

TUNNELS DU PORT DE MIAMI

PORT OF MIAMI TUNNELS

R. B. STORRY, C. FESQ, Y. TAIBI, P. PASCUAL, L. BRAIS, P. DENIS, P. BOURDON
Bouygues Travaux Publics SA

1. INTRODUCTION

Il aura fallu plus de 28 ans de réflexion au Département des Transports de Floride (FDOT) pour aboutir en octobre 2009, à la construction des tunnels du Port de Miami, confiée à Bouygues Travaux Publics.

Ce projet comprend la construction de deux tunnels de 11.3 de diamètre et 1.27km de longueur, abritant chacun deux voies de circulations et reliant deux îles artificielles (Watson et Dodge) en traversant le chenal de Biscayne Bay. Ce projet inclut aussi la construction d'environ 4km de réseaux routiers et l'élargissement d'un pont autoroutier reliant Miami Downtown à l'île de Watson.

Les tunnels ont été réalisés au moyen d'un tunnelier hybride à pression de terre (EPB), dans des conditions de sol des plus difficiles. Avec un diamètre de 12.87m, le tunnelier du Port de Miami est le plus large tunnelier en terrain meuble de l'Amérique du Nord.

La grande perméabilité et hétérogénéité du terrain en place a nécessité la mise en œuvre de moyens innovants, non seulement pour le tunnelier, mais aussi pour les soutènements, les puits de lancements et de réception et les 5 intertubes.

Mais Bouygues Travaux publics a dû relever bien d'autres challenges, tels que les permis d'environnement, la durabilité des bétons, les traitements de terrain, la protection au feu des voussoirs, les équipements spécifiques du tunnel dont ses portes anti-inondations et quelques autres spécificités techniques qui ont rendues ce projet unique.

1. INTRODUCTION

After more than 28 years of Project development, the Florida Department of Transportation launched construction of the Port of Miami Tunnel Project in October 2009, awarding the contract to Bouygues Travaux Publics.

The project comprises the construction of dual 11.3m internal diameter, 1.27km long, two lane road tunnels between the two man-made islands of Watson and Dodge and under a main shipping channel in Biscayne Bay. In addition, the project includes approximately 4km of roadway improvements and the widening of a major over-water bridge linking Downtown Miami with Watson Island and Miami Beach. The tunnels are being constructed using a 12.87m diameter modified EPB-TBM and are the first large diameter tunnels to be constructed through South Florida's challenging ground conditions. At the time of construction the 12.87m excavated diameter TBM, used for the project, was the largest soft ground TBM ever used in North America. The highly permeable and heterogeneous sedimentary strata required the use of innovative construction techniques to safely and effectively form the TBM launch / reception shafts, bore the tunnels and excavate five cross passages.

Bouygues Travaux Publics also had to address many other challenges such as environmental permitting, concrete durability, ground treatment and fire protection of tunnel liner. These together with other significant challenges, including the requirement for 4 major floodgates, made this project unique.

2. L'ENVIRONNEMENT

Le premier défi auquel Bouygues Travaux Publics a été confronté consistait à convaincre l'ensemble des autorités locales environnementales des approches techniques permettant de limiter l'impact sur l'environnement.

En mettant en place une équipe dédiée composée d'experts locaux et internationaux, et une approche innovante impliquant directement les autorités dans le développement du projet, ce sont plus de 40 permis environnementaux qui ont été approuvés dans un délai record, permettant notamment le début des travaux en octobre 2009 comme prévu au contrat.

3. LA RÉALISATION DU TUNNEL

Les conditions géologiques

L'interprétation des données géologiques du dossier de consultation a permis de définir un modèle géologique composé de différentes couches extrêmement perméables dont des remblais, des sédiments, des sable siliceux, et des formations calcaires de résistances très variables.

Une couche particulière, se situant entre 27m et 36m sous le niveau de la mer a suscité bon nombre d'interrogations, de part les faibles résultats de SPT (< 10 voir 0) et les faibles taux de récupération des forages (en moyenne 26%). De part la forte incertitude sur la nature des matériaux en place (environ 74%), Bouygues Travaux Publics a entrepris une campagne complémentaire sans précédent, sur plus de 22 mois, impliquant un large ensemble de techniques de forage et d'investigation telles que des SPT, CPT, sonic cores et divers puits de plus de 2 m de diamètre.

Après avoir développé différents modèles de corrélation entre ces diverses techniques, les ingénieurs de Bouygues Travaux Publics assistés des experts de GCG ont pu déterminer les caractéristiques géotechniques à prendre en compte dans les études du revêtement du tunnel et définir les traitements de terrain indispensables, à la réalisation des intertubes et des puits de lancement et de réception du tunnelier et à la traversée du tunnelier.

Le challenge pouvait alors se résumer à savoir comment forer des puits, un tunnel et des intertubes dans des couches géologiques :

- De très forte perméabilité (> 10⁻²m/sec), interdisant tout recours à des techniques de soutènement classique telle que les parois moulées,
- Métastables voir instables, plus particulièrement dans la zone du tunnel foré,

Avec un très faible niveau de fines rendant tout conditionnement de sol très difficile voir impossible, et compromettant la faisabilité de stabilisation de la face durant l'excavation des tunnels.

Les puits de lancement et de réception

Les puits de lancement et de réception du tunnelier représentent à ce jour les excavations les plus profondes jamais réalisées en Floride. La méthode employée pour en réaliser

2. ENVIRONMENT

The environmental permitting was a significant challenge which Bouygues Travaux Publics had to face at the beginning of the Project. This exercise was required to convince various local authorities, unfamiliar with tunneling projects, of the environmental friendliness of the tunneling activities. In order to achieve this goal, a specific team was dedicated to the task. With the assistance of local and international experts and the proactive cooperation of the authorities within the project development, more than 40 environmental permits have been granted on time, to allow the construction activities to start according to schedule in October 2009.

