

CONCEPTION ET REALISATION DU VIADUC A OSSATURE MIXTE SUR OUED MOULOUYA AUTOROUTE FES-OUJDA



Réalisé par

Y. TLIDI (ADM)

MARS 2010

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	3
2	HISTORIQUE DES PONTS METALLIQUES ET MIXTES	4
3	CONCEPTION DE L'OUVRAGE.....	4
3.1	Descriptif de l'ouvrage.....	5
3.2	Données géotechniques	6
3.3	Aspects hydrauliques.....	7
3.4	Mode de reprise sismique.....	8
4	FICHE TECHNIQUE DU PROJET	9
5	TRAVAUX DE FONDATION DE L'OUVRAGE	10
5.1	Réalisation et réception des colonnes ballastées.....	10
5.2	Réalisation et réception des Barrettes.....	11
5.3	Semelles et élévations.....	11
6	TRAVAUX DE CHARPENTE METALLIQUE	11
6.1	Etapes de fabrication de l'ossature métallique	11
6.2	Transport sur site	16
6.3	Montage et assemblage de l'ossature métallique sur site.....	16
6.4	Laçage	17
6.5	Déverinage et descente verticale sur les appareils d'appuis	21
7	NORMES, CONTRÔLE ET RECÉPTION DES POUTRES MÉTALLIQUES.....	21
8	BÉTONNAGE DE L'HOUDIS.....	23
9	CONCLUSION.....	24
10	EVOLUTION DE CHANTIER PAR PHOTOS	25

1 INTRODUCTION

L'ouvrage de franchissement de l'oued Moulouya objet de cette présentation est situé au niveau de PK 8+300 de la section Guercif – Taourirt sur l'autoroute Taza – Oujda, le viaduc se développe sur une longueur totale de 440 m, et repose sur 7 piles et 2 culées d'extrémité, il sépare la province de Taourirt et celle de Guercif, l'ouvrage est un pont hyperstatique à huit travées, à ossature mixte (poutres en acier et dalle en béton).

La conception de cet ouvrage qui présente l'avantage d'être légère, permet d'obtenir des longueurs de travées plus importantes (six travées de 60m) et réduit aussi le nombre d'appuis à réaliser, il est à noter que cette conception est une première sur le réseau autoroutier marocain.

Pour tenir compte des difficultés géotechniques et pour pallier aux risques d'affouillements, des techniques de colonnes ballastées, de barrettes et des tapis d'enrochements ont été retenues pour garantir l'exécution et la pérennité de l'ouvrage.

Par ailleurs, la préparation de la charpente métallique (ossature obtenue par soudage des poutres métalliques PRS et d'entretoises) a été réalisée à partir d'une plate-forme de lancement, celle-ci, ayant une longueur de 280m. La charpente du tablier munie de son avant-bec est alors « lancée » horizontalement sur le sommet des sept piles à partir de la culée C0 jusqu'à C8. L'opération est d'autant plus spectaculaire que les forces en jeu sont considérables, d'où la nécessité de préparer minutieusement le plan de poussage.

Aussi, il convient de signaler que techniquement, les poutres métalliques avancent grâce à un système d'appuis glissant composé pour les plots de la plateforme d'assemblage par un patin en élastomère surmonté par une tôle et le PTFE, a priori suffisamment épais pour absorber les très faibles rotations de contre-flèches, pour les piles et culées ce système est remplacé par des balancelles articulées, en raison des grandes rotations imposées par l'avant-bec. L'ensemble de la charpente est tracté à l'aide d'un treuil et progresse à la vitesse de 1 mètre par minute.

Le présent travail comprend (04) parties : la première partie traitera la conception de l'ouvrage en tenant compte des données géotechniques, hydrauliques, et le mode de fondation de l'ouvrage à retenir, la deuxième partie développera les étapes de fabrication de l'ossature métallique y compris le transport sur site, la troisième partie sera consacrée aux montage et lancement de l'ossature métallique sur site, et finalement la dernière partie sera dédiée au phasage de bétonnage du tablier à l'aide d'un coffrage mobile.

2 HISTORIQUE DES PONTS METALLIQUES ET MIXTES

La construction de ponts métalliques est ancienne et remonte au sixième siècle de notre ère, où des moines bouddhistes ont bâti des ponts suspendus. En Chine, un pont suspendu, a été bâti dès 1706 avec une portée de 100 m. En Europe, le développement de la construction métallique date des débuts de l'ère industrielle, à la fin du XVIIIe siècle. Un premier pont en fonte a été construit en 1779. Le pont de Sunderland en Grande-Bretagne en 1796, avec une portée de 72 m, et la passerelle des Arts, en 1803, marquent les débuts des ponts métalliques. Par la suite, avec le développement de la sidérurgie, le fer remplace la fonte et à partir de 1867, l'acier remplace le fer.

Grâce à des caractéristiques mécaniques qui ne cessent de s'améliorer, comme la limite d'élasticité de l'acier qui passe de 100 ou 150 MPa, à cette époque, à 240 MPa, puis à 360 MPa après la Seconde Guerre mondiale pour atteindre 600 MPa aujourd'hui, les structures sont progressivement allégées

Parallèlement à l'amélioration de la limite d'élasticité de l'acier, l'évolution de la construction métallique a été marquée par celle des modes d'assemblage et celle de la couverture des ponts. Dans les premiers ouvrages en fer et en acier, les différentes pièces étaient assemblées par rivetage au moyen de plaques couvre-joint. En dehors du supplément de poids qu'elle engendre, cette technique est chère en main-d'œuvre. Elle est aujourd'hui abandonnée au profit du soudage.

Toutefois, les premières soudures se sont avérées très fragiles par temps froid : ainsi le pont de Hasselt sur le canal Albert, en Belgique, s'est effondré en 1938 sans que la moindre charge ait été placée sur l'ouvrage ; au Canada, le pont Duplessis s'est écroulé en 1951, par -35°C . Il a donc fallu mettre au point des nuances d'acier spéciales aptes au soudage (appelé maintenant acier E355), et des conditions de soudage qui ne provoquent pas leur fragilisation. On a ensuite utilisé des boulons, puis des boulons à haute résistance dont le principe est de serrer les pièces l'une contre l'autre, par l'intermédiaire de plaques couvre-joint. La résistance de l'assemblage est obtenue par frottement des plaques l'une contre l'autre, grâce à l'effort de serrage contrôlé produit par les boulons. Mais les progrès considérables qui ont été faits dans le domaine du soudage ont fortement limité l'intérêt de cette solution.

Aujourd'hui, les procédures de traçage, de découpage, de soudage et de manutention des pièces en usine sont automatisées et dirigées par ordinateur ;

3 CONCEPTION DE L'OUVRAGE

L'oued Moulouya d'une longueur de 600 km environ est un important fleuve avec un débit centennal d'environ 6500 m³/S. Il est caractérisé par :

- Substratum très profond
- Affouillements importants

Les études d'optimisation de tracé ont conduit au niveau du franchissement de l'autoroute à un viaduc d'une longueur de 440m, lors de la période d'étude deux variantes ont été étudiées :

1^{ère} variante :

11 travées de 40 m isostatiques en poutres préfabriquées en béton précontraint (VIPP)

2^{ème} variante :

8 travées hyperstatiques réparties comme suit : 40,0 m – 6x60,0 m – 40,0 m ; en ossature mixte constituée par une dalle en béton armé associée à deux poutres métalliques en I (Bi-poutre).

Il est à noter que la deuxième variante a été retenue et elle présente l'avantage d'être légère, en effet le poids du tablier de cette variante est de l'ordre de **6 850 tonnes** tandis que le poids du tablier de la variante VIPP est de l'ordre de **16 360 tonnes** c'est-à-dire **2,5 fois plus lourd**.

De même, cette 2^{ème} variante permet d'obtenir des longueurs de travées plus importantes et réduit ainsi le nombre d'appuis à réaliser au niveau de l'oued.

3.1 Descriptif de l'ouvrage

Tablier :

Les poutres métalliques principales sont des profilés reconstitués soudés (PRS) de hauteur constante égale à 2,30 m.

La semelle supérieure des poutres principales, de largeur 700 mm, a une épaisseur variant de 30 mm en travée à 100 mm sur appui. La semelle inférieure a une épaisseur variant de 35 mm en travée à 100 mm sur appui et une largeur constante de 950 mm. Les âmes des poutres ont une épaisseur variant de 18 mm en travée à 20 mm sur appui. Les deux poutres formant l'ossature sont espacées de 5,90 m et sont solidarisées par des entretoises espacées de 6,67 m dans les travées courantes et de 7,5 m dans les travées de rive. Il s'agit de profilés IPE 600 en zone courante et de PRS 900 sur appuis.

La charpente métallique supporte une dalle en béton armé de 10,75 m de largeur. L'épaisseur de la dalle varie de 26 cm sur les encorbellements à 35 cm sur les poutres principales. L'épaisseur entre les deux poutres est égale à 25 cm.

