

---

# Grande Mosquée Hassan II de Casablanca

## Approche de la durabilité des travaux de réparation des infrastructures et ouvrages de protection

**Bernard Quénée\*** — **Abdelharam Laghrida\*\*** — **Abdelhamid Refass\*\*\*** — **Hassan Halib\*\*\*\***

\* LERM – Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux  
23 rue de la Madeleine- BP60136  
13631 ARLES Cedex – France  
[b.quenee@lerm.fr](mailto:b.quenee@lerm.fr)

\*\* Agence Urbaine de Casablanca  
Boulevard Moulay Youssef  
CASABLANCA – Maroc  
[alaghrida@yahoo.fr](mailto:alaghrida@yahoo.fr)

\*\*\* NBR Centre  
24, Lotissement Batoul Q.I. Lissasfa  
20230 CASABLANCA – Maroc  
[nbr@nbr.ma](mailto:nbr@nbr.ma)

\*\*\*\*OCIT  
20, rue Imam Al Boussairi (France Ville)  
CASABLANCA – Maroc  
[ocit@menara.ma](mailto:ocit@menara.ma)

---

*RÉSUMÉ. Cet article expose les choix qui ont guidé les travaux de réparation de la Grande Mosquée Hassan II de Casablanca (Maroc), une des plus grandes mosquées au monde. Inaugurée en 1993, elle est construite pour partie sur l'océan. Une dizaine d'années après sa mise en service, elle n'a pas résisté aux assauts répétés de l'Atlantique : une dégradation importante des bétons constitutifs des infrastructures et ouvrages périphériques de protection de la mer est apparue, sous la forme d'épaufrures des poteaux et dalles, liés à une corrosion de leurs armatures métalliques. Leur caractère fortement évolutif, dont les conséquences pouvaient conduire jusqu'à la perte de fonction des dites structures voire leur effondrement, a motivé à la fois leur reconstruction en matériaux plus résistants à l'environnement marin très agressif, ainsi qu'à un changement dans la conception de l'espace vacant sous la Mosquée, à l'origine ouvert aux marées et rendu isolé des flux océaniques par le projet de réparation.*

*Les travaux de réhabilitation menés d'avril 2005 à août 2008 ont mobilisé un grand nombre d'experts de la profession, avec pour seul objectif de faire de cet édifice religieux un modèle de pérennité pour le siècle à venir, tant par le choix des performances des matériaux mis en œuvre, que par l'organisation du chantier et des procédures de contrôle.*

*Enfin, la mission du LERM en tant que laboratoire chargé du contrôle extérieur, a consisté à conseiller le Maître d'Ouvrage sur les choix des matériaux et des techniques, sous l'angle de la durabilité et des performances atteintes, valider les procédures et programmes de contrôles mis en place, ainsi que les résultats de contrôle des matériaux du laboratoire de contrôle externe du groupement d'entreprises.*

---

*MOTS-CLÉS : Mosquée, environnement marin, béton hautes performances, fumée de silice, armatures inox, durabilité, diffusion des ions chlorures, protection cathodique.*

---

*ABSTRACT : This article shows the choices that drove repairing works of the Big Mosque "Hassan II" of Casablanca (Morocco), one of the biggest and highest mosques in the world. Inaugurated in 1993, a part of the construction is built over the ocean. About ten years after its commissioning, she didn't resist to repeated assault of the Atlantic ocean on its structure : an important deterioration of the facilities and peripherals protective construction's concretes appeared as bursting of the columns, beams and slab, due to the corrosion of the metallic reinforcement. Their strongly evolutive character, of which consequences could lead to lose the main purpose of this structure, and more, to collapse, motivated both their reconstruction with more resistant materials to face the strongly aggressive maritime environment, and to change the conception of the empty space under the mosque, firstly open for tides and isolated rendering oceanic flows by the reparation project.*

*The rehabilitation works managed from April 2005 to August 2008 mobilized a large number of experts, whom only objective was to transform this religious concrete edifice in a model of durability for the upcoming century, first through the choice of the material's mechanical and durable performances, then on the management of the working yard, and through the controlling procedures.*

*At last, the mission of LERM, as a laboratory in charge of exterior control, consisted to advice the contractor owner about the choice of the materials and technical methods, driven by the durability and reached performance's field of view, validating the procedures and controlling programs in operation, as well as the results given by the control and characterization of the materials in laboratories, external of the companies pooling.*

---

*KEYWORDS : Mosque, maritime conditions, high performance concrete, silica fume, stainless steel, chlorides diffusion, cathodic protection.*

---

## 1. Description de l'édifice

La Grande Mosquée Hassan II de Casablanca, est la troisième plus grande mosquée après celles de la Mecque et d'Istiqlal à Jakarta : son minaret culminant à 210 m de hauteur en fait l'édifice religieux le plus haut du monde.

