalent de 1,15 dollars Américains).

A titre de comparaison avec les coûts de ces trois propositions, on peut préciser qu'un revêtement d'étanchéité complet en Derbigum revient 12 à 15 dinars/m².

3.6 Analyse des essais d'étanchéité

Les revêtements essayés ont tous une étanchéité, une maniabilité et un prix différents. Les résultats des essais montrent généralement que le bitume chaud est plus étanche que le bitume froid, mais il exige plus d'équipement et une main-d'œuvre plus qualifiée pour la pose et revient donc plus cher.

Les données financières entrant largement en ligne de compte dans le choix d'une couche d'étanchéité, on peut se demander si l'émulsion bitumineuse n'est pas un choix plus intéressant que le bitume chaud. Le fait que l'émulsion soit moins étanche est, dans la pratique, un inconvénient mineur étant donné que le revêtement sera moins soumis aux intempéries que lors

des essais d'étanchéité (en réalité, il est peu probable que l'eau reste très longtemps sur le toit).

Il ne faut pas oublier que la technique d'essais décrite ici comporte de nombreuses limites. Lors des essais, le revêtement d'étanchéité n'a pas subi l'effet du rayonnement ultra-violet, des écarts de température, des mouvements de l'humidité ou des influences mécaniques.

Les fissures qui peuvent se produire dans le béton de base, mettent la couche étanche à rude épreuve. En raison des variations saisonnières de la température ainsi que des écarts entre les températures diurnes et nocturnes, la largeur de ces fissures varie, ce qui entraîne une charge accrue sur la couche et l'apparition de fissures dans celui-ci. Nous avons donc jugé nécessaire de compléter cette expérience par une autre où nous avons examiné les facultés d'absorption des différents produits bitumineux (voir chapitre suivant).

4. ESSAIS DE DILATATION

4.1 Développement de la technique opératoire

Etant donné que les techniques opératoires décrites au chapitre 3 ne peuvent examiner l'étanchéité des différents revêtements qu'en laissant de côté les fissures dans la couche de base ou les sollicitations climatologiques et physiques, il serait souhaitable de développer d'autres méthodes d'essai où on tiendrait compte de ces données.

En complément des premiers essais tels qu'ils sont décrits au chapitre 3, il apparaît comme essentiel d'examiner en premier lieu, la faculté d'absorption des fissures de la couche d'étanchéité. En réalité, l'importance des fissures pouvant éventuellement apparaître dans une toiture est fonction de la température. Le béton se dilate sous l'action de la chaleur et se contracte quand la température baisse. Cela implique que l'importance de chaque fissure est sujette à variations durant les différentes heures du jour et de la nuit, mais tout particulièrement suivant les saisons. Les fissures seront plus importantes en hiver et beaucoup moins en été.

Un revêtement reposant sur du béton sera donc soumis à des sollicitations importantes, sous forme de dilatation (en hiver) et de contraction (en été). Le revêtement subit donc une sorte de dilatation et de contraction cyclique. A l'issue d'un certain nombre de cycles, une rupture est appelée tôt ou tard à se produire sous la forme d'une fissure de la couche étanche, en raison de la fatigue. A quel moment cette rupture va se produire, cela dépend d'une part de l'importance de la fissure dans le support et d'autre part de la faculté de la couche étanche à résorber les fissures.

Au cours de l'hiver 1988/89, nous avons mis au point à LNTH, une méthode d'essai servant à tester la faculté d'absorption des fissures de la couche d'étanchéité. Grâce à cette méthode, décrite au paragraphe 4.2.2, on essaye d'accélérer le déroulement du temps. Dans le test, la durée d'un

cycle correspond à un jour au lieu d'un an. Il faut noter que les fissures qui se produisent en réalité dans la toiture existante pendant une période de 24 heures, et qui affaiblissent également la couche étanche, ne sont pas prises en compte. Ces mouvements de fissures sont toutefois moins grands que ceux qui varient tout au long de l'année.

Dans le chapitre 3, nous sommes arrivés à la conclusion, d'après les essais et les devis estimatifs, que l'émulsion bitumineuse était certainement la solution de couche étanche la plus réaliste, en dépit d'une étanchéité plus mauvaise que les autres produits testés. Nous avons examiné deux types d'émulsions bitumineuses, ainsi que dans quelle mesure en renforçant la couche étanche, on améliore la faculté des émulsions bitumineuses à résorber les fissures. Ce renforcement de la couche étanche peut se faire de deux façons. D'une part en y intégrant un filet en plastique, d'autre part en testant une émulsion bitumineuse à laquelle on avait ajouté des fibres.

4.1.1 Choix d'une méthode d'essai

Lorsqu'on a décidé d'examiner la faculté d'absorption des fissures de certaines couches étanches faisant l'objet d'essais d'étanchéité, nous avons remarqué qu'une certaine recherche dans ce secteur était présentée dans un article [12] publié dans *Matériaux et Constructions* 1987. On décrit une méthode examinant la faculté d'absorption des fissures de différents revêtements.

La méthode d'essai décrite se compose d'un modèle de toit en béton (0,5 m × 1,0 m), que l'on a installé à l'air libre. On a provoqué une fissure au milieu de ce "toit". A l'aide d'un système automatique, on fait varier la largeur de cette fissure en fonction de la température diurne entre 0,1 et 0,7 mm environ, chaque jour.

A LNTH, nous avons simplifié cette méthode, le dispositif de mouvements de la fissure étant différemment conçu et l'essai se déroulant en laboratoire. La méthode d'essai consiste à provoquer une fissure du revêtement dans le support. On l'agrandit et on la retrécit à la main. On enregistre d'éventuelles fissures dans la couche étanche en constatant des infiltrations d'eau.

4.1.2 Description de la méthode d'essai

La méthode d'essai pour mesurer la faculté d'absorption des fissures du revêtement comprend un toit à petite échelle composé d'une dalle de béton de dimensions 700 mm × 350 mm × 35 mm. On a ajouté au toit un bord de 20 mm de haut et d'environ 30 mm de large courant autour de la dalle (ce bord est plus large vers le bas que vers le haut, afin de faciliter le démoulage après le coulage). Voir plus loin la figure 4.1. Le béton est de qualité relativement bonne et étanche (résistance à la compression sur cube est de 40 MPa).

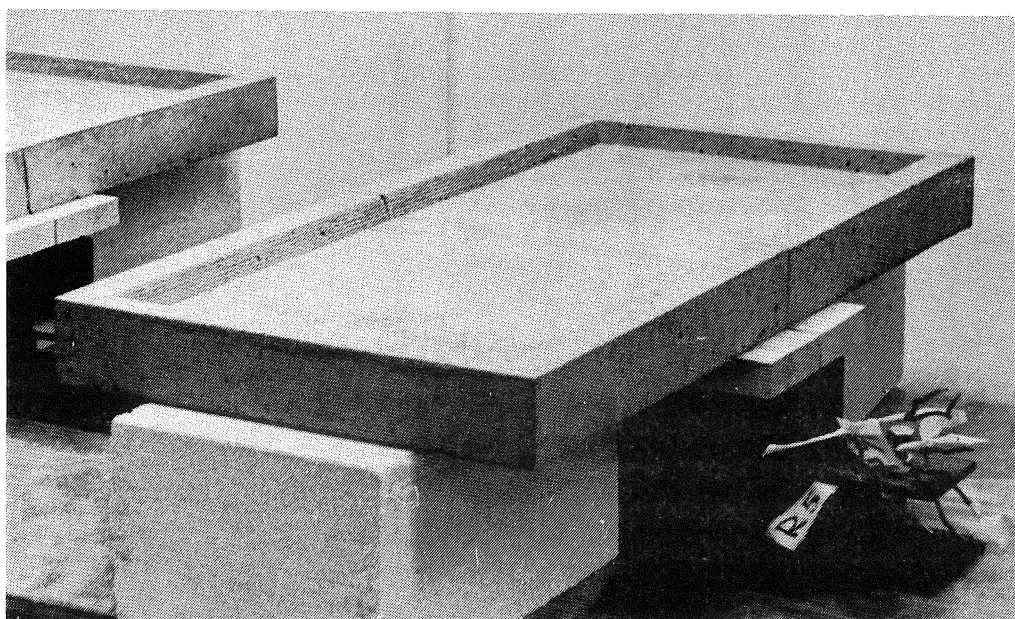


Fig. 4.1. Toit d'essai reposant sur des blocs de béton cellulaire.

On divise la dalle au milieu en deux moitiés avec une barre d'aluminium de 1 mm d'épaisseur, placée parallèlement aux côtés petits du toit. Elle ne divise toutefois pas entièrement la dalle, mais libère 5 mm près de la surface supérieure du toit. On provoque sur celle-ci une fissure en plaçant dans le moule une mince plaque de métal (0,1 mm) destinée à provoquer une fente d'environ 2 mm de profondeur dans le béton. Il subsiste une bande de 3 mm qui n'est pas divisée et qui réunit les deux moitiés du toit. Cette bande se fissure d'elle-même lorsque, plus tard, au moyen du dispositif décrit ci-

dessous, on agrandit la fissure en soulevant la partie centrale de la dalle. On a cherché à avoir sur la surface du toit, une fissure droite, régulière et pas trop large.

Sous la dalle, de chaque côté de la fissure, il y a deux planches (20 mm × 80 mm × 400 mm). Celles-ci sont fixées au béton par des clous et rattachés à leur tour aux filets de renforcement qui renforce les deux moitiés de dalle. Les planches sont reliées entre elles par trois charnières pour maintenir ensemble les deux moitiés de toit. On a enfoncé dans une des planches cinq paires de clous selon la figure 4.2.