3. TUNNEL CONSTRUCTION

The geotechnical conditions

Interpretation of the investigation data during the project period tender led to the development of a geological/geotechnical model comprising various highly porous and permeable layers, comprising reclamation fill, silts, siliceous sands and variably indurated limestones.

A specific layer, 27m to 36m below sea level, was of specific concern due to very low SPT N values (< 10 locally) and low core recovery (averaging around 26%). In an attempt to more fully understand this layer and to reduce existing uncertainties, a specific additional site investigation program was carried out by Bouygues Travaux Publics over a period of 22 months involving various techniques including SPT, CPT, geophysical surveys, sonic coring and large diameter shafts (about 2m diameter).

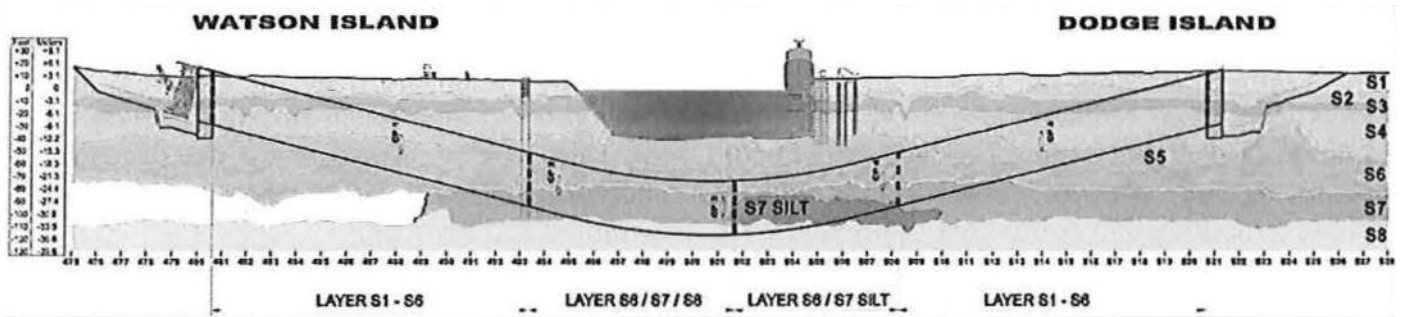
A site specific correlation was developed by Bouygues Travaux Publics Engineers and their experts from the GCG group to interpret the CPT data and to correlate with the results of the different investigation techniques. This enabled a better understanding of the expected ground conditions and parameters to be developed and considered in designing the tunnel lining and the ground treatment necessary for the construction of the launching and retrieval shafts, the bored tunnel and the cross-passages.

Following this campaign and its interpretation, the challenges identified could be summarized as follows: how to build shafts, how to drive the TBM, and how to construct cross-passages in ground conditions which are:

- *Highly permeable (> 10⁻²m/sec), precluding the use of slurry walls (diaphragm walls) as lateral supports;*
- *Meta-stable to unstable, especially along the TBM drive, Low fines content, preventing effective soil conditioning of tunnel spoil, compromising the TBM's ability to stabilize the excavation face using EPB mode.*

TBM Launching and retrieval shafts

At approximately 12m deep, the TBM launch and reception shafts are the deepest supported excavations constructed to date in South Florida. The solution adopted was Cutter



Soil Layer	Geological Description	Strata Description
Layer S1	Man-Made Deposits	Reclamation/Dredged Limestone Fill
Layer S2	Coastal Sediments	Sand, Silty Sand and Silt
Layer S3	Miami Limestone	Weakly cemented limestone with fine sand
Layer S4	Transition Zone	Siliceous sand, limestone / cemented sand layers
Layer S5	Fort Thompson Formation	Moderately to strongly cemented, fine to medium-grained sandy Limestone (UCS 1.5-35.5MPa)
Layer S6	Anastasia Formation	Cemented Shell / Cemented Sand (Coquina) (UCS 2.4-24.2MPa)
Layer S7	Key Largo Formation	Coralline limestone, heavily dissolved and highly porous (coral and limestone fragments weakly to very weakly cemented with calcarenite with zones of uncemented fragments and sand lenses)
Layer S7 SILT		Lime Silt with varying amounts of limestone fragments
Layer S8	Tamiami Formation	Limestone and Sandstone with interbedded lenses of cemented sand, cemented shell and sand (UCS 0.9-35.9MPa)

Fig. 1. Profil géologique / Geological profile

les soutènements consista à réaliser des panneaux en CSM « Cutter Soil Mixing » (broyage et mixage du terrain avec un mortier ciment) combinées avec la mise en œuvre de profilés métalliques, assurant ainsi résistance et étanchéité durant les phases de construction. Les panneaux de CSM d'une largeur de 1.2m et profondeur variant entre 13m et 22m, et retenues par des tirants d'ancrage d'une longueur maximale de 48m auxquels on été associés un béton immergé d'environ 1.5m retenu par un ensemble de micro pieux (Φ 0.215m) et de pieux (Φ 1.0m) a permis la mise en place du tunnelier et son démontage dans des conditions optimales d'étanchéité.

Cependant les limites de faisabilité de ces techniques et des moyens d'excavation a conduit le chantier à réduire très sensiblement la longueur des puits (environ 91m) permettant ainsi d'éviter de traverser une couche de terrain particulièrement dure, mais aboutissant à lancer et recevoir le tunnelier sans couverture naturelle.

De manière à recréer la couverture de terrain nécessaire à la stabilité du tunnel, un remblai de plus de 7m composé d'un remblai en grave ciment compacté renforcé par un géotextile a été réalisé sur les 100 premiers mètres de chaque tunnel.