Construite du 12 juillet 1986 au 30 août 1993, sous l'autorité de l'architecte Français Michel Pinseau, elle est érigée pour partie sur l'océan, sur une surface de 12 hectares, mobilisant à l'époque 2 500 ouvriers marocains et 10 000 artisans venus de toutes les régions du Maroc. Les dimensions hors du commun et les quantités de matériaux employés laissent songeurs : 300 000 m<sup>3</sup> de béton, 40 000 tonnes d'acier, 59 000 m<sup>3</sup> d'enrochements de protection contre la houle, 250 000 m<sup>2</sup> de marbres, travertin et granite, 10 000 m<sup>2</sup> de zelliges, 67 000 m<sup>2</sup> de plâtres et 53 000 m<sup>2</sup> de bois sculptés, 10 000 m<sup>2</sup> de tadelakt, 300 000 tuiles en fonte d'aluminium... Un toit mobile de 1 100 tonnes et de 3 400 m<sup>2</sup> de superficie, recouvert de bois de cèdre sculpté et peint, peut s'ouvrir en quelques minutes et découvrir la salle des prières. Il permet ainsi d'exaucer les vœux du roi Hassan II, à savoir relier à l'air l'édifice, après la terre et l'eau sur laquelle il repose, ces trois éléments symbolisant la vie.

Au final, 25 000 fidèles peuvent rentrer dans la salle des prières et 120 000 stationner sur le parvis extérieur recouvert de dalles en travertin (figure 1).



Figure 1 : vue générale de l'édifice, achevé en 1993

## 2. Les désordres

Les assauts répétés de l'Atlantique, combinés avec l'agressivité du milieu ambiant, **salin et particulièrement humide**, ont, une dizaine d'années après la mise en service de l'édifice, dégradé les bétons des infrastructures et ouvrages de protection contre la houle (« peignes »). Une dégradation importante de ces bétons est apparue en particulier dans les zones de marnage, exposées aux mouvements de marées et éclaboussures, sous la forme **d'épaufrures** des poteaux et dalles, allant jusqu'à l'éclatement superficiel des bétons, mettant ainsi à nu des aciers fortement corrodés (figures 3 à 5).



Figure 2 : vue générale sous la dalle des pompiers, supportée par les peignes brises houle



Figure 3 : épaufrures d'une poutre supportant la salle des prières, au contact avec les embruns marins



Figure 4 : vue d'épaufrures sous la dalle des pompiers, supportée par les peignes brises houle



Figure 5 : détail de la fissuration et de l'épaufrure d'un poteau « peigne » brise houle, en zone de marnage

Le caractère fortement évolutif de ces dégradations, dont les conséquences pouvaient conduire jusqu'à la perte de fonction desdites structures, voire leur effondrement, a motivé à la fois leur reconstruction en matériaux plus résistants à l'environnement marin très agressif, ainsi qu'à un changement dans la conception de l'espace vacant sous la Mosquée.

### 3. Le projet de réparation

#### 3.1. Conception de la réparation

Le projet de réparation, conçu par le bureau d'études marocain INGEMA, conseil de l'Etat marocain, a pris le parti d'éradiquer totalement les phénomènes de corrosion, en isolant les structures corrodables de l'eau de mer et de l'air ambiant, tout en confinant l'ensemble dans un monolithe de béton indéformable et résistant aux agressions de l'eau de mer. A cette fin, les principes suivants ont été retenus (figure 6) :

- isolement complet des flux océaniques de l'ensemble des structures initialement au contact de l'eau par la construction d'une digue,
- confinement total des structures dégradées avec un béton dit **de confinement**,
- démolition – reconstruction des ouvrages périphériques à l'aide de bétons spécifiques dits **de structure**.