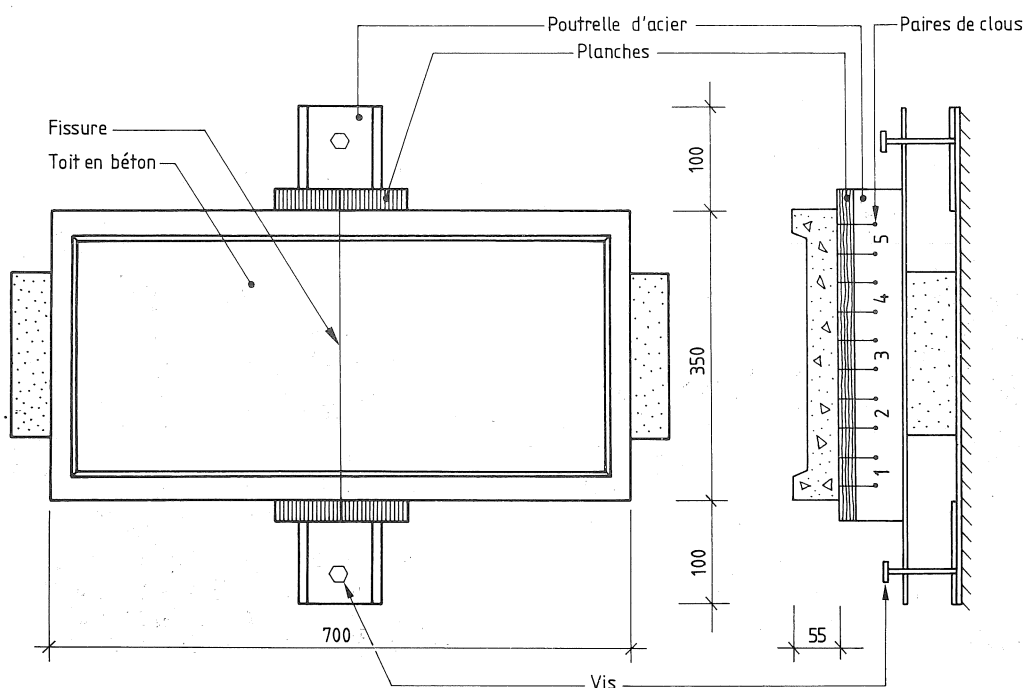


Fig. 4.2. Vue et coupe du toit et du dispositif de dilatation de la fissure.

En reliant à un humidimètre électronique, on peut mesurer le quotient d'humidité dans la planche - c'est à dire le poids de l'eau par rapport au poids du matériau (%) - dans la partie où on a enfoncé les paires de clous dans la planche. Tous les clous sont entièrement enfoncés dans la planche de façon à ce que leurs pointes soient en contact avec le béton dans la partie inférieure du toit. L'eau qui séjourne sur le toit permet de surveiller une éventuelle infiltration dans le revêtement, car il y a alors une augmentation

du quotient d'humidité dans la planche. On peut également localiser une infiltration en observant près de quelle paire de clous on a enregistré une augmentation du quotient d'humidité. Le quotient mesuré pour chaque paire de clous est transcrit sur le compte-rendu des essais. Celui-ci figure à l'annexe B.

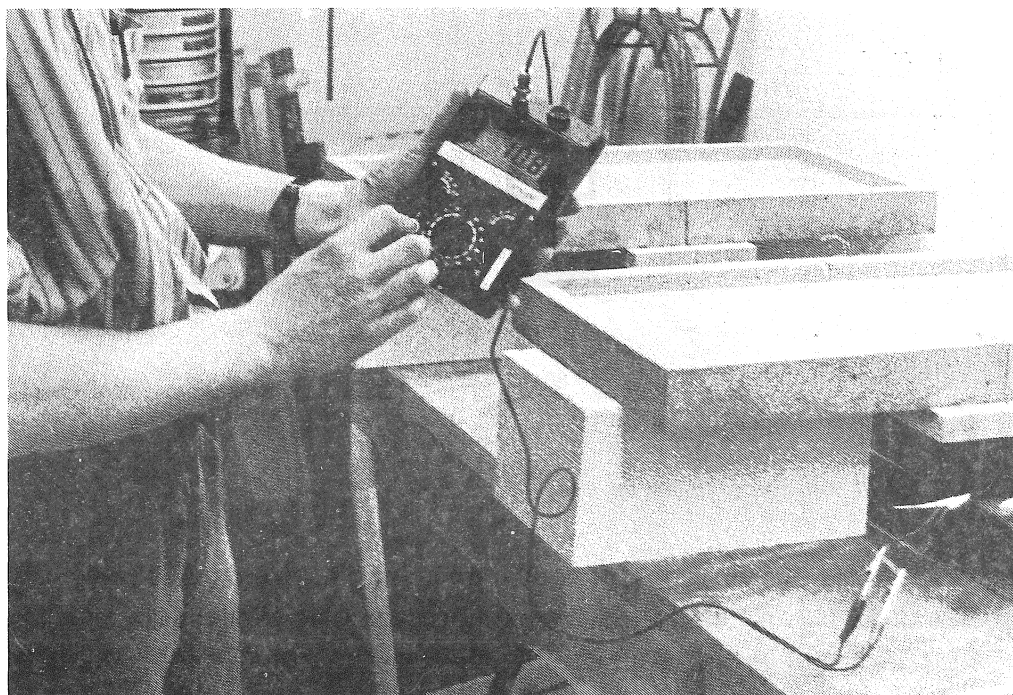


Fig. 4.3. Mesure du quotient d'humidité à l'aide de l'humidimètre électronique dans la planche de bois sous le béton.

Le toit est moulé en contreplaqué réutilisable. Après conservation du toit en béton au moins une semaine, on le place, après démoulage, sur deux blocs de béton cellulaire (150 mm de hauteur), qui reposent à leur tour sur une table. La fissure s'élargit et se retrécit en soulevant et en abaissant la partie centrale de la dalle. Ces deux opérations se font à l'aide d'une poutrelle d'acier en U, placée sous le centre du toit. Voir fig. 4.4.

On règle la hauteur de la poutrelle à l'aide de vis qui se trouvent aux extrémités de celle-ci. Quand on élève la poutrelle, on presse ses rebords contre les planches sous la dalle, la fissure s'élargissant alors en fonction du nombre de tours de vis donnés. On règle la taille maximale de la fissure

choisie, en donnant des tours de vis tout en examinant la largeur de la fissure dans un microscope à fissures. On bloque ensuite les vis avec deux écrous de façon que la fissure ne puisse s'élargir au-delà des dimensions maximales souhaitées.

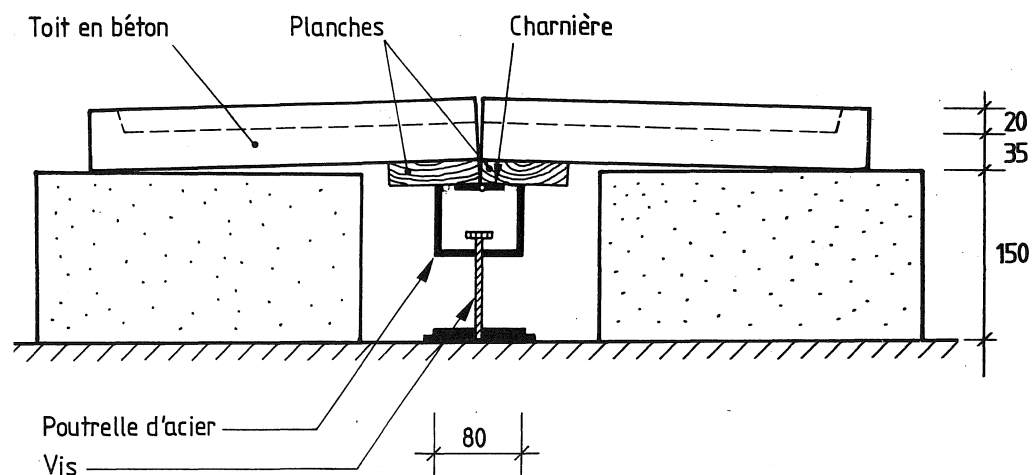


Fig. 4.4. Toit de côté avec la fissure ouverte.

Les extrémités des vis reposent contre un acier plat fixé dans la table, parallèlement à la poutrelle en U. Deux morceaux d'acier plat sont soudés à ses deux extrémités, et ils sont équipés chacun d'un trou du même diamètre que les vis. Ces deux morceaux ont pour fonction de veiller à ce que la poutrelle en U ne se déplace que verticalement, en s'élevant ou en s'abaissant.

4.2 Essais avec des couches étanches différents

A l'aide du dispositif d'essai décrit, on peut examiner la faculté d'absorption des fissures des différents couches d'étanchéité. On a examiné les deux émulsions bitumineuses les plus courantes et les moins chères en Tunisie, le Derbicote et le Flintkote (ou Shellkote). Ces produits sont de pures émulsions bitumineuses, sans additifs sous forme de fibres ou autres.

Etant donné qu'il n'existe pas pour l'instant dans le pays d'émulsions bitumineuses avec des fibres, on a examiné une variante suédoise de Flintkote avec fibres. La faculté d'absorption des fissures des émulsions bitumineuses sans fibres devraient cependant être améliorées en les renforçant avec un filet plastique ou de la toile de jute. On peut facilement trouver à travers tout le pays des filets plastique de différentes tailles et il existe même des filets si fins qu'on peut s'en servir comme élément de renforcement. On a essayé les types suivants de couches étanches:

Essai no	couche étanche
1	1 mm de Derbicote
2	1 mm de Derbicote renforcé de filet plastique
3	1 mm de Flintkote
4	1 mm de Flintkote avec ajout de fibres

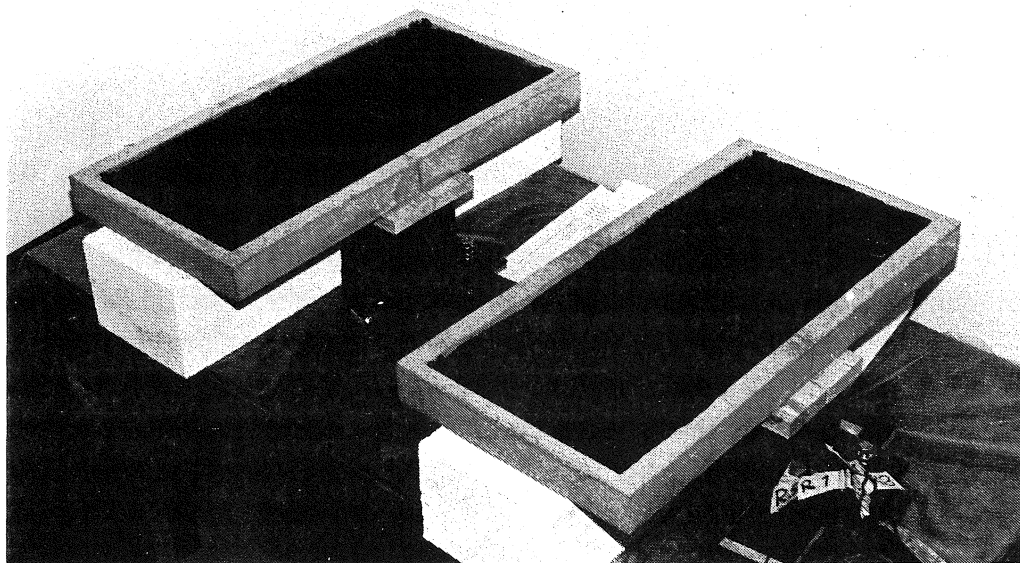


Fig. 4.5. Deux toits recouverts d'une couche d'émulsion bitumineuse.