Soil Mixing, CSM, (the first local use of the technique) reinforced with vertical steel soldier piles to form the reinforced walls for the support of excavation. The CSM panels were 1.2m wide and ranged between 13m and 22m deep with a specified low permeability. To provide a clear open space within which to erect and launch the TBM, inclined tieback anchors (up to 48m in length) were installed through the CSM panels, from above ground water level, following which excavation was achieved using long reach backhoes, in the wet. A 1.5m thick tremie concrete bottom seal was constructed underwater to allow dewatering of the excavation. Micropile (0.215m diameter) and pile (1 m diameter) tie-downs were required to resist uplift forces in both the temporary and permanent cases and were between 10 and 20m long.

Limitations on the depth and power of the CSM technique and the difficulty of the subsequent bulk shaft excavation necessitated making the shafts as shallow as practically possible to avoid having to excavate in the deep harder rock layers. This was overcome by extending the length of the bored tunnels (each bore was extended by 91 m) to effectively raise the base level of the shafts.

Alors qu'un exercice de Value Engineering avait permis d'aboutir à une optimisation de l'alignement du projet, Bouygues Travaux Publics a dû mettre en place un traitement complémentaire de terrain permettant de garantir la stabilité des tunnels alors que la distance entre chaque tube ne dépassait pas 4.3m. Ce traitement de renforcement de sol a été mené au moyen d'un ensemble de panneaux discontinus de CSM et de colonnes sécantes de « Shallow Soil Mixing ». Cette dernière technique, similaire à celle des CSM, mais pour de faibles profondeurs, permet de mélanger, au moyen d'un batteur de grand diamètre, le terrain naturel ainsi déstructuré à un mortier. Grâce à la mise en œuvre de l'ensemble de ces techniques, les tassements de surface n'ont pas excéder 15mm en moyenne.



Fig. 3. CSM Cutter & Renforcement de sol de surface (SSM) / CSM Cutter & Shallow Soil Mixing (SSM)



Fig 5. Puits de lancement de Watson

Le tunnelier

L'analyse des conditions de terrain ayant mis en évidence les difficultés techniques importantes de confinement et donc de stabilité de la face sur un linéaire important du projet, le tunnelier à pression de terre (EPB) et son système de management de marinage a dû être notablement modifié de manière à pouvoir traverser cette zone difficile.

This shaft depth reduction resulted in the unique challenge for the TBM bored tunnels commencing and completing boring above the natural ground level. To provide a minimum cover to the TBM, 7m high permanent embankments were constructed on both islands over the alignment for the first approximately 100m of the tunnel bores. To enhance stability during tunnel boring, embankments were constructed using an engineered cement-stabilised fill with geotextile reinforcement.

A Value Engineering exercise carried out at the early stage of the project resulted in bringing the tunnels closer together which allowed the tunnel portals to be located in single shafts on each island (as opposed to the original scheme of two shafts on each island). This further resulted in a minimum separation between the tunnels of 4.3m at the portals. In order to guarantee the stability of the tunnels during construction and limit settlement during boring activities, a combination of shallow soil mixing treatment of the upper layers (reclamation fills and soft lagoon silts) and discontinuous CSM panels between the two tubes were constructed until the separation between the bores was more than 7m.

This treatment ensured minimal effect on surrounding public facilities with a final average ground settlement of 15mm achieved along the alignment.

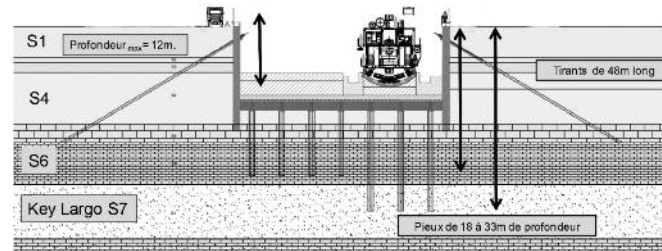


Fig 4. Principe de soutènement / lateral Support



Fig 6. TBM in launching shaft

Tunneling

Following the complementary ground investigation, which identified serious concerns regarding the possibility of not being able to sufficiently condition the TBM spoil in the cutterhead and thus to maintain face stability over a significant section of the project, a series of modifications to the TBM were implemented.

Les différents modes d'opération du tunnelier ont mis en œuvre en fonction des conditions géologiques rencontrées. Ainsi, sur une partie importante du tracé, la couverture du tunnel étant limitée (inférieure à un diamètre sur 67% du tracé), le confinement et le maintien de la stabilité de la face était primordiale pour limiter au maximum les tassements de surface sous les structures du Port de Miami ou sous l'autoroute conduisant à Miami Beach.

Le mode à pression de terre a été ainsi utilisé en début et fin de drive, là où la granulométrie des terrains permettait d'assurer un conditionnement de sol efficace et donc un confinement adéquat. Pour ce mode, le conditionnement des terrains excavés a été principalement assuré grâce à l'utilisation de mousse, mais, dans certaines zones où la teneur en eau était trop élevée, un polymère spécialement adapté au milieu salin a été mis en œuvre.

Cependant dans la zone la plus profonde, sur plus d'un tiers du tracé, où la stabilité du terrain en phase d'excavation était remise en question et la granulométrie inadaptée à un mode à pression de terre, la mise en œuvre du tunnelier, sans une adaptation particulière du processus d'excavation, aurait conduit à une prise de risque inacceptable pour le projet.

En dépit d'une campagne de tests de conditionnement hors normes avec les matériaux issus de la campagne complémentaire, que ce soit sur chantier ou dans les laboratoires de Bouygues Travaux Publics (avec l'utilisation du modèle réduit de simulation de conditionnement de sol OBYONE), et malgré l'utilisation de polymères en quantité importantes, il fut très difficile d'obtenir la pâte nécessaire au procédé EPB, et surtout impossible de la reproduire de façon fiable compte tenu de la granulométrie des sols rencontrés.