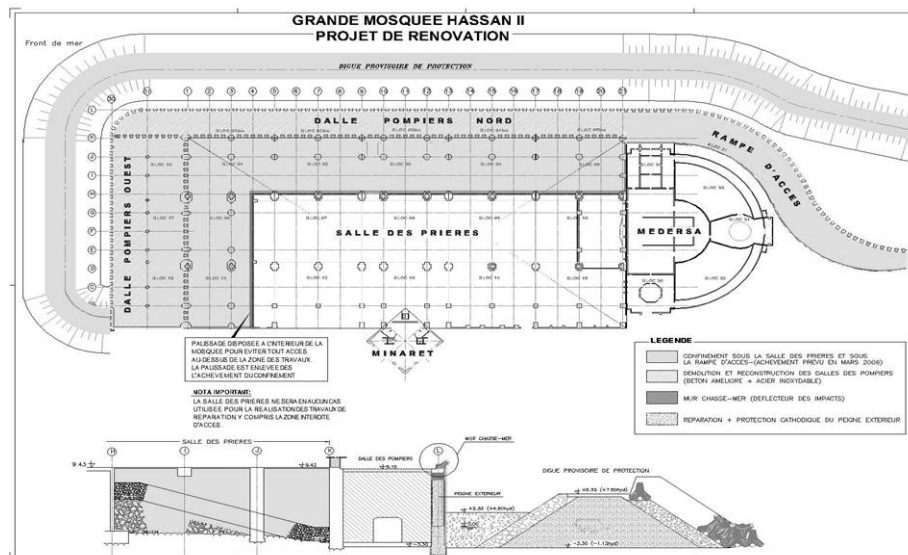


Figure 6 : principe général des travaux de réparation de la Grande Mosquée (origine : INGEMA)

### **3.2. Organisation du chantier**

Les travaux de réhabilitation menés d'avril 2005 à août 2008 ont mobilisé les intervenants suivants :

- Maître d'Ouvrage : Etat Marocain / Ministère de l'Intérieur / Agence Urbaine de Casablanca
- Maître d'Œuvre / Ingénieur conseil : BET INGEMA
- Entreprises : groupement SOMAGEC – SGTM
- Bureau de contrôle : Norisko
- Contrôle externe : LPEE
- Contrôle extérieur : groupement NBR – OCIT – LERM

La mission du laboratoire de contrôle extérieur a consisté à valider les procédures et les programmes de contrôles mis en place, les résultats de contrôle des matériaux employés ainsi que ceux des essais de convenue réalisés sur les bétons (BHP en particulier) par le laboratoire externe (associé au groupement d'entreprises), ainsi qu'à conseiller le Maître d'Ouvrage sur les choix de matériaux et de techniques sous **l'angle de la durabilité** et des performances atteintes.

### **3.3. Etapes du chantier**

#### **3.3.1. Construction de la digue de protection**

Une digue circulaire, périphérique à l'édifice, a été créée par mise en place d'encochements, afin de mettre hors d'eau les peignes brise houle ainsi que les infrastructures sous la Mosquée. Cette digue a reçu ensuite une protection de tétrapodes en béton contre les assauts de la houle (figures 7 et 8).



Figure 7 : construction de la digue de protection périphérique



Figure 8 : digue de protection périphérique recouverte de tétrapodes

### 3.3.2. Préparation des bétons en place des infrastructures

Un décroûtage complet des structures en béton concernées par la corrosion (poteaux, poutres et sous face de dalles) a été réalisé par une combinaison de perforation mécanique et d'hydro-démolition, afin de dégager la couche de béton d'enrobage peu adhérente et décaper les produits de corrosion sur les armatures afin de les mettre totalement à nu (figures 9 et 10) :



Figure 9 : décroûtage des bétons dégradés par la corrosion



Figure 10 : poste d'hydro-démolition (sous dalle des pompiers)

### 3.3.3. Confinement des espaces vacants sous la Mosquée

Un comblement des espaces vacants sous la Mosquée (salle des prières et rampe d'accès), envahis au fil des marées océaniques, a été entrepris selon un maillage prédéfini, au moyen d'un béton dit de **confinement** coulé en masse. Un planning de bétonnage, également réparti entre plots correspondant aux files de poteaux, a été fixé afin de limiter les effets de bétonnages en masse susceptibles d'engendrer des chaleurs d'hydratation trop importantes (vis-à-vis du risque de formation d'ettringite différée (DEF) notamment).

Ce béton, fabriqué par la centrale à béton du chantier, a été acheminé par toupies et pompé à partir d'un approvisionnement en continu, jour et nuit (figures 11 à 13). De classe B25, sa formulation a fait l'objet d'une validation stricte de ses constituants et de ses performances (cf § 4.2.1).

En parallèle, **des injections** de coulis ou de mortiers ont été entreprises en partie basale, au contact avec les enrochements en place, afin d'assurer un contact parfait avec le sol et éviter ainsi tous affouillements ultérieurs (figure 12).

Enfin, un **clavage au coulis** de ciment entre le sommet du béton de confinement et la sous face de la dalle de la salle des prières sus-jacente (= niveau d'exploitation de l'édifice) a été entrepris, avec pour but de ne laisser subsister aucun vide résiduel dans cette zone, à même d'entretenir un processus de corrosion de la dalle par

circulation d'eau ou d'air. A cette fin, un ingénieux dispositif de gouttières à débordement a été mis en place, fixées en sous face de la dalle de la salle des prières. Une instrumentation de suivi a été mise en place lors de ces phases depuis le sol de la salle des prières, afin de prévenir tout risque de soulèvement éventuel (figure 14).