Chacun des revêtements a été appliqué sur deux toits, voir figure 4.5. On a fixé l'épaisseur du revêtement par rapport au poids volumétrique et en cal-

culant ensuite le poids de l'émulsion nécessaire pour correspondre à une hauteur de 1 mm à la surface du toit. Il s'est avéré que l'épaisseur de 1 mm, correspondait assez exactement à trois couches, sauf pour l'essai quatre, où deux couches de Flintkote avec ajouts de fibres ont suffi, étant donné qu'il est un peu plus épais. Les trois couches et les deux couches ont été appliquées perpendiculairement.

Les dimensions de la fissure du toit varient à chaque essai du minimum au maximum. La différence, l'écart net, représente la distance recouverte par la couche étanche lorsque la fissure s'ouvre. Les dimensions de la fissure minimale varient malheureusement beaucoup. C'est dû au fait qu'il a été difficile de démouler le toit après son coulage sans risquer d'élargir la fissure. Elle a varié de 0,05 mm à 0,75 mm. Cela a contribué en partie, à influencer les résultats des essais. (Les importantes fissures initiales peuvent être évitées en les remplissant de pâte de ciment. C'est ce qu'on a fait avec le toit 3B et 4B, dont la fissure initiale a ainsi été ramenée à 0,00 mm.)

En général, la fissure du toit était ouverte pendant 8 heures et fermée soit pendant 8 heures, soit pendant 16 heures. Le temps d'ouverture et de fermeture de la fissure était respectivement de 5, 10 et 15 minutes pour des écarts nets respectivement de 0,6, 1,0 et 1,4 mm.

L'agrandissement de la fissure sur le bord entourant le toit est plus important que celui sur la couche de surface supérieure du toit lorsqu'on soulève la partie centrale de celui-ci, car la distance jusqu'aux charnières est plus grande, voir fig. 4.4. Cela rend plus difficile la possibilité d'avoir de l'eau stagnante sur le toit durant le déroulement des essais. C'est pourquoi dans l'essai no 1 on a versé de l'eau sur le toit tous les cinq cycles. Avant chaque opération, on rendait la fissure du bord étanche, avec de la graisse silicone. Le problème se trouva résolu pour les essais suivants, du fait que la graisse de silicone s'avéra maintenir le bord parfaitement étanche, malgré les dilations et les contractions de la fissure. On décida donc de laisser l'eau stagner sur le toit, durant les essais. On recouvrit complètement la fissure d'eau sous une importante quantité d'eau, voir figure 4.6. On mesura, à intervalles réguliers, le quotient d'humidité de la planche sous chaque toit d'essai, et avec de l'eau stagnante sur la couche étanche. Si, au bout de dix cycles, on ne constatait pas d'infiltrations, on agrandissait l'écart net.

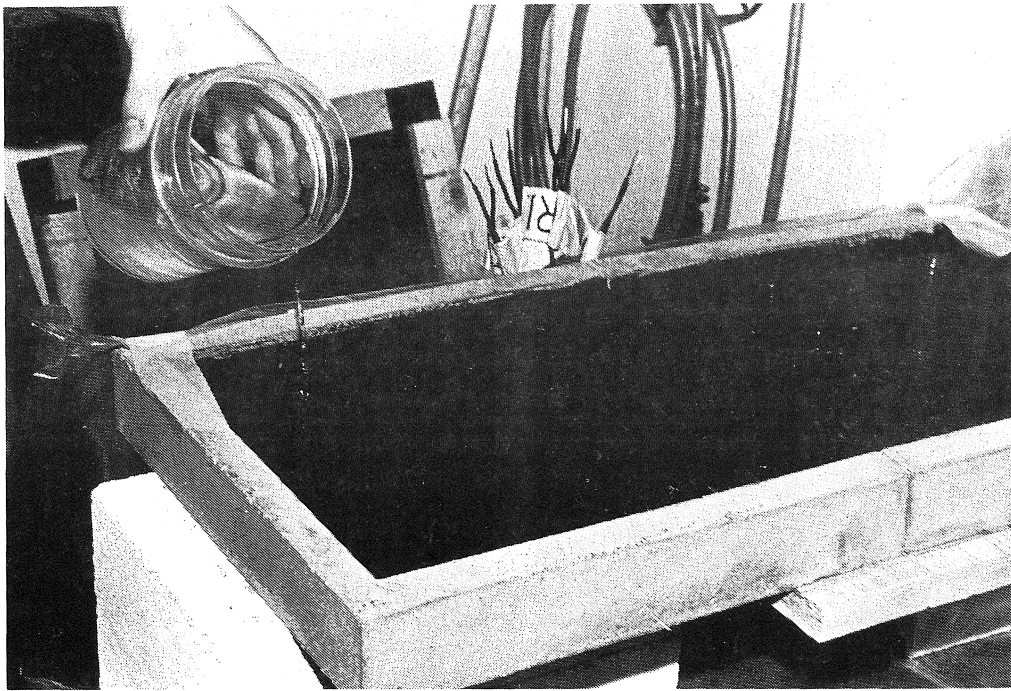


Fig. 4.6. Recouvrement du revêtement avec de l'eau.

4.2.1 Essai no 1

Au cours du premier essai, nous avons examiné une couche de 1 mm d'épaisseur de Derbicote qui avait été appliquée sur les toits d'essai 1 et 2. Les deux toits de l'essai no 1 étaient différents quant à la fissure initiale. La largeur de la fissure initiale du premier toit était 0,10 mm alors que celle du 2ème toit était de 0,05 mm.

Les essais avaient tout d'abord pour objectif d'ouvrir et de fermer la fissure à cinq reprises. La fissure restait ouverte pendant 8 heures et fermée 16. Au bout d'un cycle (toit no 1A) et de deux cycles (toit no 1B), on a déjà pu observer des tendances au fissurage de la couche étanche lorsque la fissure du support était ouverte. Bien qu'à l'œil nu la fissure dans la couche étanche ait semblé percé de trous, le microscope à fissures ne permit de déceler aucun trou traversant la couche. En position contractée, on ne voyait pas de trou du tout, mais le bitume recouvrant la fissure de dessous indiquait un phénomène d'écoulement, conséquence des fissures.

Au bout des cinq premiers cycles, on a versé de l'eau sur les deux couches étanches. La fissure était alors fermée et celle du bord avait été rendue étanche à l'aide de graisse de silicone. On a mesuré le quotient d'humidité pour déceler toute infiltration éventuelle. Pour le toit no 1A, on a noté une légère augmentation du quotient d'humidité de paire de clous no 3. Le quotient des autres a aussi progressivement augmenté.

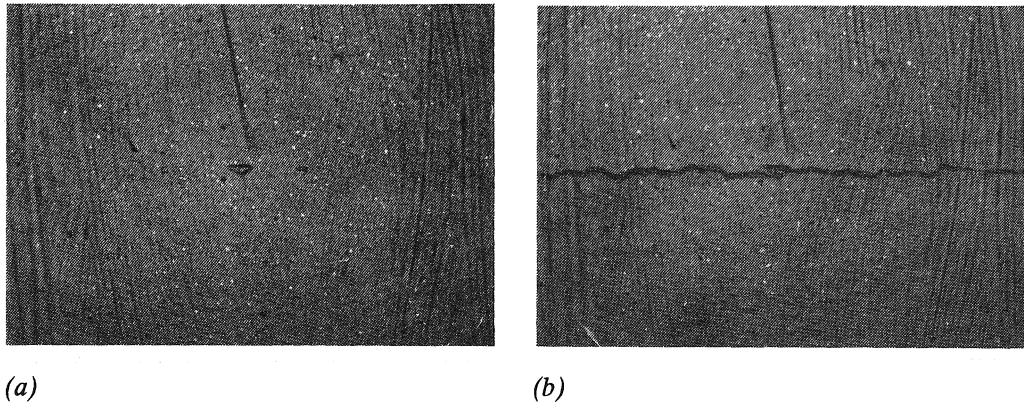


Fig. 4.7. Derbicote avec fissure refermée (a) et ouverte (b).

Le toit no 1B, par contre, ne montrait aucune tendance aux infiltrations et c'est pourquoi son revêtement subit cinq nouveaux cycles, la fissure de dessous ayant les mêmes dimensions. Au bout de dix cycles au total, on a versé de l'eau sur la couche étanche pour la deuxième fois, mais celui-ci est resté toujours étanche.

On dilata la fissure alors qu'il y avait toujours de l'eau stagnante sur la couche étanche, afin de vérifier si, lors des mesures, le fait que la fissure était contractée avait une influence sur l'étanchéité. Cela n'avait pas non plus d'influence sur la perméabilité, puis on assécha l'eau et on régla les vis d'arrêt de façon à augmenter l'écart net de la fissure à 1,00 mm. On entama une nouvelle série de cycles où la fissure sous la couche étanche était dilatée pendant 8 heures et contractée pendant 8 autres heures. Au bout de deux cycles, on estima que la fissure commençait déjà à être infiltrée et, lorsqu'on y eut ajouté de l'eau, celle-ci passa immédiatement à travers la fissure.

4.2.2 Essai no 2

Le deuxième essai était différent du premier du fait qu'une quantité de Derbicote identique à l'essai no 1 était à présent renforcée par un filet en plastique. On installa ce filet en plastique, dont le prix en Tunisie est de 0,7 Dinars/m² (ce qui est l'équivalent de 0,8 Dollars US), après avoir préalablement badigeonné une couche de Derbicote. On appliqua ensuite deux couches perpendiculaires, l'une par rapport à l'autre, sur le filet. Ce filet avait une épaisseur de 0,3 mm et était entièrement recouvert d'émulsion bitumineuse. Le filet apparaissait cependant à la surface de la couche étanche. On régla le dispositif de dilatation de la fissure, de manière à avoir un écart net de 1,00 mm, c'est à dire plus important que dans l'essai no 1, et ce dès le début. La fissure initiale du troisième toit d'essai était de 0,75 mm tandis que celle du quatrième toit était de 0,60 mm. Donc, deux fissures initiales relativement importantes.

Au cours des cinq premiers cycles, la fissure demeura dilatée pendant 8 heures et contractée 16 (sauf entre le quatrième et le cinquième cycle où la fissure demeura contractée 80 heures, et pendant le cinquième cycle où elle resta dilatée 24 heures). En position dilatée, la couche étanche ne manifesta aucune tendance à la fissuration. Il semblait que l'association du filet et de l'émulsion bitumineuse était particulièrement heureuse. Lorsque la fissure était contractée, le filet se relevait pour former un pli, voir fig. 4.8 (a), ceci étant certainement dû au fait que le filet avait été tiré si fort en se dilatant de 1 mm (ensuite de 1,40 mm), qu'il avait subi une déformation plastique.