Le profil en travers comprend une chaussée de 6,50 m bordée par une bande d'arrêt d'urgence de 2,00 m et une bande dérasée de 1,00 m. Il présente un dévers unique de 2,50%. (**fig. 1**)

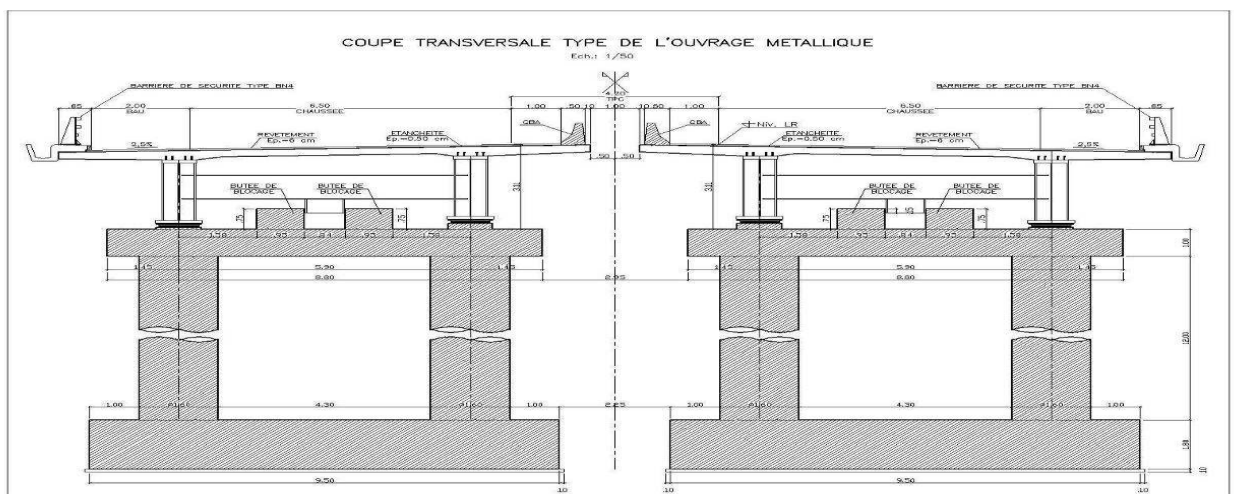


Figure 1

Appuis :

Les piles sont composées de deux fûts circulaires de 1,60 m de diamètre surmontés d'un chevêtre.

Les deux culées sont composées de deux fûts circulaires de 1,30 m de diamètre surmontés d'un chevêtre.

3.2 Données géotechniques

L'oued Moulouya a creusé son lit dans les formations du plateau de Guercif . Cette cuvette est remplie de sédiments du tertiaire : grès, calcaires et marnes du LIAS JUASSIQUE MIOCENE entre autre.

Les sondages au droit de la Moulouya sont donc, sans surprise des sables, marnes et grès sous des alluvions graveleuses du quaternaire.

Dans les sondages effectués pour les besoins du chantier au droit du viaduc, la première couche rencontrée est formée d'alluvions de sables et de graviers du quaternaire sur une épaisseur de 10 à 13 mètres, voir exceptionnellement 20 mètres. Les caractéristiques mécaniques de ce dépôt sont insuffisantes pour y asseoir des fondations superficielles.

Ensuite, on pénètre dans une formation ancienne de sable et de marne appelée « marne, marne sableuse, sable marneux, sable grésifié » donc très hétérogène. Elle s'étend sous les alluvions récentes jusqu'à une profondeur de l'ordre 50 mètres. Elle n'est pas très compacte (p_l de 2 à 3 Mpa). Ses caractéristiques mécaniques sont donc insuffisantes pour y arrêter des pieux travaillant exclusivement en pointe.

La couche qui lui succède est un grès compacte ($p_l=8\text{Mpa}$). Elle permettrait d'y arrêter des pieux travaillant en pointe.

Le choix d'une fondation profonde, arrêter dans les marnes et sables est donc parfaitement justifié.

L'examen des conditions de sol au droit des fondations conduit aux constats suivants :

- ✚ la présence en surface d'une couche de conglomerat cimenté ou altéré en sable et gravier d'épaisseur très variable sur les rives, inexistante au milieu de l'oued.
- ✚ Sous les conglomerats, une couche de limon et sable fin de caractéristiques pressiométriques faibles, cette couche s'étend, selon l'emplacement entre 15 et 20 m de profondeur.
- ✚ Une petite amélioration des caractéristiques pressiométriques à partir de 15 à 20 m de profondeur avec des sols similaires à ceux rencontrés au dessus
- ✚ Des conditions de sol meilleures au droit des rives que dans le lit de l'oued
- ✚ Une nappe artésienne avec des niveaux d'eau mesurés entre 0 et 2,5 m au dessus du TN dans le lit de l'oued.

3.3 Aspects hydrauliques

Le calcul de l'affouillement a conduit au résultat suivant :

Affouillement généralisé	Affouillement local	Affouillement Total
5 m	4 m	9 m

Par ailleurs, les résultats des essais pressiométriques indiquent que les faibles valeurs mesurées entre 9 et 10m de profondeur qui peuvent correspondre à la hauteur des affouillements.

L'exploitation des résultats géotechniques ainsi que les efforts obtenus à la base des semelles ont permis de concevoir un système de fondation suivant :

- La culée C0 et la pile P1 sont fondées sur des semelles superficielles.
- La culée C8 et la pile P7 sont fondées sur des semelles superficielles sur sol traité par un système de colonnes ballastées de 80 cm de diamètre et 15 m de profondeur suivant un maillage triangulaire de 1,60 de côté (**fig. 2**)

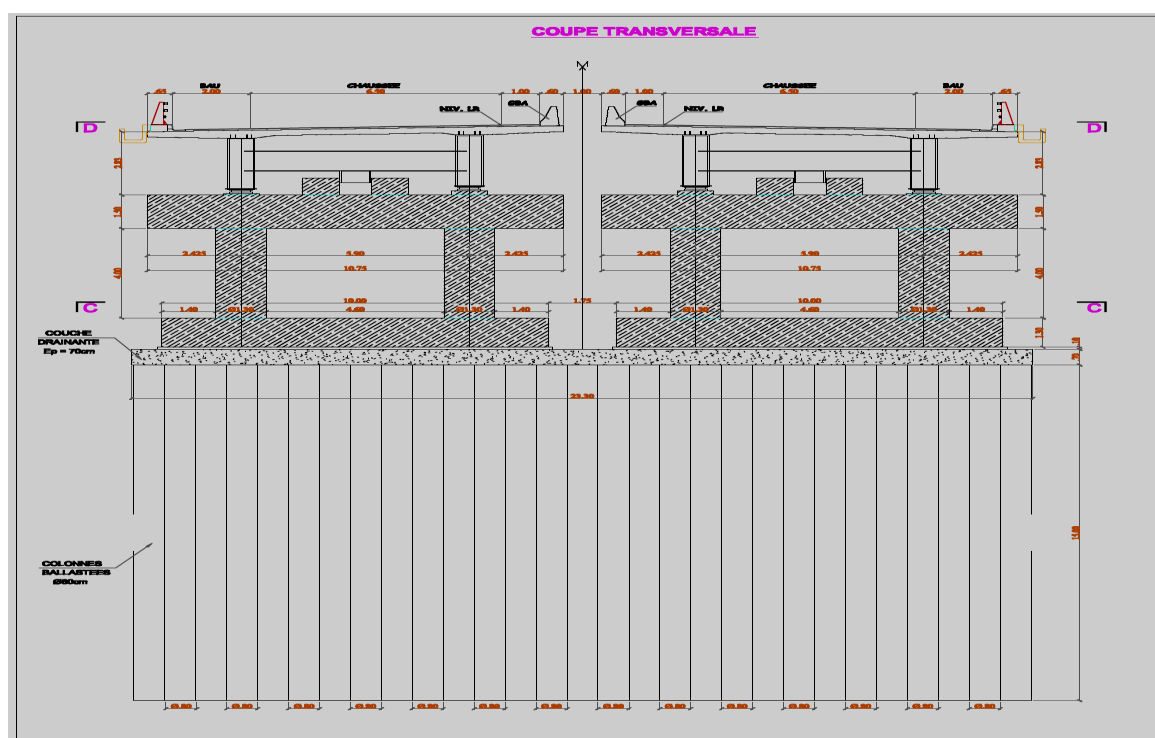


Figure 2

Les fondations des piles P2 à P6 sont fondées sur barrettes de dimensions 0.80mx2.80 m et de 28 m de profondeur (**fig. 3**).

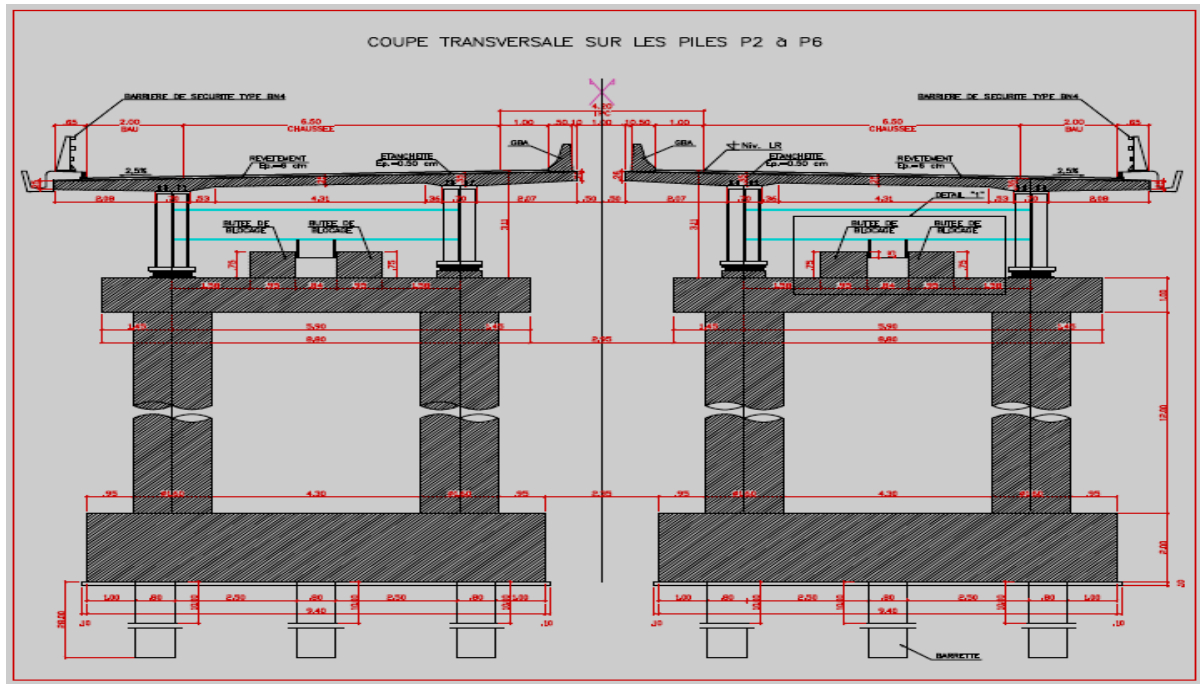


Figure 3

Afin de réduire les risques d'affouillement, une protection des fondations par un tapis d'enrochements de calibre 700-800 mm généralisée le long de l'ouvrage est prévu.