Figure 11 : mise en place du béton de confinement sous la salle des prières



Figure 12 : béton de confinement à la cote + 7,5 NGM avec attentes pour mise en place du coulis d'injection au niveau des enrochements au contact du terrain



Figure 13 : mise en place d'un béton auto-plaçant de confinement avant clavage au coulis



Figure 14 : surveillance de la dalle au sol de la salle des prières lors des injections de clavage sous-jaçantes



#### 3.3.4. Voile de confinement

Un voile de protection périphérique jointif, clouté au béton de confinement, a été coulé en place à l'issue afin d'apporter une protection supplémentaire au béton de confinement vis-à-vis du flux océanique (figure 15).

Cet ouvrage de protection a été réalisé avec la même formule de béton que les ouvrages périphériques reconstruits (peignes brises houle et dalle des pompiers), à savoir un **béton de hautes performances (BHP)** armé d'**armatures inox** austéno-ferritique type duplex (voir § 4.2.3 pour les détails de composition et de caractéristiques).

#### 3.3.5. Démolition des ouvrages de protection périphériques

Les ouvrages de protection périphériques existants (esplanade arrière ou dalle dite des pompiers, peignes brise houle) ont été démolis, principalement par découpe au fil diamanté de tronçons manutentionnés par grue (figure 16). La démolition des bases de poteaux des peignes a ensuite été poursuivie par des techniques de perforation classiques, jusqu'à la longrine basale, conservée, servant ensuite de point d'ancrage aux poteaux reconstruits.



Figure 15: mise en place d'un voile de protection périphérique en BHP armé d'armatures inox (à noter les toiles de jute arrosées pour prolonger la cure des bétons)



Figure 16 : fil diamanté utilisé pour la découpe de la dalle des pompiers et le tronçonnage des poteaux des peignes brises houle

### 3.3.6. Reconstruction des ouvrages de protection périphériques

Les ouvrages de protection de la houle océanique (peignes) et de la dalle de couverture (dalle des pompiers) ont été entièrement reconstruits avec un béton de hautes performances mécaniques et de durabilité (BHP), entièrement armé d'armatures inox austéno-ferritique type duplex (voir § 4.1 pour les détails de composition et de caractéristiques) (figures 17 et 18).

Dans un second temps, une réparation « traditionnelle » des poteaux des sous-sols de la Mosquée a été réalisée, avec mise en place d'un dispositif de protection cathodique généralisé sur la longrine d'origine restée en place.



Figure 17: reconstruction des peignes brisés houle en BHP armés d'armatures inox (à noter les toiles de jute arrosées pour prolonger la cure des bétons)



Figure 18 : reconstruction de la dalle des pompiers en BHP armé d'armatures inox

A l'issue de cette reconstruction, un voile en BHP armé d'inox avec un motif extérieur semblable aux ouvertures entre peignes simplement suggérées, protège la rampe d'accès à la dalle des pompiers, comblée précédemment par le béton de confinement (figure 19).

Un parapet brise houle est créé dans la continuité, avant mise en place d'une étanchéité de la dalle proprement dite, avant la pose du revêtement en pierres d'origine en travertin (figure 20).



Figure 19: reconstruction d'un voile avec motif des peignes brises houles en BHP armé d'armatures inox sur la rampe d'accès à la dalle des pompiers



Figure 20 : reconstruction d'un bec brise lames et repose du revêtement en travertin et équipements

#### 4. Les matériaux employés

Dans l'objectif d'assurer au béton les spécifications de qualité requises par le marché, tous les matériaux, matériels et fournisseurs ont fait l'objet de dossiers d'agrément.

##### 4.1. Agrément des matériaux

- **ciment** : les essais mécaniques sur mortiers, analyses physiques et chimiques du ciment utilisé (CEMII CPJ 45 PM, avec ajout de 15% de cendres volantes pour les bétons de structure) ont été destinés à contrôler sa conformité avec les exigences de la norme NF EN 196-1. Un point particulier a consisté également à mesurer la chaleur d'hydratation, réalisée sur mortier selon la norme NF EN 196-9. Des essais de compatibilité ciment / adjuvant superplastifiant et haut réducteur d'eau ont également été réalisés suivant la norme NF EN 480-2.

Il est à signaler que du fait des températures élevées du ciment livré par camions avant mise en silos (moyenne proche de 50 °C, avec maximums à 73°C), des essais de fausse prise selon la norme NF P 18-363 ont été réalisés au-delà de 45°C.