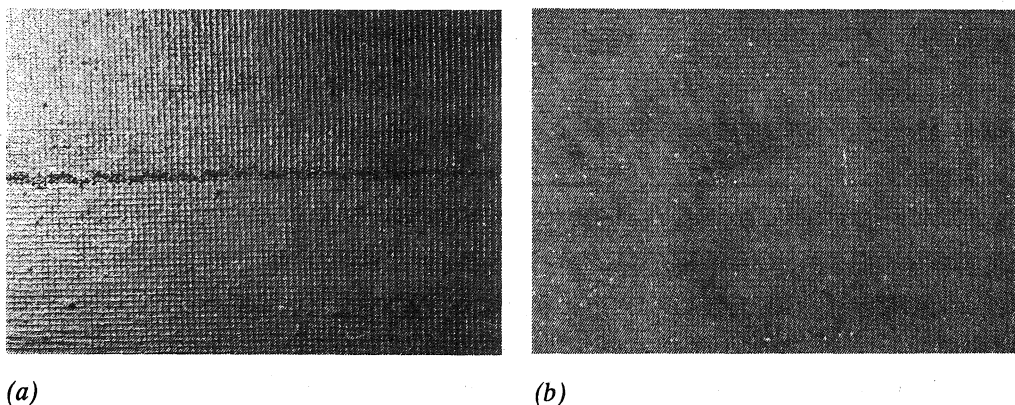


Fig. 4.8. Derbicote renforcé de filet plastique avec une fissure refermée (a) ainsi qu'une fissure ouverte (b).

Ni le toit no 2A, ni le no 2B, n'avait laissé passer d'eau, au bout des cinq premiers cycles, et on put ainsi entamer cinq nouveaux cycles. Mais même au bout de dix cycles, on n'avait observé d'infiltrations dans la couche étanche. L'écart net s'élargit à 1,40 mm avant d'entamer cinq nouveaux cycles avec de l'eau stagnante sur le toit. Lorsque la fissure était dilatée, on commença à distinguer des tendances à la fissuration dans la couche étanche, l'émulsion bitumineuse semblant perdre l'adhésion au filet qui commença à apparaître, mais ce n'est qu'au bout de cinq cycles et demi (toit no 2A) et de trois cycles et demi (toit no 2B) que l'eau a commencé à s'infiltrer. Pour le toit no 2A, l'infiltration s'est produite au milieu de la fissure du toit d'essai. L'infiltration du toit no 2B s'est produite d'un côté pour se prolonger ensuite le long de toute la fissure.

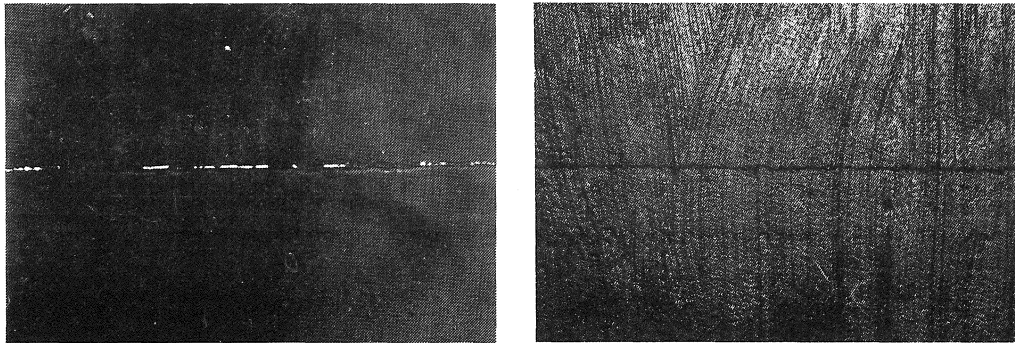
4.2.3 Essai no 3

Au cours du troisième essai nous avons examiné le Flintkote, appliqué sur les toits 3A et 3B sur une épaisseur de 1 mm. Pour le toit 3A, la fissure initiale était de 0,40 mm, alors que celle du toit 3B était de 0,00 mm (cette dernière a été obtenue en remplissant de pâte de ciment une fissure initiale assez importante, d'environ 1 mm). Les résultats du chapitre 4.3 montrent que la largeur de la fissure initiale peut avoir eu une certaine importance, mais cela est incertain.

Pour les deux toits, la fissure est restée tour à tour ouverte et fermée 8 heures par cycle. Le Flintkote se différenciait du Derbicote en ce que la couche d'étanchéité n'avait pas l'air d'être percé de trous lorsque la fissure du toit était ouverte. Par contre on pouvait apercevoir une légère fissure dans le revêtement, parallèle à la fissure de la couche inférieure. Cette fissure dans la couche étanche a disparu lorsque la fissure s'est refermée. Celle-ci est apparue dès le premier cycle mais elle n'était probablement pas descendue au support, puisqu'aucun des revêtements des toits 3A et 3B ne laissèrent passer d'infiltrations avant un certain temps.

La fissure était recouverte d'eau pendant la durée des essais. La couche étanche du toit 3A était déjà infiltré au bout de 4 cycles et demi, avec une fissure nette du support de 0,60 mm, tandis que le toit 3B était intacte au bout de 10 cycles, avec la même fissure nette du toit et sans l'apparition d'infiltrations. La fissure nette du toit 3B passa alors à 1,00 mm, avec l'ap-

parition de nouveaux cycles. Au bout de 3 cycles et demi le revêtement se brisa et l'eau passa à travers. La fracture se produisit en plusieurs endroits le long de la fissure.



(a)

(b)

Fig. 4.9. Flintkote avec fissure ouverte (a) ainsi que Flintkote renforcé par fibres, fissure ouverte (b).

4.2.4 Essai no 4

Au cours du quatrième et dernier essai, nous avons examiné la capacité de recouvrir des fissures de 1 mm d'épaisseur de Flintkote avec ajout de fibres. Cette émulsion bitumineuse, renforcée avec des fibres, a une consistance plus pâteuse que le Flintkote ordinaire. C'est pourquoi il n'a été nécessaire de n'appliquer que deux couches respectivement sur les toits 4A et 4B pour arriver à une épaisseur de 1 mm.

La fissure initiale du toit 4A était de 0,75 mm alors que celle du toit 4B était de 0,00 mm (obtenue de la même façon que celle du toit 3B, voir chapitre 4.2.3). Pendant la durée de l'expérience, nous avons gardé ouverte la fissure du toit durant 8 heures, et fermée le même nombre d'heures.

Au début de l'essai, une fissure est apparue dans le revêtement, lorsque la fissure était ouverte, comme dans le cas du Flintkote non traité. Les deux revêtements du toit d'essai n'ont pu supporter que 4 cycles de charge avec une fissure nette du support de 0,60 mm. Cela est d'autant plus notable qu'un des avantages attendus du mélange de fibres à l'émulsion bitumineuse est justement d'améliorer la capacité d'absorption des fissures.

4.3 Compte-rendu des résultats

Une comparaison entre les facultés d'absorption des fissures des couches étanches figure sur le tableau 4.1. Il apparaît sur ce tableau la quantité de cycles nécessaires pour que le revêtement soit infiltré ainsi que l'importance de la dilatation du revêtement. On y retrouve également ce qui concerne la fissure initiale de chaque toit.

Essai no	Revêtement	Toit d'essai	Fissure initiale	Ecart net	Nombre de cycles avant infiltration
1	Derbicote	1A	0,10	0,6	≤ 5*
		1B	0,05	0,6	10
					1,0
2	Derbicote renforcé avec filet plastique	2A	0,75	1,0	10
		2B		1,4	5,5
			0,60	1,0	10
			1,4	3,5	
3	Flintkote	3A	0,40	0,6	4,5
		3B	0,00	0,6	10
					1,0
4	Flintkote renforcé avec fibres	4A	0,75	0,6	4
		4B	0,00	0,6	4

*) Pour l'essai no 1, on a versé de l'eau sur le toit d'essai tous les cinq cycles, et il est donc difficile de préciser exactement au bout de combien de cycles il y a eu infiltration dans la couche étanche du toit no 1A.

**) Après dilatation de la fissure du toit no 1B, on a déjà versé de l'eau après deux cycles car on soupçonnait une infiltration (fissures apparentes dans la couche étanche)

Tableau 4.1. Comparaison entre les facultés d'absorption des fissures des couches étanches.

Bien qu'on ait examiné seulement deux toits pour chaque couche étanche, les résultats sont probablement fiables, étant donné que les différences internes entre toits du même type sont très faibles. On aurait naturellement obtenu un résultat plus sûr, avec plusieurs toits par type de couche étanche. La plus grande différence individuelle existe entre les toits 1A et 1B ainsi qu'entre le 3A et le 3B. Cette différence trouve son origine dans la grande différence existant dans les dimensions de la fissure initiale. Pour ce qui est

du Flintkote renforcé sur les toits 4A et 4B, ces derniers ont eu des infiltrations au bout du même nombre de cycles, malgré une importante différence de fissure initiale.

On peut affirmer que, généralement, une fissure initiale importante entraîne un résultat moins bon qu'une petite. Il est à noter que celle recouverte de Derbicote renforcé par le filet en plastique, était moins sensible aux fissures initiales importantes.

La couche étanche de Derbicote renforcé sur les toits 2A et 2B présentent clairement le meilleur résultat. Ces revêtements supportent des fissures plus importantes et des cycles plus nombreux que les autres revêtements.

4.4 Analyse des essais de fissuration

Il faut noter que les résultats d'essais rapportés au paragraphe 4.3 traitent d'essais réalisés en laboratoire, à température à peu près constante. Les toits n'ont cependant pas été exposés au rayonnement ultra-violet ou à des variations importantes de température. Les toits n'ont pas non plus été soumis à une sollicitation mécanique.

Grâce à la réalisation de ces essais, on est arrivé à une comparaison entre les différents types de revêtement.

L'émulsion bitumineuse, dans ce cas-là le Derbicote, renforcé par un filet en plastique, possède les meilleures capacités à recouvrir les fissures. Bien que les essais aient été réalisés avec une fissure nette du support plus importante que les autres, ce revêtement a supporté le plus grand nombre de cycles.

Pour ce qui est des autres propositions, revêtements des toits dans les essais 1, 3 et 4, la différence est si faible qu'on ne peut décider quel est le meilleur revêtement sur la seule base de ces essais. Si on compare le renforcement avec filet en plastique et celui avec les fibres, le renforcement en plastique donne les meilleurs résultats.

La conclusion des essais concernant les fissures est donc qu'un revêtement d'émulsion bitumineuse possède une meilleure faculté d'absorption des fissures s'il est renforcé d'un filet en plastique du même type utilisé ici.