3.4 Mode de reprise sismique

La région de Guercif est caractérisée par une sismicité relativement élevée, pour la reprise des efforts sismiques, il a été prévu :

☛ Séisme transversal :

Les efforts sismiques transversaux seront transmis à toutes les piles et aux deux culées par l'intermédiaire des butées de blocage.

☛ Séisme longitudinal :

Les efforts sismiques longitudinaux seront transmis aux appuis par l'intermédiaire des appareils d'appuis sur tous les appuis intermédiaires à l'exception des piles P1 et P7 et des culées. Au niveau de ces derniers, on mettra des appareils glissants qui devraient éliminer la reprise des efforts horizontaux.

☛ Séisme vertical :

Les efforts sismiques verticaux seront repris par tous les appuis

4 FICHE TECHNIQUE DU PROJET

➤ Les différents intervenants :

- **Maître d'ouvrage** : Société des Autoroutes du Maroc représentée par son Directeur Général.
- **Maître d'œuvre** : Chef de la Division de Travaux MSOUN-TAOURIRT
- **Financement** : Banque islamique de développement (B.I.D)
- **Assistance technique à la Maîtrise d'œuvre**: Egis Route /Team Maroc /CID
- **Bureau d'études** : INGEMA/INGEROP
- **Laboratoire de contrôle extérieur** : Laboratoire L.P.E.E
- **Laboratoire de contrôle externe** : Laboratoire L.P.E.E (antenne de Tétouan)
- **Laboratoire de contrôle externe charpente métallique** : Bureau VERITAS
- **Entreprise Principale** : TRANSTECH ENGINEERING CORPORATION (TEC)
- **Sous-traitant pour l'exécution des colonnes ballastées et des barrettes** : Société MENSOUY.
- **Sous-traitant pour l'exécution des travaux de fourniture, fabrication et montage de l'ossature métallique** : Société DELATTRE LEVIVIER MAROC (DLM)
- **Délais d'exécution** : 25 mois
- **Date contractuelle de démarrage des travaux** : 11/08/2008
- **Date contractuelle d'achèvement des travaux** : 10/09/2010
- **Montant des travaux TTC** : 208 694 210,91 (DH) +3 576 410,75(€)

➤ Quantités principales :

DESIGNATION	Unité	QUANTITE
• Colonnes Ballastées	ml	9 800
• Barrettes	ml	1 680
• Bétons	m ³	15 470
• coffrages	m ²	6 700
• armatures	kg	3 068 500
• Ossature métallique	kg	2 378 000
• Enrochements	m ³	28 800

5 TRAVAUX DE FONDATION DE L'OUVRAGE

5.1 Réalisation et réception des colonnes ballastées

❖ Procédé de réalisation des colonnes ballastées :

Les colonnes ballastées constituent une technique intéressante pour l'amélioration en place des sols compressibles. Un matériau granulaire est introduit dans le sol, puis compacté pour constituer des colonnes verticales. Ce traitement permet d'améliorer globalement les caractéristiques mécaniques du sol, d'augmenter la capacité portante du site, de réduire les tassements sous charges appliquées, de diminuer le temps de consolidation en accélérant le drainage, de participer à la stabilité générale des remblais et de réduire le risque de liquéfaction dans les zones sismiques.

Les séquences de réalisation d'une colonne ballastée par vibreur pendulaire sont représentées sur la **figure 4**.

Dans un premier temps (Figure 4-a), le vibreur pénètre dans le sol par refoulement. Sa descente s'opère grâce à l'effet conjugué de son poids, de la vibration et du fluide de lavage.

Après avoir été maintenu en place un court instant, le vibreur est remonté et une partie du matériau de remplissage est placée par gravité dans le forage (Figure 4-b).

Ensuite, le vibreur est réintroduit et le ballast est compacté, ce qui a pour effet de refouler un peu plus le sol ambiant (Figure 4-c).

Une colonne composée d'un matériau de remplissage très compact peut ainsi être réalisée jusqu'au niveau du sol par introduction successive de ballast, chacune suivie d'un compactage (Figure 4-d).

Il convient de signaler que ce type de traitement nécessite des quantités d'eau importantes et cause une pollution imputant par les fines sortantes du forage pour faire une colonne de 10 m de profondeur, le besoin en eau est de 100 m³ environ.

La traversée des zones indurées (conglomérats cimentés) dont l'épaisseur a atteint jusqu'à 10 m par endroits a été effectuée par pré-forage avec un outil de forage du même diamètre que les colonnes 80 cm.

Au total, 351 colonnes ont été réalisées au niveau de la culée C8 et 273 colonnes au niveau de la pile P7. La cadence de réalisation des colonnes ballastées était de 100 à 120 ml/jour.

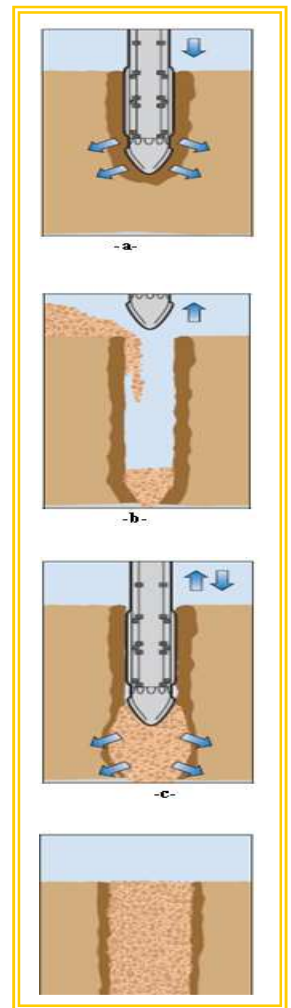


Figure 4 : séquences de réalisation: vibreur pendulaire (voie humide)

❖ **Contrôle et réception d'exécution des colonnes ballastées :**

Des essais au pénétromètre dynamique avec une fréquence de 1/30 colonnes ainsi que des essais de chargement à la plaque ont été réalisés pour le contrôle et la réception de ces colonnes.

Deux profils d'instrumentation par des boules de tassement ont été installés au niveau de la culée C8, l'un sous la semelle et l'autre sous le remblai contigu afin de mesurer les éventuels tassements. Le tassement maximal enregistré n'a pas dépassé 3,7 cm.

5.2 Réalisation et réception des Barrettes

Avant le démarrage des travaux de réalisation des barrettes, des plates-formes de forage ont été aménagées au droit de chaque appui, des déviations de l'oued sont réalisées localement afin de garantir l'exécution des forages à l'abri des infiltrations des eaux.

Des murettes guides en forme de caisson de dimensions 3.0mx0.90mx1.0 sont réalisées pour assurer la bonne exécution des barrettes.

Préalablement, une barrette d'essai est réalisée pour vérifier la tenue des parois, ce qui a conduit à la nécessité de l'emploi de la bentonite.

Au niveau de chacune des piles situées à l'intérieur de l'oued, 12 barrettes sont réalisées 6/semelle suivant un plan de pilotage préétabli. La cadence d'exécution de ces barrettes est en moyenne d'une barrette tous les deux jours (forage et bétonnage).

Toutes les barrettes ont fait l'objet d'un contrôle par auscultation sonique conforme à la procédure du LCPC. À l'issue de ces essais de contrôle, un recépage des têtes des barrettes est effectué pour éliminer tout le béton contaminé.

5.3 Semelles et élévations

Les semelles, fûts et chevêtres ainsi que les bossages et butées de blocage qui sont des éléments classiques sont réalisés avec des méthodes traditionnelles avec des coffrages plans pour les semelles et chevêtres et circulaires pour les fûts.

6 TRAVAUX DE CHARPENTE METALLIQUE

L'ossature principale est constituée de :

- Poutres principales,
- Entretoises
- les divers raidisseurs constitués de plats ou de tés,
- les plaques d'appuis

6.1 Etapes de fabrication de l'ossature métallique

❖ **Achat des tôles et approvisionnement :**

C'est la 1^{ère} étape du processus de construction d'un ouvrage métallique. La commande des aciers se fait auprès d'usines pour le laminage selon les dimensions à débiter et selon la qualité, d'épaisseurs, de planéité et la nuance

exigée par les stipulations du fascicule 66 du CCTG. Les fournisseurs potentiels sont soumis d'abord à l'agrément du Maître d'œuvre sur présentation de certificats attestant que les processus de fabrication, les processus de contrôle et le service d'assurance de la qualité sont bien en place et conformes à la marque N.F. - Acier - Secteur Ouvrages d'Art.