De manière à pouvoir relever ce challenge, un procédé innovant, appelé le « Water Control Process », a été mis en place sur le tunnelier. Ce procédé de marinage hydraulique installé à l'extrémité de la vis d'extraction et consistait à joindre un concasseur à un système de marinage hydraulique.

Cette méthode ne permettant pas d'assurer une pression de confinement des terrains en place, sa mise en œuvre a nécessité de s'assurer de la stabilité des terrains durant l'excavation, au moyen d'un traitement de sol adapté.

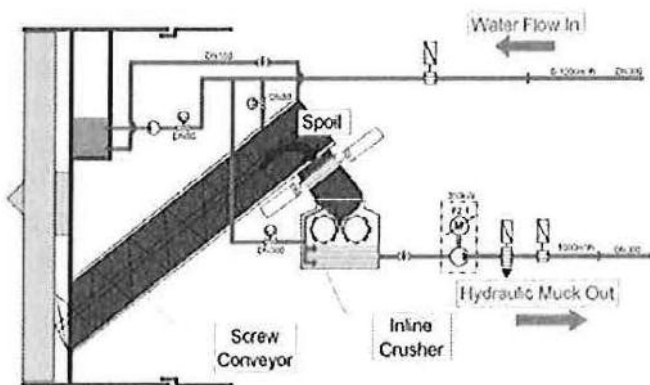


Fig. 2. Le mode « WPC » du tunnelier / TBM « WPC » modes

The tunnel boring was subdivided according to the different modes developed for the excavation in specific ground conditions. Effective and controlled operation was particularly important as a significant length of the tunnel bores (67% including the channel section) had a ground cover of less than one tunnel diameter with highways and existing Port structures above the tunnel which were sensitive to ground movement.

The EPB process was implemented where the ground conditions suited and generally corresponded to the beginning and end of the tunnel drives, in ground which during the excavation produced a suitably graded spoil to enable the EPB process to work effectively. Foam was generally used but where necessary in ground with high water content, a special water absorbent polymer developed specifically to address the saline ground water at the site was also used.

In the deeper sections of the tunnel alignment (about one third of the tunnel bore length), where the stability of the face was questionable and the ground conditions were such that the effective implementation of face support pressure by the EPB process was not assured, a significant risk of not being able to safely progress the tunnels existed. This put the project at an unacceptable risk level.

An extensive series of spoil conditioning tests were performed both in local laboratories and in Bouygues' materials laboratory (where a sophisticated model earth pressure balance machine OBYONE was used to perform tests under representative pressures) on samples obtained from the complementary ground investigation. Testing included the use of conditioning agents such as foam and polymer and a specifically devised filler material was used in an attempt to alter the overall grading of the spoil which would be produced in the cutterhead. A stable plastic spoil could rarely be formed in the granular materials, even using unusually high percentages of conditioning agents, and when it was achieved subsequent tests gave different results indicating the inability to guarantee the necessary robustness of the spoil conditioning in the prevailing conditions.

To ensure the project could progress, an innovative Water Control Process (WCP) boring mode was devised, which in addition to the classical EPB process, was considered to be the optimum approach to overcome the challenges presented by the ground conditions at the site. For the WCP mode a hydraulic circuit was connected to the end of the screw conveyor with an inline crusher.

As no consistent and controlled overpressure could be formed at the excavation face using the WCP method, a prerequisite to its implementation was that the excavation face be self stable. To achieve this, it was necessary to perform adequate ground treatment in advance of the tunnel boring.

Les traitements de terrain

Une série de 9 tests d'injection a été réalisée de manière à atteindre deux objectifs. Le premier était de définir la composition et les propriétés du mortier permettant une injection efficace évitant des pertes importantes suite à la forte perméabilité des terrains en place. Parallèlement, ce mortier se devait d'avoir aussi une rhéologie et résistance compatible au forage par le tunnelier. Le deuxième objectif était d'optimiser et valider les procédures d'injection, la distribution des forages et le phasage d'injection.

Ces différents tests sur chantier ont abouti à la mise en œuvre d'un mortier thixotropique de faible mobilité compatible avec les conditions de sol, associée à une répartition de forage et des méthodes d'injection adéquates, permettant d'assurer la stabilité de la face durant les phases d'excavation du tunnelier.

Ce programme d'injection fut réalisé en amont de l'excavation du tunnel, avec des moyens terrestres classiques et des barges pour la partie principale réalisée dans le chenal. Cette campagne de plus de 1050 forages (~30km), 50 000m³ de mortier est à ce jour la plus grande campagne d'injection jamais réalisée aux États-Unis.

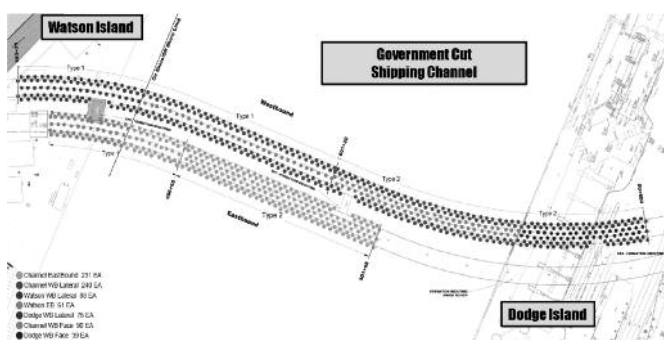


Fig 8. Traitement des terrains pour le tunnel / Tunnel ground treatment

Bouchons d'inspection de maintenance du tunnelier & Intertubes

Sans des mesures spécifiques, la forte perméabilité des terrains rendait quasi impossible la maintenance du tunnelier et notamment les inspections de routine de la tête et le changement nécessaires des outils. Fort de l'expérience des soutènements des puits d'entrée et de sortie du tunnelier, un ensemble de bouchons d'inspection et de maintenance, judicieusement répartis sur le tracé.