- **granulats** : les carrières proposées par le groupement d'entreprises ont toutes relevé du même gisement, de nature calcaire, situé en bordure de l'Oued Cherrat, dans la région de Benslimane. Toutes ces carrières ont fait l'objet d'une procédure d'agrément et de rapports d'agrément par le laboratoire de contrôle externe, validés par le laboratoire de contrôle extérieur. Un sable de dune siliceux a été utilisé en

correction granulométrique (région de Kénitra). Aux adaptations de granulométrie près, les granulats utilisés ont été les mêmes entre les différents bétons du chantier. Les essais de durabilité, menés sur toutes les fractions granulométriques selon le fascicule de documentation FD P 18-542, ont révélé une conformité générale vis-à-vis des seuils admissibles, avec néanmoins quelques dépassements ponctuels sur la teneur en silice > 4%, ayant nécessité de réaliser les tests à l'autoclave.

- **fumée de silice** : elle a été utilement utilisée uniquement pour les bétons de structure (BHP), autant pour le gain en rhéologie apporté que pour une durabilité accrue du mélange final.

- **adjuvants** : de type superplastifiant et haut réducteur d'eau, les analyses chimiques ont concerné le pH et l'extrait sec par rapport aux exigences de la norme NF EN 934-2.

- **eau de gâchage** : l'eau utilisée sur le chantier provient du réseau d'eau potable de la ville de Casablanca. Les analyses réalisées ont révélé des teneurs en sels dissous importantes mais acceptables pour son utilisation. Rappelons que la norme NF EN 1008 (P18-211) autorise son utilisation en eau de gâchage dès lors que le caractère potable de l'eau est prouvé.

- **armatures** : dans un souci de garantie optimale sur la durée de vie de la structure reconstruite en BHP, le choix fut décidé d'utiliser exclusivement des armatures en inox, de qualité austéno-ferritique, de nuance X2CrNiMoN22-5-3, contrôlées selon la norme EN 10088-3.

A noter que la manutention sur le chantier des barres inox avec des outils non spécifiques, laissant des traces d'oxydes métalliques sur les surfaces (pollution ferritique), non dommageables mais peu esthétiques, une préfabrication en usine des pièces directement au gabarit fut mise en place afin de réduire cet effet induit.

## ***4.2. Formulations et caractéristiques***

### ***4.2.1. Béton de confinement***

Compte-tenu du contexte de mise en place du béton de confinement par pompage, à une seule fin d'enrobage des enrochements, poteaux, voiles et remplissage des espaces vacants, sans aucun rôle structurel, les seuls critères pris en compte pour la formule retenue ont été guidés par la durabilité. Ils ont notamment consisté à s'affranchir, avant toute notion de performances mécaniques, des éventuels risques de gonflements ultérieurs (alcali-réaction, ettringite différée...).

La formulation du béton de confinement, mise au point par le laboratoire de contrôle externe, a fourni des résultats d'essais de résistance mécanique à 28 jours et a

fortiori à 90 jours toujours supérieurs aux spécifications du marché (proches de 30 MPa à 90 jours).

Les essais d'études puis de convenance ont permis de retenir la formule nominale avec un dosage en ciment CEMII CPJ 45 PM de  $250 \text{ kg/m}^3$ , accru à  $300 \text{ kg/m}^3$  avec l'avancement du chantier afin d'en augmenter la fluidité pour un meilleur enrobage des enrochements, ainsi que pour une amélioration de sa pompabilité (rapport E/C de 0,57 au final, pour un slump contractuel  $> 18$ ). Enfin, au dessus de la cote +7,5 NGM et jusqu'au contact avec la dalle de la salle des prières, un dosage accru à  $350 \text{ kg/m}^3$  a permis d'obtenir un caractère autoplaçant, facilitant sa mise en place finale sans intervention humaine.

Il est à noter qu'au fur et à mesure de l'avancement des travaux, en fonction des spécificités propres à la mise en place du confinement, de la provenance des granulats et des retours d'expérience acquis, 8 formules dérivées ont été successivement adoptées.

#### *4.2.2. Les coulis et mortiers d'injections*

Ces produits, destinés à assurer un contact parfait entre le béton de confinement et le sol et enrochements d'une part, et la sous face de la dalle supérieure correspondant au sol de la salle des prières d'autre part, ont été formulés à partir du même ciment que pour les bétons de confinement, à savoir un CEMII - CPJ 45 PM.

Différents adjuvants ont été utilisés, selon les phases du chantier : superplastifiant haut réducteur d'eau, fluidifiant et retardateur de prise.

La stabilité de la suspension a été assurée par de la bentonite.