❖ **Les fournisseurs retenus sont :**

- VAN MEERBEECK pour la fourniture des tôles de 35-50 et 60 mm
- METINVEST TRAMETAL pour la fourniture des tôles de 16-18-19-20 et 30 mm
- DUFERCO CLABECQ pour les tôles d'épaisseurs comprises entre 35 et 60 mm
- DILLING pour la fourniture des tôles d'épaisseurs de 100 mm
- DIFFERDANGE pour la fourniture des profilés IPE 600
- NELSON pour la fourniture des goudons

Une fois arrivés sur site de fabrication de DLM à Casablanca, une réception des produits sidérurgiques (tôles et profilés métalliques) s'effectue par :

- Vérification de la traçabilité de la matière première (certificats matière des fournisseurs, numéro d'identification de chaque produit, etc.)
- Contrôle dimensionnel des tôles et profilés métalliques (longueur, largeur et épaisseurs par méthode ultrasonique)
- Prélèvement des échantillons pour identification par des essais destructifs suivant la norme EN10025
- Essais mécaniques et métallographiques pour déterminer les caractéristiques mécaniques (limite élastique, la résistance à la rupture, la ductilité et la ténacité des matériaux) et la composition chimique des produits.

❖ **Fabrication des éléments en atelier :**

Avant le démarrage des travaux de fabrication des éléments de la charpente, l'entreprise soumise à l'approbation du Maître d'œuvre :

- Un Programme de soudage constitué de :
 - Procédure de fabrication
 - Tableau de Répartition et Traçabilité Soudure (TRTS)
 - Plan de repérage des modes opératoires de soudage
 - Méthodologie et séquences de soudage
 - Registre de soudure
 - Descriptifs et qualification des modes opératoires de soudage,
 - Certificats de qualification des soudeurs et certificats de qualification du personnel de CND
- Plan de contrôle
- Programme d'exécution de la peinture et la protection contre la corrosion

Après visa du Maître d'œuvre, la fabrication des poutres constitutives de la charpente suit les étapes suivantes :

❖ **Traçage des plans d'atelier :**

Pendant cette phase l'entreprise prépare les plans d'exécution en atelier en tenant compte de la contre flèche (simulation à l'échelle 1 sur logiciel de CAO/DAO).

❖ **Débit des tôles:**

Cette opération consiste à découper les pièces élémentaires par un procédé plasma et oxycoupage. Des tolérances serrées de découpe sont imposées (+/-1 mm) pour respecter la géométrie de l'ouvrage.

❖ **Assemblage :**

Pendant cette étape, les pièces débitées (semelles, âme, raidisseurs) sont assemblées en atelier pour donner la forme aux poutres constitutives du Viaduc,

❖ **Soudage :**

C'est l'étape principale où les éléments assemblés auparavant sont soudés et finis, y compris le soudage des connecteurs sur les semelles supérieurs des PRS.

Quelques notions sur le soudage:

La soudure est un assemblage réalisé par la fusion des bords à souder par le biais d'apport d'une énergie importante (température de fusion de l'acier 1530°C), mettant en jeu des phénomènes chimique, métallurgique, thermique et thermomécanique et ce en vue d'élaborer un joint qui doit présenter une structure métallurgique et des propriétés mécaniques au moins égales à celles du métal de base et de réduire les contraintes résiduelles de soudage. Les avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage sont :

- Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage, équivalentes à celles du métal,
- Il répond à des sollicitations élevées,
- Il est durable (insensible aux variations de température et aux conditions climatiques)
- Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée.

L'acier est le métal le plus facile à souder car on peut utiliser avec lui toute la gamme des procédés de soudage. Un soudage de qualité est celui qui trouve la bonne adéquation entre nuance et qualité d'acier, métal d'apport, procédé de soudage et les exigences par rapport au produit final.

Le soudage à l'arc est de loin le procédé de soudage le plus utilisé dans l'industrie. Pour souder à l'arc, on peut utiliser un fil fusible ou une électrode enrobée.

À l'électrode enrobée: Ce procédé inventé en 1907 est moins utilisé que les procédés recourant à des fils fusibles pour des raisons de faible productivité, mais garantit des joints de très haute qualité grâce particulièrement à l'utilisation d'enrobage de type basique.

À fils fusible : Ce procédé, aujourd'hui d'utilisation plus répandue que celui à l'électrode enrobée, offre une meilleure productivité car il permet un soudage semi-automatique ou robotisé.

L'accessibilité de la soudure et la position de soudage interviennent dans le choix du procédé. Le choix du procédé dépend aussi du lieu de travail.

❖ Montage à blanc :

Avant leur expédition sur le chantier, chaque poutre PRS est montée à blanc avec sa poutre voisine dans sa position définitive de chantier et les ajustages nécessaires sont réalisés en atelier.

❖ Connecteurs

La liaison acier-béton est assurée par des connecteurs appelés goujons, ces pièces sont soudées à la semelle supérieur. La résistance du connecteur à l'entraînement par glissement dépend en grande partie de la qualité de la soudure de jonction, cette dernière doit être examinée avec le plus grand soin, de façon à éviter toute fixation qui ne serait qu'un simple collage sans interpénétration au niveau du métal de base de la poutre. Une méthode simple consiste en dehors de tout essai de ressuage à plier sous angle donné le goujon, si la zone de soudure présente des fissurations importantes, il convient de revoir le procédé de soudage (**Figure 5**)

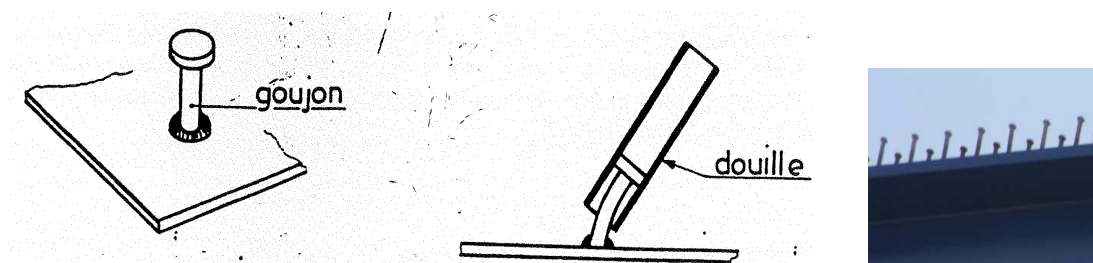


Figure 5

Dans les zones de moment négatif, on veillera en particulier à la qualité des soudures, du fait que les risques de rupture par fatigue dans le métal de base étant non négligeable.

On doit également respecter certaines règles constructives, notamment adopter le diamètre des goujons à l'épaisseur de la tôle de la semelle supérieur de Poutre, en effet, le diamètre des goujons ne doit pas être supérieur à 2.5 fois l'épaisseur de la tôle, et ce afin d'éviter le problème lié à l'énergie de soudage insuffisante.

❖ Protection contre la corrosion

Le choix de la protection et son efficacité dans le temps dépendent en premier lieu de l'environnement futur de la structure à protéger.

La protection contre la corrosion est obtenue par l'application de trois couches de peinture d'une épaisseur totale d'environ 200 micromètres. La première couche est un primaire anti-rouille d'environ 50 micromètres d'épaisseur. Cette première couche est protégée par une seconde couche de l'ordre de 120 micromètres à laquelle vient s'ajouter une couche de finition de 40 micromètres. Les deux premières couches de peinture sont appliquées en atelier et la dernière couche, sur le chantier.

L'efficacité de la protection anticorrosion et la pérennité de l'aspect du revêtement dépendent de la qualité de la préparation de surface, des produits utilisés et de la mise en œuvre de ces produits.

Les surfaces à peindre doivent être propres, exemptes de rouille et de calamine. Les traces de corrosion doivent être éliminées par brossage, martelage, piquage ou par projection d'abrasif, selon le degré de soin, fonction du type de peinture utilisée et de durabilité recherchée.

Avant de commencer la préparation de surfaces et peinture, il est procédé à la vérification des conditions d'application notamment l'humidité, la température ambiante, température du support, point de rosée.

Ensuite, Le grenaillage complet au degré SA 3 des tronçons est réalisé dans le tunnel de grenaillage en tenant les PRS en position verticale.

L'application des peintures des tronçons grenaillés au primaire et intermédiaire époxy, se fait en totalité dans la cabine de peinture en respectant les conditions d'application, les temps de séchage et le contrôle des épaisseurs, et adhérence de peinture entre acier grenaillé et couche primaire.

Sur site après assemblage des tronçons livrés et avant ripage du viaduc à sa position finale sur piles. Il est procédé au sablage au RUGOS 2000 au degré SA 3 des cordons de soudure, ou le brossage mécanique au degré ST3 des parties dégradées, à l'application des couches de peinture primaire et intermédiaire époxy sur les cordons de soudure sablés et enfin à l'application de la couche de finition après nettoyage et ponçage de l'ensemble des éléments de la structure métallique.

Après ripage et avant vérinage du viaduc à la position finale, il est procédé encore au sablage des platines d'appui et de vérinage puis à l'application des peintures (primaire, intermédiaire et finition).

Après ripage et vérinage du viaduc à sa position finale sur piles, il est procédé au nettoyage, dégraissage au trichloréthylène de la semelle inférieure face inférieure et ensuite à l'application des peintures (retouches primaires intermédiaire et couche complète de finition et contrôle des épaisseurs sur la semelle inférieure du PRS (face inférieure).