Le prix de cette amélioration est de 0,7 Dinars par m^2 , tandis que les frais de main-d'œuvre sont évalués à environ 0,12 Dinars par m^2 (le pourcentage de l'entrepreneur non compris). Si on ajoute ce supplément (30% sur les matériaux et 40% sur la main-d'œuvre), le prix de revient d'un revêtement d'étanchéité selon la proposition 3 dans le chapitre 3 (voir tableau 3.1, page 72), passerait de 6^D145/ m^2 à 7^D850/ m^2 si l'émulsion bitumineuse est renforcée et si on applique une troisième couche.

5. CONCLUSIONS

5.1 Conclusions partielles

5.1.1 Causes des infiltrations d'eau à travers les toitures

L'inventaire qui a été réalisé au début du projet et qui a été détaillé au chapitre 2, a confirmé que les infiltrations d'eau à travers les toitures plates est, en Tunisie, un problème non négligeable. Ces infiltrations provoquent un tas d'inconvénients dans les logements tout en endommageant progressivement l'ensemble de la toiture. En outre, il ressort des interviews avec les habitants que leurs moyens financiers pour améliorer leurs toitures sont des plus limités.

Les constructions porteuses des toitures ne sont normalement pas étanches. Cela est le cas même lorsque le béton est l'élément porteur. Il est difficile de fabriquer du béton étanche en raison du manque de granulats avec une distribution granulométrique voulue. Lorsqu'on n'utilise pas de revêtement d'étanchéité, ou que celui-ci est de mauvaise qualité ou en mauvais état, il s'ensuit alors des infiltrations d'eau. Il est également courant de constater l'apparition de fissures dans les toitures. Cela est dû à un certain nombre de facteurs, dont certains sont si graves que des solutions adéquates peuvent difficilement leur être apportées à court terme. Tel est le cas, par exemple, des fissures causées par l'affaissement des sols.

Les conclusions de cet inventaire étaient, qu'à court terme, il était difficile de rendre étanche la partie porteuse de la toiture. Notre travail s'est donc orienté vers la recherche d'une solution au problème de l'étanchéité qui serait indépendante du type de construction et de la qualité de la partie porteuse. Il s'agissait donc de rechercher un revêtement étanche susceptible d'améliorer l'étanchéité tant des toits déjà existants que de ceux à

construire. Ce revêtement ne devrait pas revenir trop cher et on devrait pouvoir en trouver les composants sur place.

5.1.2 Expériences issues de différents revêtements

Les revêtements ont été tout d'abord examinés du point de vue de leur étanchéité. Sur les trois propositions examinées, il s'avère que le bitume chaud, sous la forme d'un bitume oxydé et distillé, s'est révélé plus étanche que l'émulsion bitumineuse. Il est cependant moins pratique d'utiliser du bitume chaud, étant donné que ces produits doivent être chauffés avant leur utilisation. Le bitume oxydé était particulièrement difficile à utiliser, car il se solidifie très rapidement lorsqu'on s'arrête de le chauffer. Le bitume distillé est d'une utilisation plus facile, mais, tout comme le bitume oxydé, il demande un équipement supplémentaire pour le chauffer.

L'émulsion bitumineuse, un bitume froid, ne nécessite aucun chauffage et il n'est pas nécessaire d'avoir recours à du personnel spécialisé pour son application, comme cela est le cas pour un bitume chaud. Ce qui contribue à diminuer les frais de main-d'œuvre. Pour ce qui est du matériau, le prix du bitume distillé ne représente que le tiers de l'oxydé (prix/kg). Le bitume froid est un peu plus cher que le bitume oxydé. La conclusion des tests d'étanchéité, l'expérience pratique et les estimations des coûts effectuées au chapitre 3, font que l'émulsion bitumineuse, malgré un prix relativement élevé, est d'une utilisation si simple qu'elle constitue une meilleure variante que les deux sortes de bitume chaud.

Les éventuels revêtements de toitures sont soumis à rude épreuve par les variations de température. Il a été démontré que l'on pouvait améliorer la capacité du revêtement à recouvrir des fissures dans le support. Les essais ont été effectués uniquement avec du bitume froid sous forme d'émulsion. Des essais comparatifs entre différentes sortes d'émulsions bitumineuses, renforcées et non renforcées, ont fait l'objet de rapports détaillés au chapitre 4. On a constaté qu'une émulsion bitumineuse possède une bien meilleure faculté d'absorption des fissures lorsqu'elle est renforcée avec un filet en plastique. Par contre, l'émulsion bitumineuse renforcée de fibres n'a pas une meilleure capacité à recouvrir les fissures que l'émulsion ordinaire. Le prix, frais de main-d'œuvre inclus, pour un revête-

ment étanche d'émulsion bitumineuse est de 30% plus cher s'il est renforcé.

5.1.3 Appréciation sur les trois couches de protection proposées

Etant donné que la durée de vie d'un revêtement d'étanchéité bitumineux diminue lorsqu'il est soumis à un rayonnement solaire et qu'il est de plus endommagé lorsqu'on marche dessus, on a proposé de le protéger.

La différence est minime en ce qui concerne les prévisions des coûts de réalisation d'une couche protectrice selon les trois propositions dans le chapitre 3. Il est également difficile de déterminer quelle est la proposition qui, en pratique, est la meilleure, aucun test à échelle réelle n'ayant été réalisé. Il est en tout cas clair que le béton d'asphalte exige une main-d'œuvre qualifiée et un équipement plus considérable. Il ne sera pas pour autant meilleur marché que les autres propositions, malgré qu'on utilise un matériau moins cher. Mais étant donné qu'il est en lui-même relativement imperméable et moins sujet à fissuration que le mortier, il devrait constituer un revêtement de protection particulièrement bon. Sa couleur noire constitue cependant un inconvénient, car il attire la chaleur. On peut toutefois abaisser la température en utilisant des granulats minéraux clairs sur la surface ou en appliquant chaque année une couche de chaux.

On estime que la proposition de dalles de béton dans le sable est meilleur marché que les deux autres. L'inconvénient de cette proposition est que le poids est excessif et que les grains de sable vont, avec le temps, être absorbés par le revêtement et peut-être même en détériorer les qualités.

Le mortier constitue sans aucun doute la meilleure alternative, étant donné qu'on l'utilise déjà comme revêtement extérieur pour de nombreux toits en Tunisie (souvent par-dessus la forme de pente pour former une pente régulière vers les évacuateurs). De plus leur surface est claire et reflète donc la chaleur. Le problème que nous avons constaté avec l'utilisation du mortier comme couche supérieure est qu'il se fissure à cause des variations de température et de mouvements dans le support. Cela a fait que de gros morceaux se sont détachés, découvrant ainsi la construction de dessous. On a donc recommandé de renforcer le mortier par du grillage de poulailler précisément pour prévenir l'apparition de trous dans cette couche protectrice.

5.2 Résumé

Une solution réaliste consiste à utiliser un revêtement d'étanchéité constituée par une émulsion bitumineuse qui devrait toutefois être renforcée de façon à pouvoir mieux résister aux mouvements du support. La proposition conseille de recouvrir l'émulsion bitumineuse d'une couche de mortier. Cette dernière devrait aussi être renforcée, dans ce cas là avec du grillage de poulailler. Cette proposition vaut aussi bien pour des maisons neuves que pour des maisons déjà existantes et n'ayant pas de revêtement étanche. La réalisation de ce revêtement de toiture devrait revenir de 7 à 8 Dinars/m² (décembre 1988), ce qui de 40 à 45% moins cher que le revêtement en Derbigum. Ces dépenses montent à 2 (standing) à 10% (logement populaire) du coût total du logement d'un niveau.

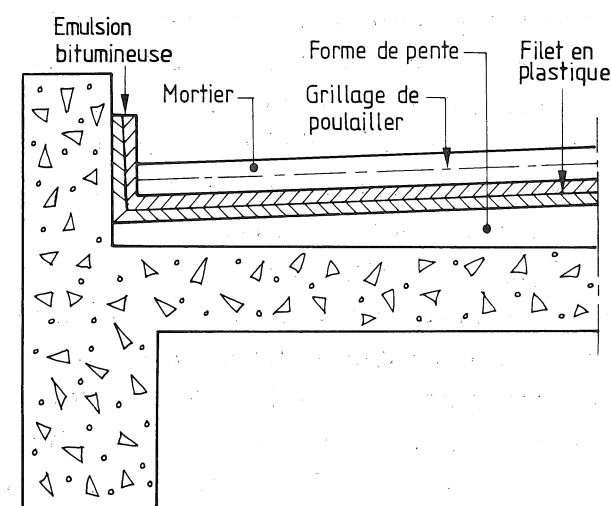


Fig. 5.1. La solution choisie.

D'autres mesures pouvant, à court terme, améliorer l'étanchéité des toitures, est d'éviter l'apparition de ce qu'on appelle un retrait plastique dans les cas où le béton fait partie de l'élément porteur. Des fissures de retrait apparaissent en raison d'un séchage trop rapide durant le durcissement et on peut les éviter en évitant de couler le toit pendant la saison chaude. De

plus on peut protéger le béton frais d'une dessiccation en l'arrosant d'eau ou en le recouvrant de plastique.

Une autre cause d'infiltrations réside dans une pente de toiture trop faible ou trop irrégulière. Ce qui entraîne une stagnation de l'eau sur le toit, entraînant un accroissement des risques d'infiltrations. On peut éviter ce risque en apportant un soin tout particulier à la réalisation de la pente du toit.

A long terme, il faut améliorer l'entretien de la toiture. Aucune revêtement d'étanchéité n'est éternelle et au bout d'un certain nombre d'années il est indispensable d'améliorer ou même de remplacer le revêtement utilisé. Notre objectif a été de trouver un revêtement qui, à condition que l'entretien soit correctement effectué, reste étanche pendant dix ans sans intervention.

5.3 La suite des travaux

La suite des travaux devrait consister à tester, sur une échelle réelle, les matériaux qui se sont révélés les plus intéressants durant les travaux du projet. Et plus particulièrement la solution décrite au point 5.2, voir fig. 5.1. Les essais à une échelle réelle soumettent les revêtements étanches à des conditions réelles pendant un temps assez long permettant ainsi de déterminer leur durée de vie. Il est même recommandé de réaliser les essais sur des toits ayant déjà des problèmes d'infiltrations. On peut ainsi avoir une mesure du degré d'amélioration.

Avec des essais réels, on peut aussi réaliser des tests à long terme concernant l'ensemble des couches de protection proposées. Il est essentiel de trouver une couche de protection qui protège efficacement la couche étanche.