De la même manière, trois des intertubes furent réalisés sous couvert de panneaux de CSM, permettant leur excavation selon les méthodes conventionnelles. Deux autres intertubes ont cependant nécessité des traitements de terrain similaires à ceux du tunnelier, compte tenu de leur

Ground treatment

A series of nine extensive full scale field grouting trials were performed to satisfy two goals. The first was to identify stable grout formulations which were capable of effectively penetrating the porosity of the ground and which had rheological properties sufficient to manage the risk of "runaway" takes or washout. Equally, such mixes had to have low strength, compatible with the ground and be amenable to the TBM excavation. The second goal was to determine and optimise operational parameters relating to the placement of the grout such as hole spacing and delivery method (e.g. upstage versus downstage).

Based upon the findings of the field trials a unique low mobility, thixotropic grout was developed suited to the site specific conditions and an optimal grout hole spacing was defined to sufficiently achieve the formation grouting programme's target of controlling ground water and stabilising the meta-stable layer along the tunnel alignment.

This extensive grouting programme was performed in advance of the TBM progress both on shore and off shore from barges. The final formation grouting programme comprised more than 1050 holes (i.e 30 km of drilling) and the injection of approx. 50,000m³ of grout. At the time this was the largest grouting operation in the USA.



Fig 9. Traitement des terrains par barges / Tunnel Ground Treatment on pontoon

TBM intervention shafts & Cross-passages

The highly permeable ground conditions did not lend themselves to safely performing the necessary routine inspections of the TBM cutter discs and tools and associated maintenance. To address this, inspection plugs of CSM treated ground were formed using overlapping CSM panels constructed from Watson and Dodge Islands at predetermined locations along the alignments of the two tunnels.

To facilitate the safe excavation of the cross passages between the bores, three of the cross passages have been treated by overlapping CSM panels which provided a robust and low permeability temporary support for the excavation.

localisation (sous de réseaux importants, ou dans le chenal) et leur profondeur nécessitant une excavation sous congélation dans les terrains métastables identifiés lors de la campagne complémentaire. Pour ce faire, seul l'espace entre les forages a été modifié et fortement réduit par rapport aux injections du tunnel, de manière à limiter la perméabilité et réduire la circulation de l'eau autour de ces intertubes.

4. DURABILITÉ

Alors que la plupart des structures ne sont soumises qu'à des critères de durabilité oscillant entre 50 et 75 ans conformément aux préconisations de FDOT et des ACI, le tunnel de Miami est quant à lui soumis à un critère de durabilité des structures de 150 ans.

En Floride comme partout ailleurs aux États-Unis, la conformité des ouvrages aux critères de durabilité se fait généralement par la stricte application des prescriptions, dans le cas précis FDOT, ou plus généralement des ACI (à savoir le ratio eau / ciment, la quantité de liant, l'enrobage, etc.), et ce en fonction :

- de l'exposition (classes environnementales),
 - de la sélection de matériaux testés et approuvés,
 - de mix béton définis et optimisés en laboratoires accrédités,
 - de tests de convenance soumis à l'approbation de FDOT.
- Confortés par l'application stricte de règles de mise en œuvre :
- Moyens de production certifiés (Centres accrédités par FDOT),
 - Méthode de bétonnage
 - Enrobage minimal et espacement des aciers
 - Contrôle qualité durant la production.

De manière à répondre aux impératifs du contrat imposant une durabilité de 150 ans, Bouygues Travaux Publics a dû explorer d'autres voies, impliquant l'extrapolation des conditions climatiques, des caractéristiques des matériaux et des modèles de détérioration.

Comme pour le design des structures, le design pour la durabilité requiert une méthodologie et des modèles de calcul intégrant les différents modes de dégradations, définissant les états limites et les facteurs de sécurité.

Alors que les normes FDOT s'attachent principalement à garantir la mise en œuvre de béton de très faible perméabilité, et à très faible teneur initiale en ion chlore, combiné à un enrobage minimum des armatures, Bouygues Travaux Publics a utilisé l'approche performancielle du modèle Duracrete/Darts. Cette approche a permis de prendre en compte l'agressivité de l'environnement, les modes de dégradations potentiels (corrosion, carbonatation etc.) et les caractéristiques des matériaux retenus, et de mettre en œuvre des modèles probabilistes qui ont permis à l'ingénieur d'estimer l'évolution des caractéristiques des matériaux en fonction de leur exposition.

Similar ground treatment at the remaining two cross passages was prohibited due to surface restrictions (utilities and shipping channel) and the solution adopted for the temporary support of these excavations was ground freezing. These two cross passages are located within the highly porous and meta-stable layer which together with high recorded ground water movements brought specific challenges to ground freezing in terms of effective freeze time and long term ground stability. These risks were mitigated by an intense campaign of pre-grouting at the cross passage locations using the same grout and methods as used for the tunnel grouting but with a reduced injection holes spacing.

4. DURABILITY

Whereas the general durability design strategy developed by the FDOT and ACI codes are defined for a service life of 75 and 50 years respectively, the Port of Miami tunnel structures are subject to 150 years service life requirement.

The usual methods of demonstrating durability, as defined by FDOT or the ACIs, is the application of prescriptive rules (specifications of w/c ratio, minimum cementitious content, cementitious replacement, concrete cover etc.), based upon:

- *Environmental classification (different macro-environmental aggressiveness classes)*
- *Selection of tested and approved material (concrete constituents)*
- *Design and optimization of concrete mixes among accredited laboratory*
- *Compliance test and submission to FDOT Verifier.*

And, execution parameters such as:

- *Means for concrete production (e.g. use of FDOT's approved production centre)*
- *Method for concreting operation and optimisation of execution process*
- *Determining the reinforcement lay out and minimum concrete cover*
- *Quality control process during production and construction.*

To design effectively a 150 years service life as required for the Project, the Bouygues' project team had to step outside the current codes, which required extrapolation of current knowledge of climate and material properties as well as the extrapolation of material deterioration models.