Séquences de contrôle

- 1) Mesure des conditions environnantes notamment le degré hygrométrique, température ambiante, température de support, délai de recouvrement
- 2) Contrôle du grenaillage et du sablage
- 3) Contrôle de l'épaisseur du film de peinture après chaque couche
- 4) Essai de traction (tests d'adhérence)

Contrôle du système de protection contre la corrosion

Essais au laboratoire : Identification des produits de peinture :

Paramètres d'identification

- Classification de la peinture (nature chimique par infrarouge)
- Masse volumique
- Viscosité
- Extrait sec
- Taux de cendres
- Teneur en liants, solvants et matières pulvérulentes

Critères d'aptitude à l'emploi

- aspect
- Couleur
- Durée conventionnelle de séchage

- Rendement superficiel spécifique
- Essais de convenance réalisés sur échantillon, ces examens comprennent :
 - Examen visuel.
 - Contrôle de la masse de zinc par unité de surface.
 - Contrôle de la continuité.
 - Essai d'adhérence

Essais aux ateliers et in situ

- Contrôle de la validité des produits de peinture.
- Contrôle de la préparation mécanique par sablage ou grenaillage.
- Contrôle des conditions de mise en œuvre des revêtements suivant les fiches techniques du fournisseur.
- Vérification du degré de soin SA 2.5 suivant la norme suédoise SIS 05.59.00
- Vérification du dépoussiérage par air comprimé des surfaces
- Vérification des conditions de stockage et conservation de la peinture
- Vérification du dosage et préparation des produits de peinture (base, durcisseur et diluant)
- Vérification de la durée de vie du mélange
- Vérification de la durée du séchage et l'intervalle de recouvrement
- Mesure de l'épaisseur de chaque couche de peinture par la méthode magnétique suivant la norme NF T 30.124.

6.2 Transport sur site

Les poutres fabriquées en atelier de DLM à Casablanca ont des longueurs variant entre 18 et 30m, elles sont acheminées sur site par l'intermédiaire de camions télescopiques ou de camions semi-remorques selon la longueur des poutres, en empruntant un itinéraire bien défini (Figure 6).



Figure 6 - Itinéraire de transport

camions télescopiques

Au préalable, l'entreprise soumise à l'approbation du Maître d'œuvre un programme de transport présentant, les moyens et l'itinéraire de transport, les dispositions prises pour assurer la pérennité des différents éléments de la charpente pendant leur transport.

6.3 Montage et assemblage de l'ossature métallique sur site

Les travaux d'assemblage, de réglage et de soudage de l'ossature sont exécutés sur une plate-forme aménagée à l'arrière de la culée C8 et dotée de moyens de manutentions et d'abris permettant une bonne maîtrise de la qualité et de la productivité. Pendant cette étape, les poutres sont posées sur des supports provisoires bien fixés sur des massifs en béton. **Fig. 7**

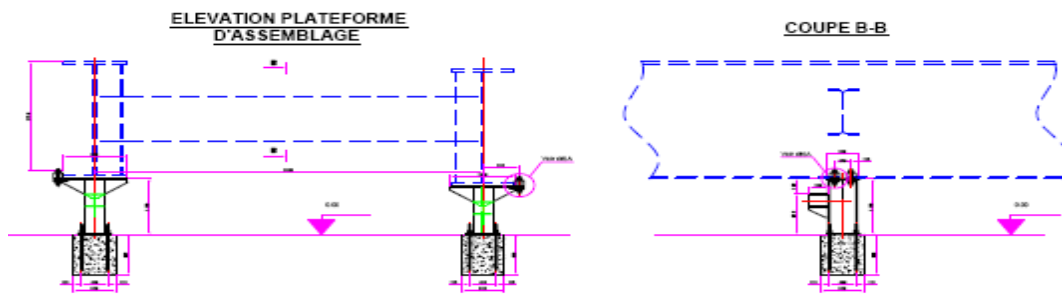


Figure 7

6.4 Lançage

Une fois l'assemblage terminé totalement ou partiellement, l'ouvrage est tiré dans son alignement puis, au terme de ce parcours, il est descendu sur ses appuis par des vérins.

L'usage de cette méthode suppose que soient remplies certaines conditions :

- la mise à disposition d'une plate-forme suffisamment longue en arrière de la culée et dans l'axe de l'ouvrage pour installer le chantier d'assemblage du tablier ;
- l'ouvrage doit être à alignement droit en plan ou courbe suivant un rayon constant. Un pont courbe à rayon très variable ou en S prononcé n'est à priori pas lançable ;
- l'intrados des poutres qui constitue le plan de roulement doit être droit, ce qui toutefois n'exclut pas certaines formes de ponts à hauteur variable ;

❖ Principes du lançage

Le lançage est une opération qui consiste à faire rouler le tablier sur des appuis à galets ou à le faire glisser sur des patins acier inoxydable-Téflon.

Il est tiré par effet de rappel à l'aide d'une installation comprenant un treuil de traction, un treuil de retenue et les mouflages nécessaires.

L'avant du tablier est prolongé par une structure légère appelée « avant-bec » et destinée à réduire les effets du poids en porte-à-faux et limiter les flèches maximales en bout de console. **Figure 8**



Figure 8

Pendant les opérations de lançage, la poutre roule sur toute sa longueur et chaque centimètre d'âme de poutre est soumis plusieurs fois au poinçonnement. Pour éviter tout risque d'effondrement de l'âme entraînant une perte d'équilibre global de la structure, le lançage est soigneusement contrôlé :

- sur le plan théorique : par un calcul pas à pas des réactions d'appui prenant en compte la déformée réelle de la poutre intégrant le profil en long, la contreflèche de fabrication, et par la vérification de la tenue de l'âme dans chaque phase ;

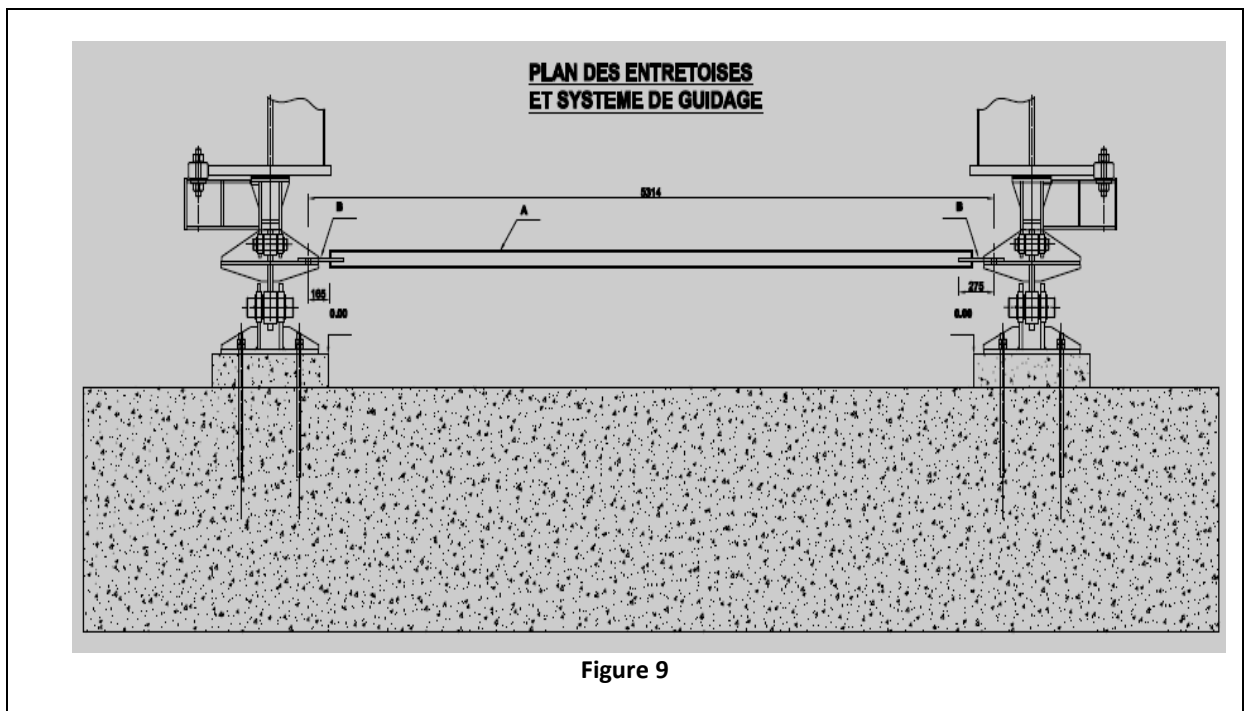
- sur le plan pratique sur le chantier : par une surveillance rigoureuse du nivellement des appuis.
- Transversalement, par un système de guidage qui oblige le tablier à rester en ligne faute de quoi une sortie des âmes entraînerait une rotation de la semelle suivie d'une instabilité par déversement de la poutre.

Un autre point fondamental de l'étude de lançage est celui de la stabilité au déversement latéral des poutres, lié à la compression importante de la membrane inférieure lorsqu'une travée entière est en porte à faux. Pour s'opposer à ce risque, un contreventement horizontal par croix de St André en cornières a été prévu.

❖ Déroulement du lançage

Une fois les poutres sont assemblées et le montage de l'avant bec est effectué, le treuil et le système de mouflage de traction sont installés. Il est procédé à :