On peut continuer à réaliser en laboratoire des tests destinés à étudier les capacités des différents revêtements à recouvrir les fissures. On peut également tester d'autres méthodes pour améliorer les possibilités d'absorption des fissures (d'autres types de filets de renforcement, par ex.).

6. RÉFÉRENCES

1. ANDERSSON, L.-A., ARNSBY, L., JOHANSSON, B., PERING, C., ET ÅSTRAND, J., *Une solution du problème de l'habitat en région rurale*. (Swedish Association for Development of Low-Cost Housing [SADEL], Lund, Suède, 1985) (ISBN 91-86596-07-1, en français) (ISBN 91-86596-08-X, en anglais)
2. ANDERSSON, L.-A., JOHANSSON, B., ET ÅSTRAND, J., *Torba stabilisée au ciment*. (Division d'Architecture 1B, Université de Lund, Malmö, Suède, 1982) (ISBN 91-970225-0-0, en français) (91-87014-01-7, en anglais)
3. AVDELNINGEN FÖR VÄGBYGGNAD (DIVISION CONSTRUCTION DE ROUTES), *Byggande och underhåll (Construction et entretien)*, Compendium. (Section Construction de routes, Ecole Supérieur des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède, 1985) (En suédois)
4. BRE DIGEST 144, *Toitures-terrasses: précautions à prendre en ce qui concerne les couvertures*. (Bâtiment international, 1978, Septembre/Octobre, 310-315)
5. CHRISTENSEN, I.-F., *Contact personnel*. (Skanska AB, Malmö, Suède, 1988)
6. CULLEN, W.C. ET ROSSITER JR, W.J., *New-technology roofing membranes*. (Bâtiment international, 1987, Mai/Juin, 146-156) (En anglais)
7. GROUPE DE RECHERCHE ET D'ÉCHANGES TECHNOLOGIQUES [GRET], *Toitures en zones tropicales arides*, Dossier. (GRET, Paris, France) (ISBN -2-11-084823-5)
8. HAUSHOFER, B., *Bitumen für Dachabdichtungen (Bitume pour l'étanchéité des toitures)*. (Das Dachdecker-Handwerk, numéro 5, 1978) (En allemand)

9. HERMANSSON, L.-A. (antérieurement ingénieur conseil, SIAC, Tunisie, 1957-87), *Contact personnel*. (Lund Centre for Habitat Studies [LCHS], Lund, Suède, 1988, 1989)
10. HILLERBORG, A. ET AUTRES, *Allmän kurs i Byggnadsmateriallära, del 1 (Cours général de Technique des matériaux de construction, 1ère partie)*, Compendium. (Division Matériaux de Construction, Ecole Supérieur Technique de Lund, Suède, 1983) (En suédois)
11. HÖGLUND, I., ESPLING, R ET HILDING, G., *Functional studies of flat roofs covered with butyl rubber (Etudes fonctionnelles de toits recouverts de membranes de caoutchouc butyle)*. (Département de Technologie du Bâtiment de l'Ecole Royale Polytechnique de Stockholm, Suède, 1988) (En anglais)
12. JAEGERMANN, C. ET PUTERMAN, M., *The evaluation of the crack-bridging ability of exposed roof coatings*. (Matériaux et Constructions, 1987, 20, 403-407) (En anglais)
13. JOHANSSON, E. ET KALANTARI, F., *Läckande tak i Tunisien (Toitures non étanches en Tunisie)*, Projet fin d'études. (Division Matériaux de Construction, Ecole Supérieur des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède, 1989) (En suédois) (Rapport TVBM-5013)
14. LANDAETA, G. ET LARSSON, S., *Roofs in the Warm-Humid Tropics of South-East Asia*. (Lund Centre for Habitat Studies [LCHS], Université de Lund, Suède, 1987) (En anglais) (ISSN 0281-298X)
15. LARSSON, R., *Contact personnel*. (Nynäs Petroleum, Nynäshamn, Suède, 1988)
16. LOPEZ DIAZ, M.P., *Roofs in developing countries, a first approach at performance classification on watertightness and durability*. (Building Research and Practice, 4, 1988) (En anglais)
17. NYNÄS PETROLEUM, *Bitumen Emulsion (Les émulsions bitumineuses)*. (AB Nynäs Petroleum, Suède) (En suédois)
18. ROSENLUND, H., *Design of Energy Efficient Houses in a Hot and Arid Climate*. (Lund Centre for Habitat Studies [LCHS], Université de Lund, Suède, 1989) (En anglais) (ISBN 91-87866-01-3)

19. SANDIN, K., *Contact personnel*. (Division Technique de Construction du Bâtiment, Ecole Supérieur des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède, 1988)
20. STANDARDISERINGSKOMMISSIONEN I SVERIGE [SIS], *SIS 92 35 11; Golvmaterial, bedömning av vattentäthet (Types de revêtements de sols, examen d'étanchéité)*. (SIS, Stockholm, Suède, 1974) (En suédois)
21. STATENS VÄGVERK (LA DIRECTION GÉNÉRALE DES ROUTES), *Byggnadstekniska föreskrifter och allmänna råd 1984 [BYA 84] (Dispositions techniques sur la construction et conseils généraux)*. (Statens Vägverk, Suède, 1984) (En suédois)
22. SVENSK BYGGTJÄNST ET CEMENTA AB, *Betonghandbok (Manuel sur le béton), Material (Matériaux)*. (AB Svensk Byggtjänst, Stockholm, Suède, 1982) (En suédois) (ISBN 91-7332-060-9)
23. SVENSK BYGGTJÄNST, *HusAMA 83 (Description générale des matériaux et du travail de construction de maisons)*. (AB Svensk Byggtjänst, Stockholm, Suède, 1983) (En suédois) (ISBN 91-7332-164-8)
24. UNION TUNISIENNE DE L'INDUSTRIE, DU COMMERCE ET DE L'ARTISANAT [UTICA], *UTICA-Flash*, Bulletin. (UTICA, Tunis, Tunisie, Octobre, 1988)

PIÈCES ANNEXES

Séminaire “Ciments et Bétons”

Dans le cadre du projet nous avons organisé également un séminaire destiné à élargir encore les contacts entre la Tunisie et la Suède.

Pour bien cerner le thème du séminaire, nous avons choisi le titre “Ciments et Bétons”, ce qui constitue en soi un secteur très vaste. Ce thème revêt un grand intérêt à la fois pour la Tunisie et pour la Suède. De plus, il a été possible de trouver des chercheurs internationalement reconnus appartenant tant à l'ENIT qu'à LNTH, pour tenir des conférences.

Le séminaire a duré deux jours avec participation de chercheurs tunisiens et suédois. Le programme, ainsi que des résumés des différentes communications, se trouvent, dans leur intégralité, à la fin de cet additif. Des invitations ont été adressées aux représentants de l'industrie tunisienne, aux grandes écoles, et aux autorités administratives et autres.

Le séminaire s'est tenu les 1er et 2 juin à l'ENIT, et pendant ces deux jours, au total près de cent personnes y ont participé. Sans exagérer, on peut affirmer que ce séminaire a été couronné de succès tant pour ce qui est de la coopération entre l'ENIT et LNTH, que de l'élargissement des connaissances dans le secteur du ciment et du béton.

ENIT

Universite de LUND

JOURNEES TUNISO - SUEDOISES
sur les
" CIMENTS ET BETONS "
1 ET 2 JUIN 1988

Programme

Mercredi 1er Juin 1988

Matin	9 ^h 00	Ouverture Session I:	A. FRIAA Directeur de l'ENIT Président Professeur A. HILLERBORG LUND
	9 ^h 15		L. BOSTROM - B. JOHANSON "Recherche pratique sur le béton à l'Université de LUND"
	10 ^h 00		L. HACHANI - E. TRIKI - M.T. CHAÏEB "Méthodes d'étude de la dégradation des bétons en milieux agressifs".
	10 ^h 30	Pause café	
	11 ^h 00		G. FAGERLUND "Méthodes de prévision de la durée de vie des composants en béton utilisé dans la construction".
Après-Midi	12 ^h 30	Déjeuner Session II:	Président: Professeur M.T. CHAÏEB ENIT
	14 ^h 30		M.BEN CHEIKHA/ E.TRIKI / M.T. CHAÏEB "Etude de la dégradation des bétons tunisiens: méthodes expérimentales".
	15 ^h 15		R. MENSI " Transfert d'humidité dans le béton".
	15 ^h 45	Pause café	
	16 ^h 15		A. AOUIDIDI / M.T. CHAÏEB " béton à base de sable du désert"
	16 ^h 45		A. HILLERBORG "Calcul des dimensions des dalles en béton-Méthode de calcul par bande".

Judi 2 Juin 1988

Matin		Session III:	Président M.T. CHAÏEB
	9 ^h 00		A. HILLERBORG " Application de la mécanique de la rupture du béton"
	10 ^h 30	Pause café	
	11 ^h 00		K. BEN AMARA / A. FRIAA "Comportement non linéaire du béton"
Après-Midi	12 ^h 00	Déjeuner Session IV:	Président Professeur A. HILLERBORG
	14 ^h 00		O. PETERSON " Développement dans l'industrie du ciment en Suède 1944-1988".
	14 ^h 45		INNORPI." Noramlisation des ciments en Tunisie
	15 ^h 15		résumé
	16 ^h 00		Reception

Résumés des communications du séminaire

Recherche pratique sur le béton à l'Université de Lund

par Boström, L. et Johansson, B., Ecole Supérieure des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède.

Abstract

At the departemnt of Building Materials in Lund has the behaviour of concrete been studied since a long time. The international collaboration has been an important part of the work and quiet a few theses has been published at the department. This means, there exists a long experiance of concrete research at Building Materials in Lund.

Two big areas of research is fracture mechanics and humidity research and here are some of the more practical research described. The present paper is not an intention to be a research report, but more of a presentation of the activities during the last decade at Building Materials in Lund. But some of the results presented are from recently made experiments.

Méthodes d'études de la corrosion dans les bétons en milieu chlorure

par Chaïeb, M.T., Triki E. et Hachani L., Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.

Résumé

La présence d'ions chlorures dans le béton entrave, à partir d'un certain seuil de concentration, la corrosion par enrouillage des armatures pouvant aboutir à la ruine complète de l'ouvrage. L'évaluation de la vitesse de diffusion des ions agressifs à travers la matrice est primordiale pour prévoir les risques encourus. Les méthodes électrochimiques classiques (mesure du potentiel d'électrode, mesure de la résistance de polarisation et de l'impédance) peuvent être adaptées à l'étude de la dégradations des bétons; elles fournissent conjointement aux essais de diffusion, des renseignements précis sur le comportement électrochimique des armatures, sur leur vitesse de corrosion et sur le rôle des chlorures dans le processus de dégradation et de passivation des armatures.