#### *4.2.3. Les bétons de structure*

Les bétons dits de structure, mis en oeuvre tant pour la fermeture par voiles périphériques des bétons de confinement sous la Mosquée et de la rampe d'accès, que de la reconstruction des poteaux brise houle (peignes) et de la dalle dite des pompiers sus jacente, représentent un point capital dans la réussite du projet : leur durabilité est essentielle, compte tenu de leur exposition à l'agressivité des flux océaniques, et donc vis à vis de la **pérennité** des structures reconstruites.

Les exigences de performances sur ces bétons ont donc été directement tournées vers la **recherche d'une durabilité optimale**, au-delà des seules performances mécaniques qui auraient été dictées par les seuls besoins d'un dimensionnement structurel.

En conséquence, une spécification de durabilité de la formule retenue a été exigée dans le cadre du marché de travaux, basée sur un paramètre physique majeur conditionnant la corrosion des armatures des bétons, à savoir le **coefficient de diffusion des ions chlorures**, plus contraignant à atteindre que les seuls niveaux de résistances mécaniques contractuelles.

La valeur retenue dans le présent marché a été de  $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  à 90 jours.

En raison de difficultés de reproduction avec la centrale à béton du chantier de la formule d'étude du BHP, notamment au niveau des caractéristiques rhéologiques vis-à-vis du pompage et de l'aspect bullé des parements, une optimisation de cette dernière a été rendue nécessaire lors des épreuves de convenance. Une série de **voiles tests** a été construite au fur et à mesure des essais de mise au point, afin de disposer de tests en grandeur réelle et des caractéristiques de diffusion et de porosité acquies dans la continuité (figures 21 et 22). Les principaux aménagements réalisés ont consisté à travailler sur la **robustesse de la formulation** de façon à la rendre reproductible, même en dépit de menues variations des proportions des constituants :

- maîtrise des teneurs en eau, en raison de la forte sensibilité à l'eau de ces bétons de structure, et donc correction notamment des teneurs en eau de façon bi-journalière au niveau de la centrale
- mise en place d'une procédure de stockage et d'acceptation des fumées de silice livrées sur le chantier, afin d'éviter la formation d'agglomérats consécutifs à la très forte humidité régnant sur le site
- ajustage des proportions d'adjuvants superplastifiants et haut réducteur d'eau : des essais sur mortiers bétons équivalents (MBE) et sur coulis ont permis d'en ajuster le % optimal (tableau 1 et figure 23).



Figure 21: fabrication de voiles tests avec les différentes formules dérivées en BHP lors des épreuves de convenance

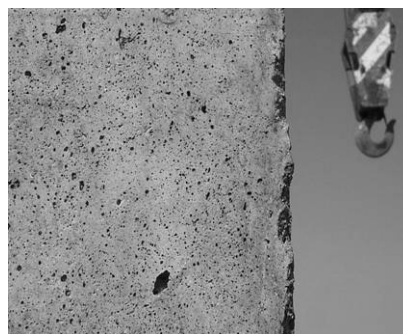


Figure 22 : aspect d'un parement bullé en BHP sur voile test

Nature	Formule dérivée du béton d'étude Dosage en kg/m <sup>3</sup>	Mortier Béton Equivalent Dosage en kg/m <sup>3</sup>
Ciment + Cendres	404	404
Fumée de silice chantier	21	21
Sable reconstitué 0/5mm	739	782,2
Gravette I 5/20 mm	432	/
Gravette II 16/25 mm	631	/
Superplastifiant	10,63	10,63
Eau	147	122,7

Tableau 1 : essais d'optimisation de la formulation du béton de structure à partir de MBE (mortier béton équivalent) pour recherche de l'optimum en adjuvant superplastifiant et haut réducteur d'eau

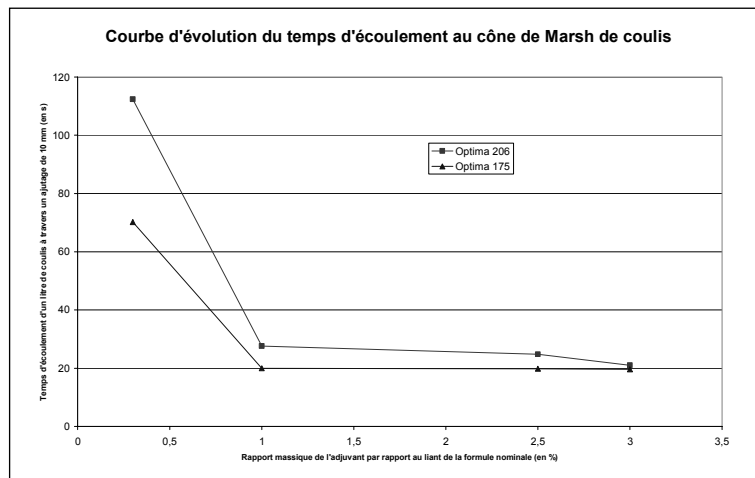


Figure 23 : formulation du béton de structure à partir de coulis pour recherche de l'optimum en adjuvant superplastifiant

Les températures extérieures élevées ont conduit à interdire le bétonnage au-delà de 27°C, afin de se prémunir de la formation d'ettringite différée (réaction sulfatique interne RSI), conséquence d'une température trop élevée à cœur du béton. Le travail de nuit et l'utilisation d'une centrale à glaçons pour le gâchage des bétons ont ainsi été rendus fréquemment nécessaires. La formulation définitive est résumée dans le tableau 2 suivant.