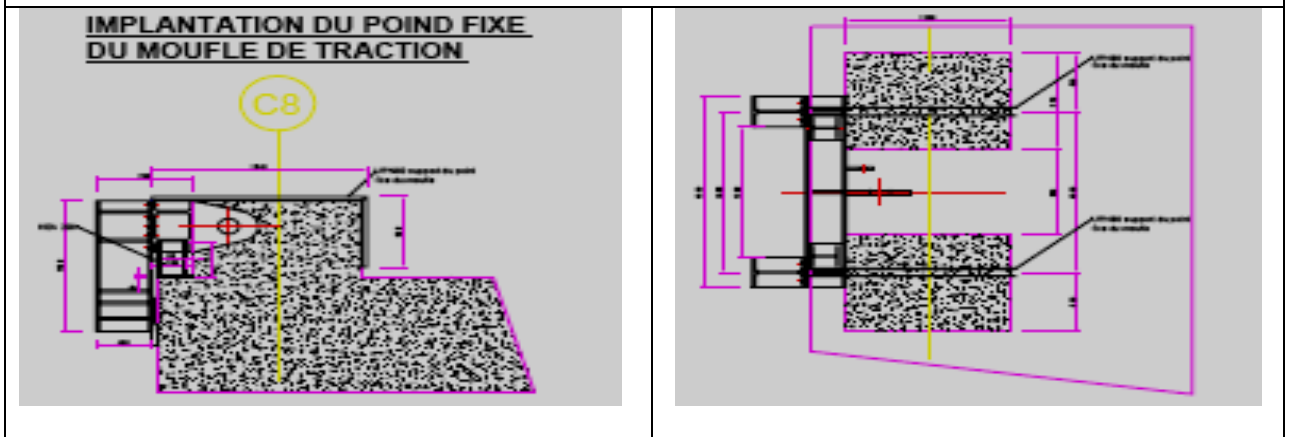
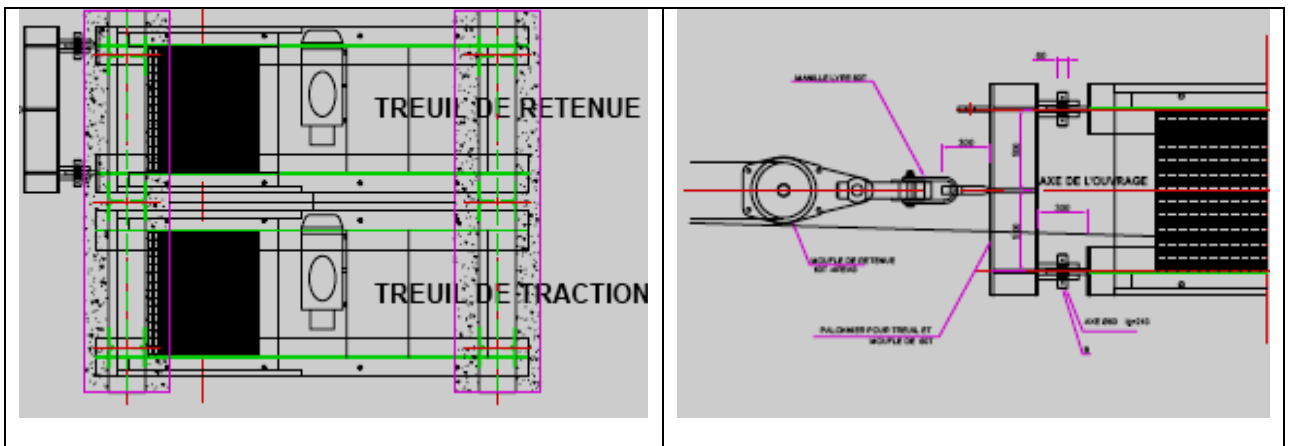
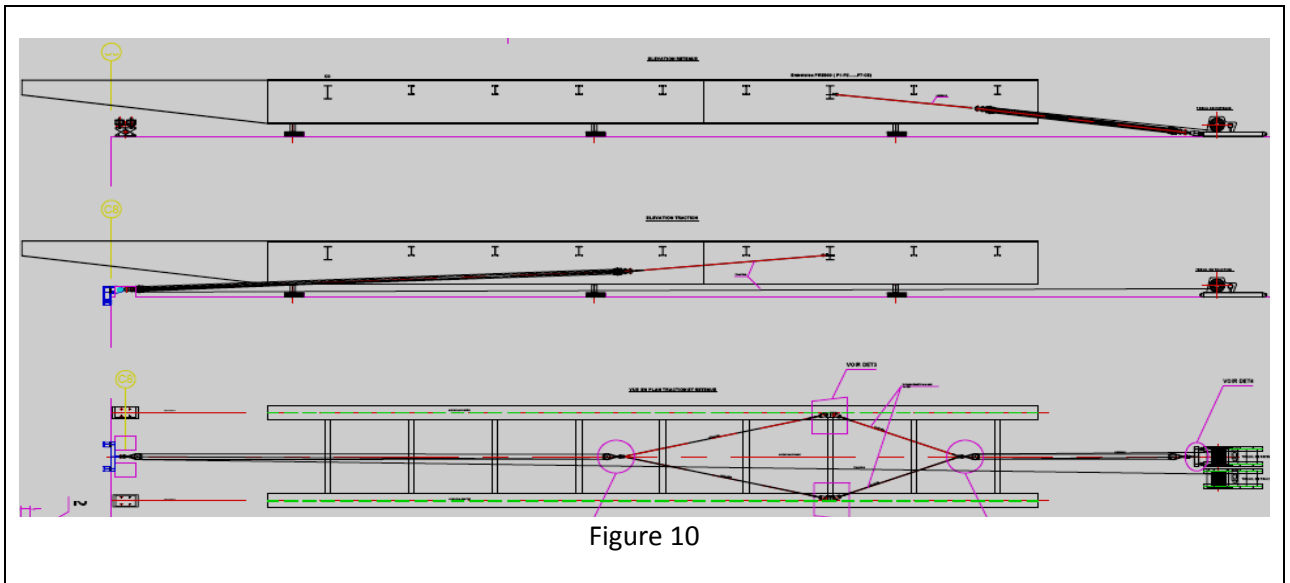
- Mise en place des chaises de ripage sous les poutres,
- Vérinage local au droit de chaque support pour insérer les patins de glissement
- L'accrochage des câbles de traction au niveau des goussets de l'ossature du pont au droit des entretoises des piles et culées.
- Au niveau des piles et la culée C8, on dispose de deux chaises de lancement (balancelles)  quip es de guidages latéraux (**fig. 9 et 10**) et un ensemble de passerelles (plateforme de travail) permettant l'accès des opérateurs.



 quipements spécifiques de lancement

Le système de traction est composé d'un treuil de capacité 8 tonnes avec un mouflage en "x à. Ce treuil (8T) est installé à l'arrière du pont. Fig. 11 et 12

Le brin mort du treuil est équipé d'un peson à affichage digital. L'effort de manœuvre est contrôlé en permanence.



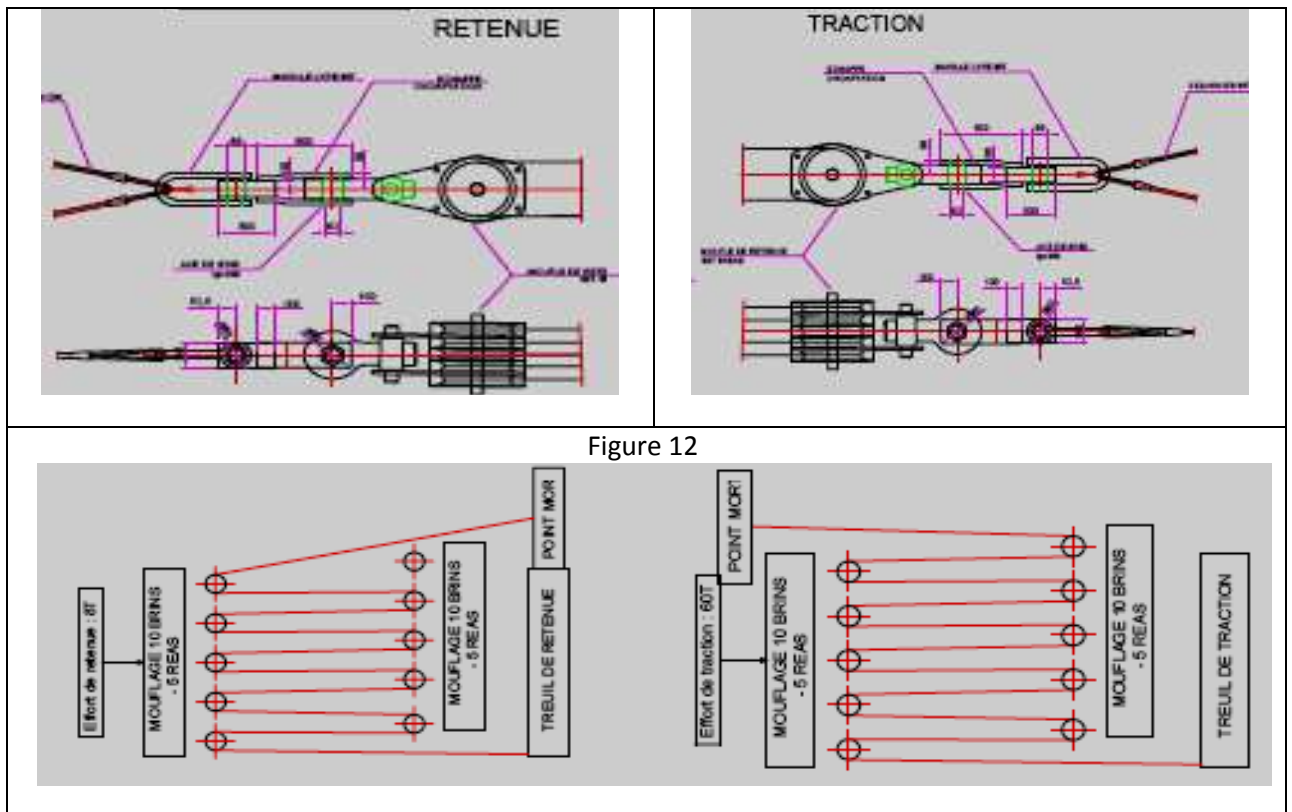


Figure 12

Le déplacement est obtenu par glissement du tablier sur les patins de téflon avec néoprène intercalés sur les châssis d'assemblage. Fig. 13