The design for durability requires an overall methodology and calculation models for the actual degradation processes of concrete structures, similar to the structural design code for loads, using limit states and factor of safety.

The FDOT codes are based on controlling the concrete mix to obtain low permeable concrete; limitation of the chlorides content in the original concrete mix ingredients; and minimum concrete cover on rebar. Bouygues' proposed a performance based design using the Duracrete/Darts model for the targeted service life to control corrosion of reinforcement taking into account the nature of the environmental aggressiveness, the degradation processes and the material properties involved. The big step forward to performance related durability design is that the full probabilistic models enable the designer to evaluate the time-related changes in materials depending on the specific material and environmental conditions.

Plusieurs modèles probabilistes furent ainsi utilisés, incluant pour chacun d'entre eux, un ensemble de paramètres tels que les dimensions des éléments concernés, les paramètres environnementaux possibles et la propriété des matériaux, comme pour une étude de structures.

En complément, ces études paramétriques ont été corrélées et validées par des études de sensibilité sur des ouvrages existants et des modèles étudiés résultant de l'expérience de FDOT en Floride (Sagüés, A.A. and Kran).

Ainsi, les voussoirs préfabriqués du tunnel et les structures coulés en place ont été considérées comme soumis à une vaste plage de conditions environnementales prenant en compte les zones de marnage, le taux actuel de chlorure, le taux de sulfate dans le sol existant, l'exposition à l'air marin et la pollution atmosphérique lié au dioxyde de carbone etc.

Suite à ces modélisations et en accord avec FDOT, le choix du béton des voussoirs s'est rapidement porté sur un béton ternaire (ciment, cendres volantes et laitier).

Le mode principal de dégradation des armatures a quant à lui été identifié comme étant lié à la dépassement des aciers par les ions chlorure, et à moindre niveau, la carbonatation. Les modèles probabilistes ont permis de démontrer que les critères de durabilité pouvaient être respectés, en prenant en compte l'ensemble des phénomènes, de la phase d'initiation à celle de propagation.

En conséquence de quoi, l'enrobage des armatures des voussoirs du tunnel a été fixé à 3" (76.2mm), alors que l'enrobage de 4" (101,6mm) des structures extérieures (tranchées couvertes et ouvertes) tels que prescrits par FDOT a été validé.

5. LA PROTECTION AU FEU

Le projet du Port de Miami est le premier tunnel aux Etats-Unis, soumis à la stricte application de la norme NFPA 502 édition 2008. Même si cette norme est similaire à celles appliquées de nos jours en Europe, notamment pour ce qui concerne les critères de non-éclatement des bétons, l'absence d'expertise locale, de matériaux adéquats et de laboratoires capables de réaliser des tests au feu de grande échelle a été problématique.

De manière à surmonter ces problèmes, Bouygues Travaux Publics a proposé une approche innovante utilisant l'expertise d'Efectis Netherlands et le développement récent d'un four mobile. L'approche retenue peut être résumée comme suit :

Étape 1 : détermination de la température d'éclatement du béton des voussoirs du tunnel, pour évaluer le comportement au feu du béton seul.

Étape 2 : Vérification du respect des critères de températures maximales en fonction système de protection passive retenu.

La première étape a été réalisée durant le mois de Mai 2012 à Miami, au travers de tests au feu. Cette étude paramétrique a été conduite sur la base de courbes de feu visant à simuler la température maximale d'interface une fois le

Different models used for this durability design consist of design parameters such as structural dimensions, environmental parameters and material properties that correspond to the load and resistance variables of the structural design procedure.

The parametric studies have been complemented by a sensitivity analysis using the proposed mixes design with actual field data collected from bridges in Florida (Sagüés, A.A. and Kran).

The tunnel reinforced precast and cast in-situ structure elements were considered to be exposed to a broad range of environmental conditions which may harm the material and as a consequence the structure itself, including a marine tidal/splash zone; elements permanently submerged in seawater; high chloride and acid sulphate potential soil in place; exposure to airborne salt and atmospheric Carbon dioxide etc.

Following this specific modeling and various discussions held with FDOT, the use of ternary blend was agreed upon for the design of the mix for the tunnel precast tunnel segments.

The deterioration mechanism with regards to onset reinforcement corrosion in the evaluation of the service life was regarded as reinforcement depassivation by chloride ingress and at a lower level by carbonation induced corrosion. The result of the simulation, using the full probabilistic Duracrete/Darts model, shows that the design service life can be reliably achieved, taking into account the relevant initiation and subsequent deterioration process.

Consequently, the cover on reinforcement for the tunnel segments were chosen at 3" [76.2 mm], whereas a cover of 4" [101.6 mm] as prescribed by FDOT for the cast-in place elements such as Cut & Cover and open Cuts was confirmed.

5. PASSIVE FIRE PROTECTION

The Port of Miami Tunnel is the first project within the United States of America being subject to the requirements for passive fire protection (NFPA 502 edition 2008). These requirements, even if rather similar to those applicable nowadays in Europe and especially for what relates to no-spalling of precast concrete elements under fire conditions, raised many issues in the absence of local expertise, adequate laboratories able to perform the required fire tests, and local materials.

To overcome this issue, Bouygues Travaux Publics has developed an innovative approach using the mobile furnace designed by Efectis Netherlands. This approach can be summarized as follow:

Step 1: *Determination of the critical spalling temperature of the concrete precast segments used on the Port of Miami Tunnel, assessing the behavior of the concrete itself under fire conditions;*

Step 2: *Verification of the proposed fire proofing systems with regards to its ability to fulfill the temperature criteria as obtained in Step 1.*

Step 1 was completed through fire tests performed in Miami during the month of May 2012, using the expertise of Efectis Netherlands in determining a range of equivalent interface temperature curves, corresponding to the temper-

béton des voussoirs protégé. Cette étude a été rendue possible grâce à l'expertise d'Effectis Netherlands.