Nature constituants	Dosage en kg/m <sup>3</sup>
Ciment CEMII CPJ 45 PM avec 15% de cendres volantes	400
Fumée de silice	21
Eau totale	147
Eau efficace/Ciment	0.35
G/S	1.4
Superplastifiant	10
Sable fin 0/2 mm	517
Sable grossier 0/5mm	222
Gravette 5/20 mm	432
Gravette 15/26 mm	631

Tableau 2 : composition retenue des bétons de structure (BHP)

#### 4.3. Contrôles en laboratoire

Les résultats transmis par le laboratoire de contrôle externe de l'entreprise à la Maîtrise d'œuvre et par cette dernière au laboratoire de contrôle extérieur, au fur et à mesure de leur obtention, ont été systématiquement analysés avant d'être validés ou commentés à l'occasion de chaque réunion de coordination mensuelle.

Le tableau 3 suivant récapitule les principaux essais menés par le laboratoire de contrôle externe, exigés par le marché, notamment sous l'angle le plus important pour les ouvrages construits en **béton de structure**, à savoir le volet de leur **durabilité** (analyses chimiques des granulats, alcali-réaction et essais de diffusion des ions chlorures).



Nature des contrôles	Type d'essais	Nombre d'essais			
		2005	2006	2007	2008
Roches mères, granulats	Analyse chimique et alcali-réaction	-	2	-	-
Sables	Analyse chimique	1	23	24	27
	Alcali-réaction	-	18	24	-
Gravettes	Analyse chimique	-	22	15	22
	alcali-réaction	-	-	-	-
Bétons de structure	Diffusion des ions chlorures	-	10	102	192

Tableau 3 : Statistique des essais de durabilité spécifiques aux granulats de tous les bétons et aux essais de diffusion des ions chlorures sur les bétons de structure

Les résultats des essais de réactivité à l'alcali-réaction (FD P 18-542) ont été validés conformément aux seuils de référence.

A signaler quelques dépassements ponctuels en termes de réactivité à l'alcali-réaction avec les sables de dune isolément (granulats classés PR), tolérés en raison de leur mélange en de très faibles proportions (sable correcteur) avec le restant du fuseau granulaire classé NR.

Les principaux résultats d'essais relatifs aux bétons de structure mis en œuvre ont été les suivants (tableaux 4 et 5, figure 24).

Age (en jours)	Moyenne Rc (MPa)	Moyenne Rt (MPa)
7	54	4,6
28	69	5,0
90	78	6,0

Tableau 4 : résultats des essais de résistance mécanique à la compression et au fendage sur les bétons de structure en fonction de leur âge

Les deux principaux indicateurs de durabilité (et paramètre contractuel pour le diffusion) sont reportés dans le tableau 5 suivant :

	Coefficient de diffusion apparent à 90 jours ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Porosité accessible à l'eau à 90 jours (%)
Nombre	182	182
Minimum	0,3	8,6
Moyenne	<b>0,5</b>	<b>9,6</b>
Maximum	0,8	11,1

Tableau 5: résultats des essais de durabilité spécifiques aux essais de diffusion des ions chlorures sur éprouvettes et porosité des bétons de structure

A noter que les essais de diffusion des ions chlorures ont été réalisés sous champ électrique en régime transitoire selon la norme NT BUILD 492.