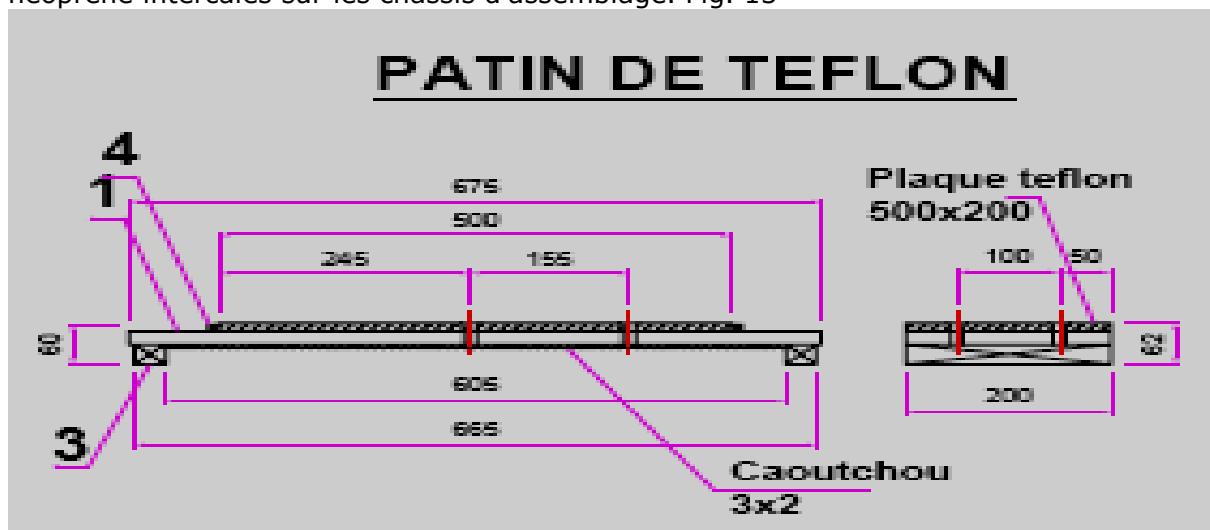


Figure 13

La sous face du tablier est enduite en permanence de savon noir pour réduire les efforts de frottement entre les patins de glissement et la semelle inférieure du tablier.

A chaque fois que l'arrière de la partie lancée quitte un appui sur plateforme, les dénivellations correspondantes sont amorties par déverinages successifs à l'aide d'un châssis de vérinage ou par l'ajout d'une cale sur les supports suivants afin d'obtenir le décollement naturel de l'arrière du tablier dans le cas où la flèche de déverinage est supérieure à l'épaisseur du patin de ripage (soit 35 mm). Pour ce faire le pont est soulevé par un vérin intégré dans le châssis d'assemblage et le patin de ripage est enlevé, où l'insert de calage est ajouté.

Dans le cas où le changement d'un patin sur plateforme est nécessaire suite à sa détérioration, l'opération de lancement est suspendue le temps de vernier l'ossature et d'extraire le patin usé et de mettre en place le nouveau.

En fin de chaque phase de lancement, l'ouvrage est bloqué transversalement sur les appuis de lancement par calage latéral de tous les guides latéraux. Il est bloqué longitudinalement avant dépose du système de traction par tension du treuil de retenu par tire fort. Ce système empêche le tablier de bouger entre deux phases de lancement.

6.5 Déverinage et descente verticale sur les appareils d'appuis

A la fin de lancement, il est procédé au contrôle de la position de l'ouvrage.

Le système de retenue étant en place pour éviter l'avancement du pont avant vérinage.

Après mise en place de l'ossature en position, on procédera à la pose des appareils d'appuis et la descente sur appuis définitifs.

Détail des opérations :

- Vérinage et enlèvement des chaises de lançage
- Déverinage et mises sur calage.

Précautions particulières :

- Les poutres sont déverinées simultanément sur une même ligne d'appui, les vérins étant couplés à la même centrale hydraulique et actionnés en même temps.
- En cours de descente sur appui et après retrait des chaises, lors des déverinages successifs, des cales de sécurité sont disposées sous les poutres à l'endroit des points de vérinage.
- Le réglage fin de l'implantation de l'ossature métallique est fait au fur et à mesure de la descente sur appuis.

7 NORMES, CONTRÔLE ET RECÉPTION DES POUTRES MÉTALLIQUES

La construction métallique opère sur la base de normes auxquelles se réfèrent les documents contractuels du marché. La qualité d'un ouvrage métallique est étroitement liée à la qualité du soudage. Car le soudage est déterminant pour la sécurité de l'ensemble de l'ouvrage. Le soudage est géré par des cahiers des charges précis. Ces cahiers de charges traitent du choix des procédés et des paramètres de soudage, de leur qualification, de la qualification du personnel soudeur, des types et étendue des contrôles, de la qualification du personnel en charge de ces contrôles, etc.

En construction métallique, on n'impose pas tel ou tel procédé de soudage, mais des résultats, compatibles avec un cahier des charges donné : la fin, pas les moyens.

D'où la nécessité en amont de la fabrication, de vérifier la pertinence des procédés de soudage choisis : c'est la phase de qualification.

Le constructeur, à partir, des plans du bureau d'études, du cahier des charges et des spécifications techniques particulières, décide des types de géométrie de joints et des procédures de soudage les plus adaptés.

Il établit les DMOS (descriptif de mode opératoire de soudage) et doit démontrer que ce qu'il a prévu fonctionne, par des essais.

La qualification du personnel soudeur

Les défauts de forme et certains défauts de compacité dépendent de l'habilité du soudeur ou des réglages choisis par l'opérateur. Leur aptitude à souder doit donc être vérifiée et reconnue. Les compétences du soudeur sont définies et testées. La régularité du geste, l'aptitude à garder une même position longtemps, la précision, sont autant de qualités importantes dans ce métier.

Les conditions dans lesquelles l'aptitude des soudeurs ou opérateurs est testée, sont définies par l'EN 287-1 ou NF A 88 111. Ces essais font l'objet d'un procès verbal de qualification du soudeur ou de l'opérateur

Procédures des contrôles des soudures.

- Contrôle avant soudure : Le contrôle avant soudure consiste à vérifier les pièces à souder et notamment la géométrie des chanfreins des pièces.
- Contrôle pendant la soudure : Ce contrôle consiste à vérifier en permanence la qualité de l'élimination du laitier pendant les passes de soudures.
- Contrôle après la soudure : Ce contrôle permet de vérifier la présence de caniveaux ou gorges, Une surépaisseur ou une sous-épaisseur, Un manque de pénétration.

Qualité des assemblages soudés et techniques CND

❖ Différents types de contrôle :

Les essais destructifs :

Ces contrôles sont pratiqués sur des échantillons des joints soudés lors des qualifications. Ils servent à vérifier les caractéristiques mécaniques de l'ensemble soudé par des essais généralement, de traction, de résilience, de dureté et de pliage.

Les contrôles non destructifs :

Ces contrôles sont pratiqués sur les joints de production et permettent de vérifier :

- Aspect externe et surfacique : dimensionnel, visuel, ressuage, ou magnétoscopie.
- Santé interne du joint : radiographies ou ultra-sons.

Pour ce chantier, le contrôle externe est assurée le bureau VERITAS et le contrôle extérieur par le Centre expérimental des matériaux et du génie industriel du LPEE. Le contrôle est réalisé par détachement en permanence des inspecteurs qualifiés pour le suivi et le contrôle de la qualité des travaux. Il a consisté en :

Avant soudage :

- La qualification des modes opératoires de soudage conçus pour les différentes types de matériaux à souder suivant la norme européenne NF EN 15614-1 : épreuves de qualification sur des échantillons pour mettre en évidence les caractéristiques mécaniques et métallographique de la soudure (essais de traction, pliage, dureté, résilience et macrographie)
- La qualification des soudeurs et opérateurs soudeurs suivant la norme NF EN 287-1, permet de mettre en évidence les compétences technologiques de soudage des soudeurs.
- Les essais de qualification des soudures par des coupons témoins de production et ce pour vérifier la stabilité du processus de soudage en fabrication et montage (Essais non destructifs, essais mécaniques et métallographiques).

Pendant et après soudage

Les contrôles non destructifs afin de détecter d'éventuels défauts de soudage qui peuvent être vulnérables sur le comportement mécanique des assemblages soudés. Ces défauts sont classés en deux familles :

- Les défauts de surface (défauts de formes et d'aspect),
- Les défauts de compacité (défauts volumiques et défauts plans tel que les fissures, manque de fusion et manque de pénétration)

Les techniques de CND utilisés sont classées en deux familles :

- Les essais de surface (visuel, contrôle par ressuage et contrôle par magnétoscopie),
- Les essais de compacité (contrôle par radiographie industrielle, et contrôle par ultrason)

Technique par radiographie :

Elle présente les avantages suivants :

- Facilité de détection des défauts internes des pièces.
- Rapidité relative d'obtention des résultats
- Bonne sensibilité de détection des défauts.
- Traçabilité par support matériel (cliché radiographique) et archivage.

Cet examen est réalisé par gammagraphie ou rayon X sur les soudures bout à bout à pleine pénétration et ce conformément aux spécifications de la norme NF P22.471 et la réglementation en vigueur (radioprotection). Le personnel chargé de ces essais doivent avoir :

- Certificat de qualification niveau 2 COFREND secteur CIFM pour l'interprétation des résultats
- certificat de qualification niveau 1 COFREND secteur CIFM pour les opérateurs radiologues

Chaque fois qu'une non-conformité relevée par un contrôle partiel, il y a lieu d'étendre de part et d'autre du défaut et à intervalles réguliers sur tout le joint soudé pour déterminer sa longueur exacte et sa fréquence. Avant de procéder à toute réparation, l'entreprise doit présenter pour approbation par le maître d'ouvrage la procédure de réparation.