La deuxième étape a alors consisté à vérifier que le système de protection passive permettait alors de respecter les critères de température d'interface obtenue à l'étape précédente.

L'avantage principal de cette méthode a été de s'affranchir totalement du choix des produits pour les tests au feu sur les voussoirs du tunnel, et de limiter ainsi le nombre de test au feu à réaliser. Dans le cas présent, cette approche a aussi permis d'éviter de réaliser ces tests en Europe.

La solution technique retenue est celle de plaques Promat T, posées en facettes et retenue par des ancrages inox, permettant une mise en œuvre rapide et concourante avec la pose de certains équipements.



Fig. 10. Test au Feu / Fire test

6. SYSTÈMES & OPÉRATIONS

Dès la phase de conception du projet, un comité santé et sécurité dédié au projet fut constitué. Ce comité, composé du client (FDOT), de l'exploitant, des différents services d'urgence et de Bouygues Travaux Publics, avait comme principaux objectifs :

- de valider les options prises tant en terme d'opérations que d'études,
- de garantir la conformité du projet aux règlements applicables en matières de sécurité,
- d'aboutir à un consensus entre les différents services d'urgences,
- de définir et coordonner les réponses à donner à chaque type d'incident,
- de définir les principales procédures d'urgence,
- de se familiariser avec l'infrastructure et ses équipements,
- et enfin de procéder à toutes les formations nécessaires des personnels concernés.

Ce comité a permis de développer la conception du tunnel et de ses équipements en totale coordination avec les principaux intervenants garantissant ainsi l'adéquation entre l'infrastructure et ses systèmes, les modes opérationnels de l'exploitant, les moyens et modes opératoires des services d'urgence locaux.

Deux systèmes d'opération du tunnel en ont alors découlé ; l'un purement dédié à la gestion du trafic (*Traffic Surveillance and Control System ou TSCS*), et l'autre dédié à la gestion des principaux équipements de sécurité et

atures curves which would be achieved if the concrete was protected by a passive fire protection material.

Step 2 consisted then by checking that the chosen passive fire protection system allowed to reduce the heat transfer to the concrete to the maximum allowable interface temperature curve determined in step 1.

This approach had the main advantages to save time by limiting the number of fire tests (which were carried out independently of the passive fire protection), and to avoid such tests to be performed in Europe.

The Passive fire protection system implemented on site is a faceted system of Promat T boards anchored with stainless steel nails, which allowed equipments to be installed concurrently.

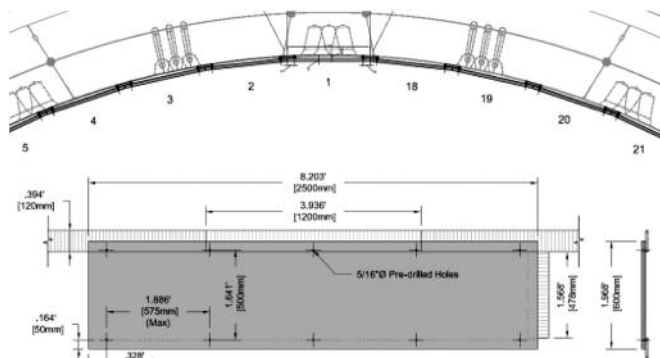


Fig 11. Passive Fire protection system

6. SYSTEMS & OPERATIONS

During the planning/construction process, a Fire/Life Safety and Traffic Operations and Traffic Management working group representing emergency responder interests was established as a steering committee, to pursue the following goals:

- To validate the design and operational principles;
- To ensure compliance with all appropriate regulations and codes to maximize safety;
- To achieve consensus from emergency response stakeholders;
- To coordinate their response efforts to incidents;
- To review current and proposed emergency response stakeholders response plans and procedures;
- To review and become familiar with tunnel proposed response plans and procedures;
- To become familiar with the new tunnel safety and life support equipment;
- And to establish and conduct ongoing tunnel training for their staffs (incident response drills, etc.);

This process continued throughout the life of the Project as a forum to mitigate design and operational issues and maintain agency input into the emergency response and fire/life safety aspects of the Project.

The primary tunnel operations and control system consist of two individual systems; the Traffic Surveillance and Control System (TSCS) and Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) System.

d'exploitation du tunnel et leur intégration (*Supervisory Control and Data Acquisition* ou *SCADA system*).

Ainsi le TSCS permet la gestion directe des équipements suivant :

- les caméras de vidéosurveillance et de détection d'incident (CCTV),
- le système de détection des véhicules,
- les feux d'affectation des voies,
- les panneaux à messages variables,
- le système de détection des hors-gabarit,
- les système de fermeture du tunnel au trafic,
- le système d'information radio,
- la signalisation fixe.
- en coordination totale avec le système d'exploitation du Client (FDOT) sur les lots adjacents.

Le SCADA, quant à lui, est dédié à l'ensemble des systèmes d'opérations du tunnel (hors trafic), et plus particulièrement aux systèmes de sécurité que sont :

- Ventilation du tunnel et qualité de l'Air,
- Ventilation et pressurisation des intertubes,
- Pompes,
- Portes anti-inondations,
- Sprinkler,
- Alimentation principale et secondaire,
- Éclairage,
- Anti-intrusion,
- Onduleurs,
- Alarme incendie,
- Mesure de vibrations et d'explosion,
- Et tous les systèmes et équipements des bâtiments annexes de services et d'exploitation.