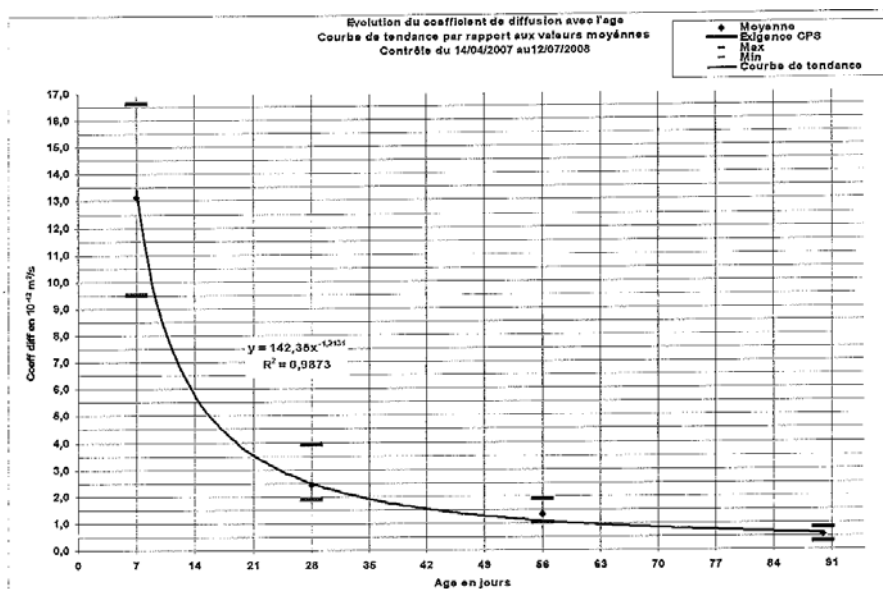


Fig.24 : Evolution du coefficient de diffusion des bétons de structure avec le temps sur éprouvettes (origine : laboratoire de contrôle externe LPEE)

La moyenne des essais de diffusion des ions chlorures contrôlés sur carottes extraites de l'ouvrage est de  $5,7 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ces résultats de diffusion, tant sur éprouvettes coulées que sur carottes extraites de l'ouvrage sont tous conformes et inférieurs aux exigences du marché : la valeur limitée exigée par le marché ( $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) a été atteinte en moyenne dès l'âge de 56 jours au début de la mise en œuvre de ces bétons, et dès 42 jours en fin de chantier. Cette évolution est positive et dénote une amélioration continue des caractéristiques du béton mis en place (retour d'expérience).

Ces caractéristiques acquises de diffusion et de porosité permettent de classer ce BHP comme **Béton à Durabilité Potentielle très élevée**, selon les critères de classement AFGC (Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, 2004) (tableau 6).

Durabilité potentielle	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
<b>Porosité (%)</b>	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
<b>Perméabilité à l'oxygène (<math>10^{-18} \text{ m}^2</math>)</b>	> 1000	300 à 1000	100 à 300	10 à 100	< 10
<b>Coefficient de diffusion apparent (<math>10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}</math>)</b>	> 50	10 à 50	5 à 10	< 5	

Tableau 6 : Classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux (porosité, coefficient de diffusion et perméabilité)(d'après Association Française de Génie Civil (AFGC) - Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité (juillet 2004))

Il est à signaler qu'un arrosage manuel et continu systématique après décoffrage des bétons de structure, recouverts de toiles de jute, a permis d'assurer de bonnes **conditions de cure** à ces bétons, précautions nécessaires permettant d'éviter les risques liés à une fissuration par retrait aux jeunes âges.

## 5. Conclusion

L'exemple de ce chantier de réhabilitation portant sur un édifice religieux aussi emblématique et fortement symbolique que la Grande Mosquée Hassan II de Casablanca, montre qu'une conception architecturale et artistique, quelle qu'en soit la valeur et la destination, doit nécessairement intégrer les paramètres de son environnement au même niveau d'exigence que les autres paramètres, sous peine d'engendrer une charge d'entretien conséquente après sa construction.

Les travaux de réparation des infrastructures, menés quinze années après sa construction, ont donc mobilisé beaucoup de moyens et un grand nombre d'experts de la profession, avec pour seul objectif de faire de cet édifice un modèle de pérennité pour le siècle à venir, tant par le choix des performances des matériaux mis en œuvre que sur l'organisation du chantier et des procédures de contrôle.

Les retours d'expérience acquis ont également fait de ce chantier un « laboratoire » pour le métier de la construction au Maroc, permettant d'apporter de nouvelles exigences et savoir faire sur la durabilité des matériaux, dorénavant considérée à sa juste place.

Afin de fixer les idées sur la dimension de ce chantier hors du commun, les quantités de matériaux mises en œuvre ont été les suivantes :

- 110 000 m<sup>3</sup> de béton de confinement
- 12 000 m<sup>3</sup> de coulis et mortiers
- 1 300 t d'armatures inox
- 10 000 m<sup>3</sup> de BHP

#### Remerciements

- l'administration de la Grande Mosquée de Casablanca, pour sa confiance manifestée, son écoute technique, ainsi que son accueil en toutes circonstances
- le bureau d'études Ingema pour sa rigueur technique tout au long du chantier
- le groupement d'entreprises SOMAGEC-SGTM pour leur ouverture et coopération
- les techniciens et techniciennes de NBR et OCIT
- les multiples intervenants du LERM pour leur assistance continue

#### Bibliographie

*Association Française de Génie Civil (AFGC) - Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité (juillet 2004)*