Essential data for service life prediction

by Fagerlund, G., Ecole Supérieure des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède.

Abstract

Durability design based upon old experience - codes of good practice etc - is still widely used. It is, however, a dangerous method that has led to a lot of durability problems; examples are given in the report. A design based upon a service life calculation has many advantages but is very complex. A lot of data concerning functional requirements, environment, deterioration mechanism and material are needed. Examples of relatively elaborate methods for the estimation of the service life of concrete are presented briefly. The use of the service life concept means that the traditional accelerated test methods must often be abandoned in favour of nonaccelerated tests.

Etude de la dégradation des bétons

par Chaïeb, M.T., Triki, E. et Ben Cheikha, M., Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.

Introduction

La dégradation du béton résulte d'actions d'origine soit mécanique et physique, soit chimique:

-Les dégradations mécaniques sont diverses et suivent les conséquences d'une surcharge de la résistance mécanique mesurée sur éprouvettes standards.

-Les dégradations physiques sont dues à des surcharges, aux sollicitations excessives, aux chocs thermiques, aux gonflements et aux retraits. Toutes entraînent l'érosion et la fissuration du béton.

-Les dégradations chimiques sont dues aux acides, aux bases et aux solutions salines. Elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation de composés nouveaux.

Transfert d'humidité dans le béton

par Mensi, R., Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.

Résumé

Le séchage naturel du béton est un phénomène très lent qui a des conséquences importantes sur son comportement physique et mécanique plus particulièrement sur deux aspects spécifiques de ce matériau: les déformations différées (retrait, fluage) et sa durabilité (fissuration superficielle, pénétration d'agents agressifs). En plus de la modification des caractéristiques mécaniques et physiques locales qui résultent des variations de teneur en eau, la non-uniformité de ce paramètre au cours du temps induit un effet de structure particulièrement important (effet d'échelle pour le retrait et le fluage de dessiccation, et fissuration de retrait). A partir de l'analyse physique des mécanismes qui régissent les mouvements d'eau dans le matériau, on a développé un modèle de diffusion non-linéaire qui a été validé, grâce à la détermination expérimentale des distributions spatiales de teneur en eau, et de leur évolution au cours du temps, par la méthode de densimétrie par absorption des rayons gamma, au moyen d'un banc gamma rotatif. Le modèle ainsi validé permet d'une part d'extrapoler, dans certaines limites, les résultats expérimentaux, et d'autre part, il aide à exploiter et interpréter les essais de retrait et de fluage.

Bétons à base de sable du désert

par Chaïeb, M.T. et Aouididi, A., Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.

Résumé

Dans une construction, on prévoit habituellement l'utilisation du béton de granulats légers pour en abaisser le coût global. La construction peut être moins onéreuse vu la réduction du poids mort. C'est la raison principale de l'emploi du béton de sable du désert comme béton cellulaire.

L'économie réside alors dans une recherche d'équilibre entre le prix du mètre cube de béton, sa densité et ses qualités mécaniques.

Ce béton fait partie des bétons de faible densité qui sont légers et employés principalement à des fins d'isolation.

Notre étude comporte les étapes suivantes:

- analyse intrinsèque du sable de désert;
- étude du béton ordinaire;
- mise au point d'un procédé de fabrication du béton cellulaire à base du sable désert.

The advanced strip method - a simple design tool (Dimensionnement des dalles en béton armé selon la méthode de bandes)

by *Hillerborg, A.*, Ecole Supérieure des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède.

Abstract

The calculation of bending moments in slabs can be based either on the theory of elasticity or on the theory of plasticity (or on some intermediate theory, which in practice is too difficult). The practical application of the theory of plasticity can be based on two different theorems, giving upper or lower bounds of the load carrying capacity respectively. Thus the yield line theory gives upper bounds. The method which is described here is the strip method (méthode de bandes), which gives lower bounds, which means that the solutions are always safe. The basic ideas of this method are described, and a number of practical applications are demonstrated.

Application of fracture mechanics to concrete (Application de la mécanique de rupture du béton)

by *Hillerborg, A.*, Ecole Supérieure des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède.

Abstract

Different approaches to the application of fracture mechanics to concrete are discussed, with the emphasis on the models based on strain softening and strain localization, particularly the fictitious crack model. Examples of results of the theoretical analyses are demonstrated, and some practical conclusions are drawn. Future research is also commented.

On a model based on thermodynamic concepts for reinforced concrete behaviour at degradation state

by *Friâa, A. and Ben Amara, K.*, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.

Abstract

The main aim of this work is to reach a constitutive law for reinforced concrete; a constitutive law taking in account particularities of this composite material; besides we wish this law to manage in the best way the compromise: Simplicity - scientific rigour.

For doing, we apply thermodynamic laws to reinforced concrete constituents taking care of the following assumptions:

Annexe A

- 1-All evolutions are isotherm
- 2-Plane cross sections still plane during deformations
- 3-Tensile concrete work is neglected

Development in Swedish cement industry 1944 - 1988

by *Peterson, O.*, Ecole Supérieure des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund, Suède.

Abstract

How a laboratory should support the cement industry and also the cement users, from the moment a task is received to the reporting of the results.

Some examples of chemical analysis changing from laborious gravimetric methods to convenient physical-chemical methods. In which condition is the gypsum of the cement? Refractory bricks have fused - how hot have they been? What use can you have from a microscope?

Why did the Swedish cement industry change from the wet process to the dry process? How did this change influence the choice of machinery for the clinker burning process - stationary or rotating?

The dry process saves fuel, but makes it more difficult to get rid of potassium and sodium compounds in the raw materials. Alkali silica reactions. Strength in young and in mature concrete - a question of aluminates or alkali compounds? How should a easy-to-burn raw material be composed, and how should it be ground? Better cement if you spend too much fuel?

Compte-rendu des essais d'étanchéité

Echantillon numéro: 3 Description de l'échantillon: Plaque de béton + 1 mm de Flintkote + 10 mm de mortier Produit d'étanchéité: Cire d'abeille / paraffine Contenu du bol plastique: 500 g $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ plus 50 g H_2O								
Date	Temps	Σ Temps	Poids de l'échant. (gramme)	$-\Delta M$	$\Sigma \Delta M$	Poids du bol (gramme)	$+\Delta M_{bol}$	$\Sigma \Delta M_{bol}$
28/9	12.00	0	7196	0	0	706	0	0
1/10	12.00	72	7181	15	15	719	13	13
3/10	12.00	120	7172	09	24	727	08	21
5/10	12.00	168	7163	09	33	735	08	29
7/10	12.00	216	7156	07	40	743	08	37
10/10	12.00	288	7143	13	53	753	10	47
12/10	12.00	336	7132	11	64	759	06	53
15/10	12.00	408	7123	09	73	769	10	63
17/10	12.00	456	7116	07	80	779	10	73
19/10	12.00	504	7107	09	89	784	05	78
21/10	12.00	552	7101	06	95	789	05	83
24/10	12.00	624	7092	09	104	799	10	93
26/10	12.00	672	7086	06	110	803	04	97
28/10	12.00	720	7081	05	115	807	04	101
31/10	12.00	792	7071	10	125	816	09	110
2/11	12.00	840	7066	05	130	822	06	116
4/11	12.00	888	7062	04	134	826	04	120
7/11	12.00	960	7053	09	143	834	08	128
9/11	12.00	1008	7048	05	148	838	04	132

Compte-rendu des essais de dilatation

Toit no: 5 Fissure initiale (mm): 0,40
 Nombre de cycles: 4 1/2 Ecart net (mm): 0,60
 Type de couche d'étanchéité: Flintkote Durée d'ouverture de la fissure (min.): 5
 Renforcement: ———— Durée dilatation (h): 8
 Epaisseur de la couche d'étanchéité (mm): 1 Durée contraction (h): 8

Mesures (quotient d'humidité par rapport au poids)														Remarques
Date	Temps	ΣTemps (h)	R1	ΔR1	R2	ΔR2	R3	ΔR3	R4	ΔR4	R5	ΔR5		
21/5	15.15													fissure ouverte
	23.05													fissure refermée
22/5	08.00													fissure ouverte
	16.10		14,1	—	14,7	—	16,8	—	15,8	—	14,3	—		fissure refermée*
	23.30		13,7	-0,4	14,1	-0,6	16,3	-0,5	15,3	-0,5	13,9	-0,4		fissure ouverte
23/5	08.00		13,5	-0,2	14,1	0	16,3	0	15,3	0	13,8	-0,1		fissure refermée
	16.15		13,5	0	14,2	0,1	16,5	0,2	15,5	0,2	13,9	0,1		fissure ouverte
	23.10		13,3	-0,2	14,1	-0,1	16,3	-0,2	15,3	-0,2	13,8	-0,1		fissure refermée
24/5	07.55		13,1	-0,2	14,0	-0,1	16,2	-0,1	15,2	-0,1	13,7	-0,1		fissure ouverte
	08:10		13,1	0	14,0	0	16,2	0	15,3	0,1	17,4	3,7		infiltration d'eau
														*) Recouvrement avec de l'eau

Devis estimatif des trois propositions

Tous les coûts étaient calculés en octobre 1988 en Dinars Tunisiens. 1 Dinar Tunisien était équivalent à 1,15 Dollars Américains.