De manière à fournir à l'opérateur un système d'opération unifiée, un interface spécifique a été développé pour permettre de suivre le trafic en temps réel et d'opérer l'ensemble des systèmes du projet à partir d'une simple console. Les chiffres à retenir, en termes d'équipements, sont les suivants :

Système Électrique

- Distribution Electric - 150km câbles
- Eclairage Tunnel - 1500 luminaires
- Détection Incendie - 350 détecteurs
- Contrôle Commande - 3 postes de contrôle
- Gestion de trafic - 60 Panneaux d'affichage
- Télécommunications – 5km fibre optique
- Détection d'Incident -100 caméras
- Détection de déflagration – 10 appareils

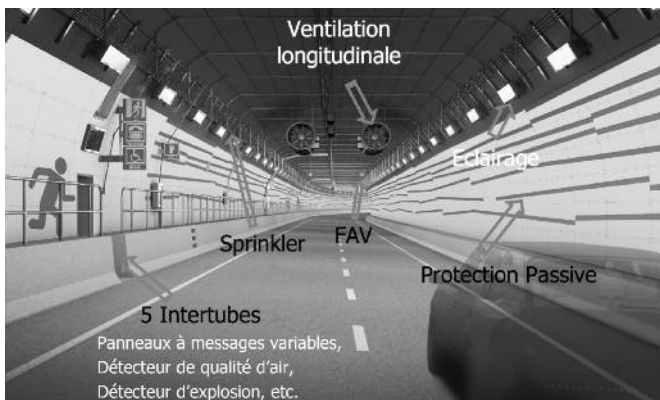


Fig 13. Les équipements du tunnel

The TSCS system is dedicated to the following subsystems:

- Closed-Circuit Television (CCTV) Cameras and Incident Detection (CCTV fixed Cameras with software);
- Vehicle Sensors;
- Lane Use Signals (LUS);
- Dynamic Message Signs (DMS);
- Over-height Vehicle Detection (OHVD);
- Portal Traffic Closure Signals (PTCS);
- Traffic Control Gates;
- Radio Rebroadcast and,
- Fixed signage.

Secondly, the SCADA System is designed to allow performing all monitoring and controlling functions required to support the operation of all of the tunnel systems, including the life safety system:

- Ventilation and Air Quality;
- Cross Passage Ventilation and Pressurization;
- Pump Stations and discharge Station;
- Flood Gates;
- Fire Protection (sprinkler);
- Primary and secondary Power Distribution;
- Lighting; and
- Intrusion Detection
- Secondary Power Distribution
- Uninterruptible Power Systems;
- Fire Alarm and Detection;
- Tunnel Vibration Monitoring
- Buildings systems.

A unified operator interface has been developed that integrates the TSCS and SCADA System allowing each system to be monitored and controlled from a workstation.

The main characteristics of the tunnel equipments are as follow:

Electrical system

- Cables – 150 km
- Lighting – 1500 luminaries
- Fire detection – 350
- Control Command – 3
- Traffic management – 60 panels
- Communication – 5km
- Incident detection – 100 cameras
- Blast Monitoring – 10 monitors

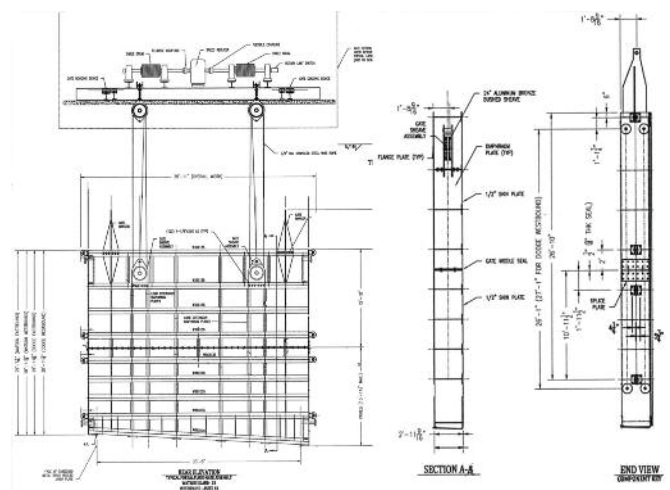


Fig 14. Flood gates

- Analyse de qualité d'air
- Système mécanique :
- Ventilation tunnel - 44 ventilateurs Jet 50 ch.
- Protection Incendie - 2000 sprinklers
- Pompage, Drainage - 9 pompes 150 ch., 12m³/mn
- Portes coupe-feu - 40 portes
- Portes anti-inondations - 4 portes de 60 tonnes 9.5m de hauteur 12m de largeur

7. CONCLUSION

A bien des égards, le tunnel du Port de Miami est un projet unique, qui a mérité une attention toute spécifique, que ce soit pour ses conditions géologiques, et ses spécificités en terme de durabilité, systèmes et modes opératoires. Grâce à des moyens hors du commun, et des procédés innovants, Bouygues Travaux Publics a su relever avec succès l'ensemble des défis qui s'offrait à lui. Ce projet unique méritait donc bien un écrin à sa hauteur ; une architecture innovante emblème du savoir faire de l'entreprise.

- Air quality monitors
- Mechanical system
- Ventilation – 44 fans of 50 h.p
- Sprinkler – 2000
- Pumps – 9 of 150 h.p 12m³/mn
- Fire doors – 40
- Flood gates – 4 doors of 60tons 9.5m high 12m wide

7. CONCLUSION

As presented above, the Port of Miami tunnels project is, in many aspects, "one of a kind". It deserved very particular attentions due to its unique ground conditions, and its specificities in term of durability requirements, systems and operations modes.

Innovative processes and extraordinary means enabled Bouygues Travaux Publics to successfully overcome the different challenges of this Project. Accordingly, this unique project expanded the boundaries of current knowledge and technology thereby showcasing Bouygues' know-how and commitment to rising to the challenge.



Fig 15. Architecture du Projet / Project Architecture