I. Coûts des matériaux

PROPOSITION 1

Revêtement d'étanchéité

2 mm de bitume 40 (bitume distillé): $0,002 \text{ m} \times 1100 \text{ kg/m}^3 \times 0^{\text{D}}147/\text{kg} =$	$0^{\text{D}}323/\text{m}^2$
Toile de jute	$0^{\text{D}}700/\text{m}^2$
<hr/>	
Total	$1^{\text{D}}023/\text{m}^2$
Majoration pour frais et bénéfices (30%)	$0^{\text{D}}307/\text{m}^2$
<hr/>	
Coût total du revêtement d'étanchéité	$1^{\text{D}}330/\text{m}^2$

Couche protectrice

10 mm de béton d'asphalte (densité: 2300 kg/m^3):	
8% de bitume 40: $0,01 \text{ m} \times 0,08 \times 2300 \text{ kg/m}^3 \times 0^{\text{D}}147/\text{kg} =$	$0^{\text{D}}270/\text{m}^2$
46% de gravier: $0,01 \text{ m} \times 0,46 \times \frac{2300 \text{ kg/m}^3}{1600 \text{ kg/m}^3} \times 5^{\text{D}}088/\text{m}^3 =$	$0^{\text{D}}034/\text{m}^2$
46% de sable: $0,01 \text{ m} \times 0,46 \times \frac{2300 \text{ kg/m}^3}{1500 \text{ kg/m}^3} \times 1^{\text{D}}521/\text{m}^3 =$	$0^{\text{D}}011/\text{m}^2$
<hr/>	
Total	$0^{\text{D}}315/\text{m}^2$
Majoration (30%)	$0^{\text{D}}095/\text{m}^2$
<hr/>	
Coût total de la couche protectrice	$0^{\text{D}}410/\text{m}^2$

PROPOSITION 2

Revêtement d'étanchéité

5 mm de bitume oxydé: $0,005 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 0^{\text{D}}456/\text{kg} =$	$2^{\text{D}}280/\text{m}^2$
Majoration (30%)	$0^{\text{D}}684/\text{m}^2$
<hr/>	
Coût total du revêtement d'étanchéité	$2^{\text{D}}964/\text{m}^2$

Couche protectrice

40 mm de sable: $0,040 \text{ m} \times 1^{\text{D}}521/\text{m}^3 =$	$0^{\text{D}}061/\text{m}^2$
Dalles de béton (500 mm \times 500 mm): $4 \times 0^{\text{D}}375/\text{dalle} =$	$1^{\text{D}}500/\text{m}^2$
<hr/>	
Total	$1^{\text{D}}561/\text{m}^2$
Majoration (30%)	$0^{\text{D}}468/\text{m}^2$
<hr/>	
Coût total de la couche protectrice	$2^{\text{D}}029/\text{m}^2$

Annexe C

PROPOSITION 3

Revêtement d'étanchéité

1 mm de Flintkote: $0,001 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 0^{\text{D}}530/\text{kg} =$	$0^{\text{D}}530/\text{m}^2$
Majoration (30%)	$0^{\text{D}}159/\text{m}^2$
Coûts total du revêtement d'étanchéité	$0^{\text{D}}689/\text{m}^2$

Couche protectrice

25 mm de mortier batard (densité: 1800 kg/m^3):	
10% de chaux artificielle: $0,10 \times 0,025 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3 \times 0^{\text{D}}036/\text{kg} =$	$0^{\text{D}}162/\text{m}^2$
10% de ciment artificiel: $0,10 \times 0,025 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3 \times 0^{\text{D}}053/\text{kg} =$	$0^{\text{D}}239/\text{m}^2$
80% de sable: $0,80 \times 0,025 \text{ m} \times \frac{1800 \text{ kg/m}^3}{1500 \text{ kg/m}^3} \times 1^{\text{D}}521/\text{m}^3 =$	$0^{\text{D}}037/\text{m}^2$
Grillage de poulailler	$0^{\text{D}}700/\text{m}^2$
Total	$1^{\text{D}}138/\text{m}^2$
Majoration (30%)	$0^{\text{D}}341/\text{m}^2$
Coûts total de la couche protectrice	$1^{\text{D}}479/\text{m}^2$

II. Coûts de la main-d'œuvre

Salaires y compris des charges sociales et accessoires de salaires (tiré d'Utica-Flash, octobre, 1988):

<i>Ouvrier qualifié (2ème catégorie)</i>	$0^{\text{D}}970/\text{h}$
<i>Manœuvre ordinaire</i>	$0^{\text{D}}900/\text{h}$

PROPOSITION 1

Revêtement d'étanchéité

Travaux	<ul style="list-style-type: none"> ● Chauffer et appliquer le bitume ● Poser la toile de jute dans le bitume
Equipe	1 Ouvrier qualifié 2 Manœuvres ordinaires
Durée de travail évaluée	$1,25 \text{ h/m}^2$
Coût	$(1 \times 0^{\text{D}}970/\text{h} + 2 \times 0^{\text{D}}900/\text{h}) \times 1,25 \text{ h/m}^2 =$ $3^{\text{D}}463/\text{m}^2$
Majoration pour frais et bénéfices (40%)	$1^{\text{D}}385/\text{m}^2$
Coût total	$4^{\text{D}}848/\text{m}^2$

Couche protectrice

Travaux	<ul style="list-style-type: none"> ● Chauffer et mélanger le béton d'asphalte ● Appliquer et compacter le béton d'asphalte
Equipe	1 Ouvrier qualifié 2 Manœuvres ordinaires
Durée de travail évaluée	1,00 h/m ²
Coût	$(1 \times 0^D970/h + 2 \times 0^D900/h) \times 1,00 \text{ h/m}^2 = 2^D770/m^2$
Majoration (40%)	1^D108/m ²
Coût total	3^D878/m²

PROPOSITION 2Revêtement d'étanchéité

Travaux	<ul style="list-style-type: none"> ● Chauffer et appliquer le bitume oxydé
Equipe	1 Ouvrier qualifié 2 Manœuvres ordinaires
Durée de travail évaluée	0,50 h/m ²
Coût	$(1 \times 0^D970/h + 2 \times 0^D900/h) \times 0,50 \text{ h/m}^2 = 1^D385/m^2$
Majoration (40%)	0^D554/m ²
Coût total	1^D939/m²

Couche protectrice

Travaux	<ul style="list-style-type: none"> ● Répandre le sable ● Poser les dalles de béton sur le sable
Répandre le sable:	
Equipe	3 Manœuvres ordinaires
Durée de travail évaluée	0,25 h/m ²
Poser les dalles:	
Equipe	1 Ouvrier qualifié 2 Manœuvres ordinaires
Durée de travail évaluée	0,20 h/m ²
Coût	$3 \times 0^D900/h \times 0,25 \text{ h/m}^2 + (1 \times 0^D970/h + 2 \times 0^D900/h) \times 0,20 \text{ h/m}^2 = 1^D229/m^2$
Majoration (40%)	0^D492/m ²
Coût total	1^D721/m²

Annexe C

PROPOSITION 3

Revêtement d'étanchéité

Travaux	● Appliquer deux couches de Flintkote
Equipe	2 Manœuvres ordinaires
Durée de travail évaluée	0,50 h/m ²
Coût	$2 \times 0^D900/h \times 0,50 h/m^2 =$ 0 ^D 900/m ²
Majoration (40%)	0 ^D 360/m ²
Coût total	1^D260/m²

Couche protectrice

Travaux	● Mélanger et appliquer le mortier batard
	● Poser les grillages de poulailler dans le mortier
Equipe	1 Ouvrier qualifié
	2 Manœuvres ordinaires
Durée de travail évaluée	0,70 h/m ²
Coût	$(1 \times 0^D970/h + 2 \times 0^D900/h) \times 0,70 h/m^2 =$ 1 ^D 939/m ²
Majoration (40%)	0 ^D 776/m ²
Coût total	2^D715/m²

Liste des prix des matériaux de construction en Décembre 1988

Emulsions bitumineuses

Shellkote (boîte de 17 kg)	0 ^D 530/kg
Derbicote (boîte de 17 kg)	0 ^D 565/kg
Fina émulsion bitumineuse (boîte de 30 kg)	0 ^D 867/kg

Bitume chaud

Bitume distillé ("straight run") 40	0 ^D 147/kg
Bitume oxydé ("blown") 85-25	0 ^D 456/kg

Renforcement de la couche d'étanchéité

Toile de jute	0 ^D 700/m ²
Filet en plastique (moustiquaire)	0 ^D 700/m ²

Ciment et chaux

Ciment artificiel (250/315 en sac papier)	0 ^D 054/kg
Chaux artificielle (LM 50-100 en sac papier)	0 ^D 036/kg

Gravier et sable

Gravier 5-15	5 ^D 088/m ³
Sable 0-3	1 ^D 521/m ³

Renforcement du mortier

Grillage de poulailler	0 ^D 700/m ²
------------------------	-----------------------------------

Dalles de béton

Dalles 500 mm × 500 mm (O.M.P.)	1 ^D 500/m ²
---------------------------------	-----------------------------------

RÉSUMÉ

Ce rapport est le résultat de deux années de travaux de recherche tuniso-suédois menés en coopération par l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, l'ENIT, et Tekniska och Naturvetenskapliga Högskolan vid Lunds Universitet, LNTN (l'École Supérieure des Sciences Techniques et Naturelles de l'Université de Lund). Ils se sont étendus sur une période allant de juillet 1987 à juin 1989 et ont eu pour objectif d'étudier les infiltrations d'eau à travers les toitures plates en Tunisie. L'objectif a été de trouver une solution technique pour améliorer l'étanchéité.

Les travaux de ce projet ont débuté par l'inventaire de 50 maisons tunisiennes dans différentes régions du pays, tant en milieu urbain qu'en milieu rural. L'examen de ces maisons a montré que les infiltrations à travers les toitures sont dues à la mauvaise qualité des revêtements ainsi qu'à l'apparition de fissures dans l'élément porteur. Ces dernières sont difficilement évitables.

Vu l'acuité du problème de ces infiltrations, nos travaux se sont orientés vers la recherche d'une solution sous la forme d'une couche étanche résistante à placer par-dessus l'élément porteur. Nous avons testé trois propositions de revêtement étanche. La plus naturelle consistant à utiliser une forme quelconque de produit bitumineux comme couche d'étanchéité.

Nous avons examiné du bitume distillé et oxydé ainsi que de l'émulsion bitumineuse. La couche constituée par ces matériaux ont été tour à tour testés quant à leur capacité étanche et une estimation des coûts a été réalisée pour savoir à combien reviendrait l'application de la couche étanche sur le toit. Lors des essais en laboratoire, des travaux pratiques ont été effectués avec les trois matériaux.

L'émulsion bitumineuse s'est avérée être le plus intéressant des trois matériaux. Des tests ont été effectués avec différents types de ce produit pour examiner sa capacité d'absorption des fissures. Nous avons ensuite examiné les méthodes pouvant améliorer la capacité de recouvrement des fissures.

La capacité d'un revêtement bitumineux à suivre les mouvements du support diminue en cas d'exposition au rayonnement solaire et il est difficile également de marcher dessus. C'est pourquoi nous avons examiné différentes propositions de protection par-dessus la couche d'étanchéité. Nous en avons proposé et fabriqué trois types et nous en avons tiré certaines conclusions. Puis nous avons procédé à une comparaison des coûts entre les trois propositions.

A partir de ces essais, nous avons choisi la meilleure couche de protection et la meilleur couche d'étanchéité, dans la perspective d'éventuels essais sur une échelle réelle. Notre choix a été guidé par la qualité, les coûts et la maniabilité.

* * *

Dans la perspective d'un élargissement des contacts entre les deux partenaires, un séminaire sur le thème "Ciments et bétons" s'est tenu à l'ENIT, à mi-parcours de ce projet. Des chercheurs éminents ont été invités à cette rencontre où ils ont pris la parole.

Toitures en Tunisie



● Toiture plate.



● Toitures en voûtes et coupôles.



● Toiture inclinée.

ISBN 91-87014-01-7

ISSN 0348-7911