Technique de contrôle par ultrason :

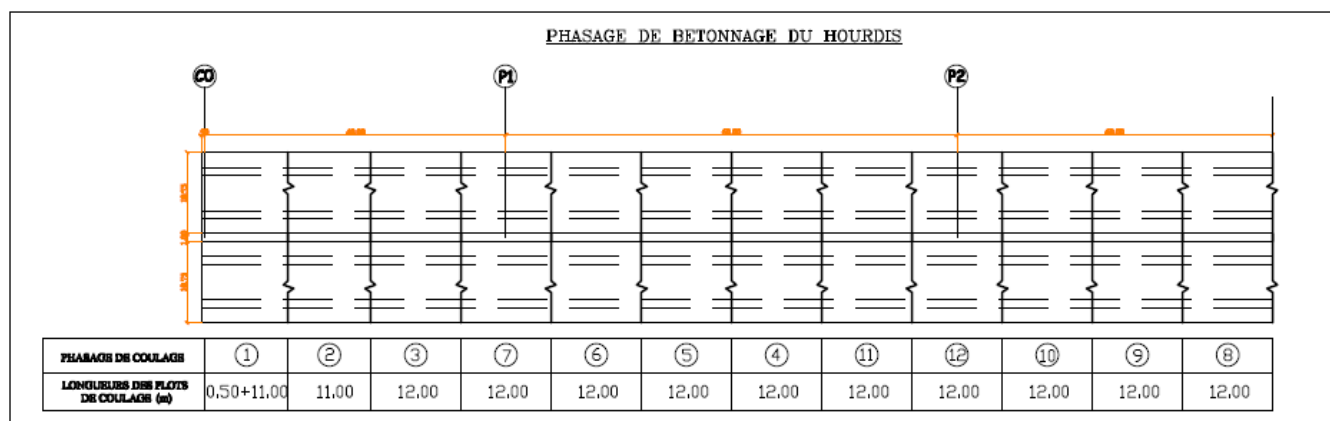
Elle permet de détecter les défauts de compacité. Cet examen est réalisé principalement sur les soudures d'angle et les soudures bout à bout de forte épaisseur et à pénétration garantie. Il est effectué par un personnel qualifié niveau 2 COFREND secteur CIFM pour interprétation des résultats.

Technique de contrôle par magnétoscopie :

L'examen par magnétoscopie consiste à soumettre l'assemblage à l'action d'un champ magnétique avec pulvérisation simultanée d'un révélateur constitué d'une très fine particule d'oxyde de fer. Toute fuite magnétique qui représente la discontinuité de l'assemblage (défauts) se matérialise par la migration et l'agglutination des particules de fer autour du défaut.

8 BÉTONNAGE DE L'HOUDIS

Afin d'assurer la maîtrise de la fissuration, l'hourdis est bétonné par plots de 12 m chacun en « pianotant », les plots des zones en travée étant bétonnés avant les plots sur appuis suivant le cycle suivant : bétonnage en travée 1 – bétonnage en travée 2 – bétonnage sur appui 1 – bétonnage en travée 3 – bétonnage appui 2...).



La réalisation de l'hourdis se fait à l'aide d'un outil de coffrage mobile pour les travées centrales entre la pile P2 et P6 complété par un coffrage traditionnel pour les travées situées à l'extérieur de l'oued .**Figure 14**



Figure 14 **Coffrage mobile**

9 CONCLUSION

La réalisation de ce genre du viaduc à ossature mixte, a constitué la première expérience d' ADM en matière de l'utilisation de charpente métallique dans la réalisation des viaducs à une échelle aussi importante.

Le lancement est une opération très simple dans son principe, il consiste à mettre en place un élément puis le tirer en le faisant glisser, quoique le risque encouru sur un chantier provient de l'apparente simplicité de l'opération, de ce fait il est extrêmement important de vérifier toutes les opérations élémentaires avant de procéder à leurs exécution.

Aussi, il est à préciser que ce type de montage s'est développé et le nombre de soudures à réaliser sur chantier diminue considérablement, néanmoins la fatigue peut devenir déterminante pour les dimensions et pour la conception des assemblages. Donc, la vérification à la fatigue doit être prise au sérieux dans tous les cas où les efforts variables sont à envisager, notamment au niveaux des joints des PRS.

10 EVOLUTION DE CHANTIER PAR PHOTOS

Figure 4 - Situation initiale 05 novembre 2008



COLONNES BALLASTEES : Travaux exécutés entre : Mars et Juin 2009



Figure 5 - Exécution des préforages



Figure 6 - Déversement du ballast



Figure 7 - Essai de pénétromètre dynamique



Figure 8 - Mise en œuvre du matelas drainant

BARRETTES : Travaux exécutés entre : Mars et Juin 2009



Figure 9 - Traçage des barrettes



Figure 10 - exécution du coffrage et ferrailage des murettes guide



Figure 11 - Bétonnage des murettes guide



Figure 12 - installation de la machine de forage



Figure 13 - prélèvement de carottes



Figure 14 - Préparation des cages d'armatures



Figure 15 - Station de bentonite



Figure 16 - Confortement de la plate forme de forage après une crue



Figure 18 - Auscultation sonique des barrettes

Figure 17 - Bétonnage des barrettes



Figure 19 - Démolition des murettes guide



Figure 20 - recépage des têtes de barrettes



Figure 21- Exécution du ferrailage des chevêtres et fûts des piles

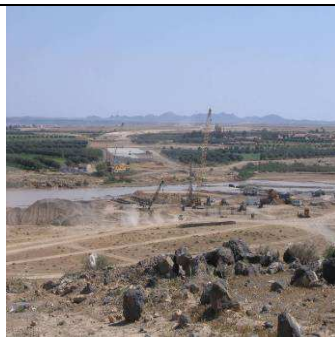


Figure 22 - Vue générale des travaux



Figure 23 - Exécution du coffrage et ferrailage des chevêtres des piles



Figure 24- Exécution du coffrage et ferrailage de la dalle de transition



PROTECTIONS EN ENROCHEMENTS: Travaux exécutés entre : Avril et Septembre 2009



TRAVAUX DE CHARPENTE METALLIQUE: Travaux exécutés entre : Juin 2009 et Avril 2010



Figure 25 - Approvisionnement de la matière



Figure 26 - Découpage des tôles



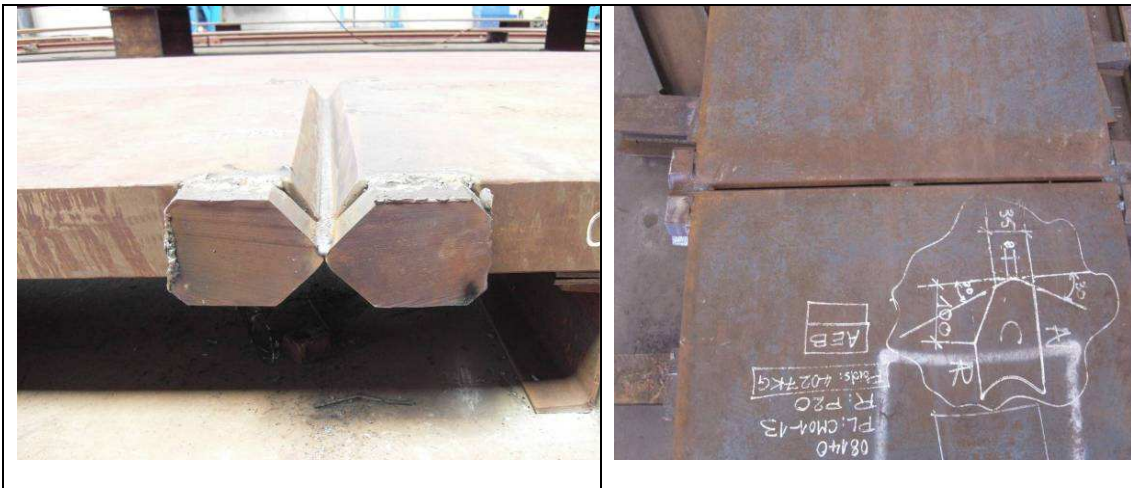


Figure 27 - Préparation des pièces pour soudage



Figure 28 - Préchauffage



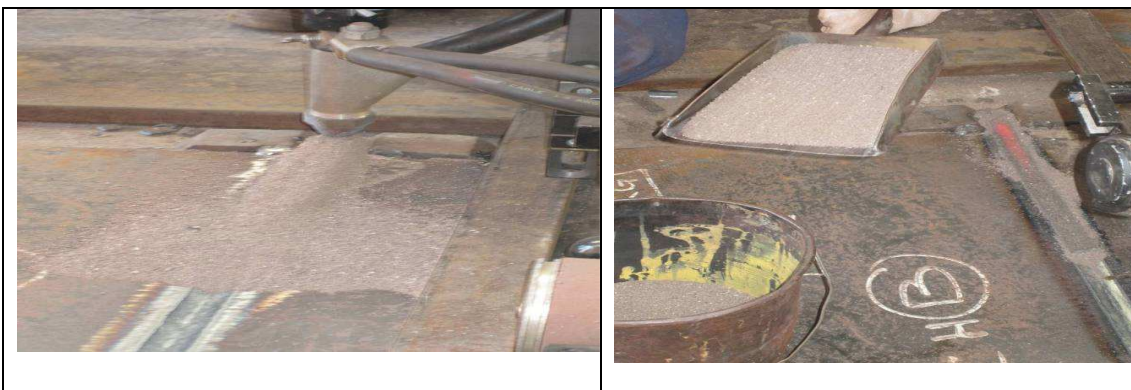


Figure 29 - Exécution des soudures



Montage et assemblage en usine



Figure 30 - Montage et assemblage en usine



Figure 31 - Poutres finies et contrôlées en attente d'être peintes



Figure 32 - Poutres prêtes à l'expédition sur site

Transport des éléments de charpente



Figure 33- Chargement des poutres sur des camions télescopiques



Figure 34 - Arrivée des poutres sur site et déchargement

Montage et Assemblages sur chantier



Figure 35 - Plate forme d'assemblage sur site



Figure 36 - Abris de soudage sur site



Figure 37 - Montage et assemblage des poutres sur site



Figure 38 - Exécution des soudures sur site

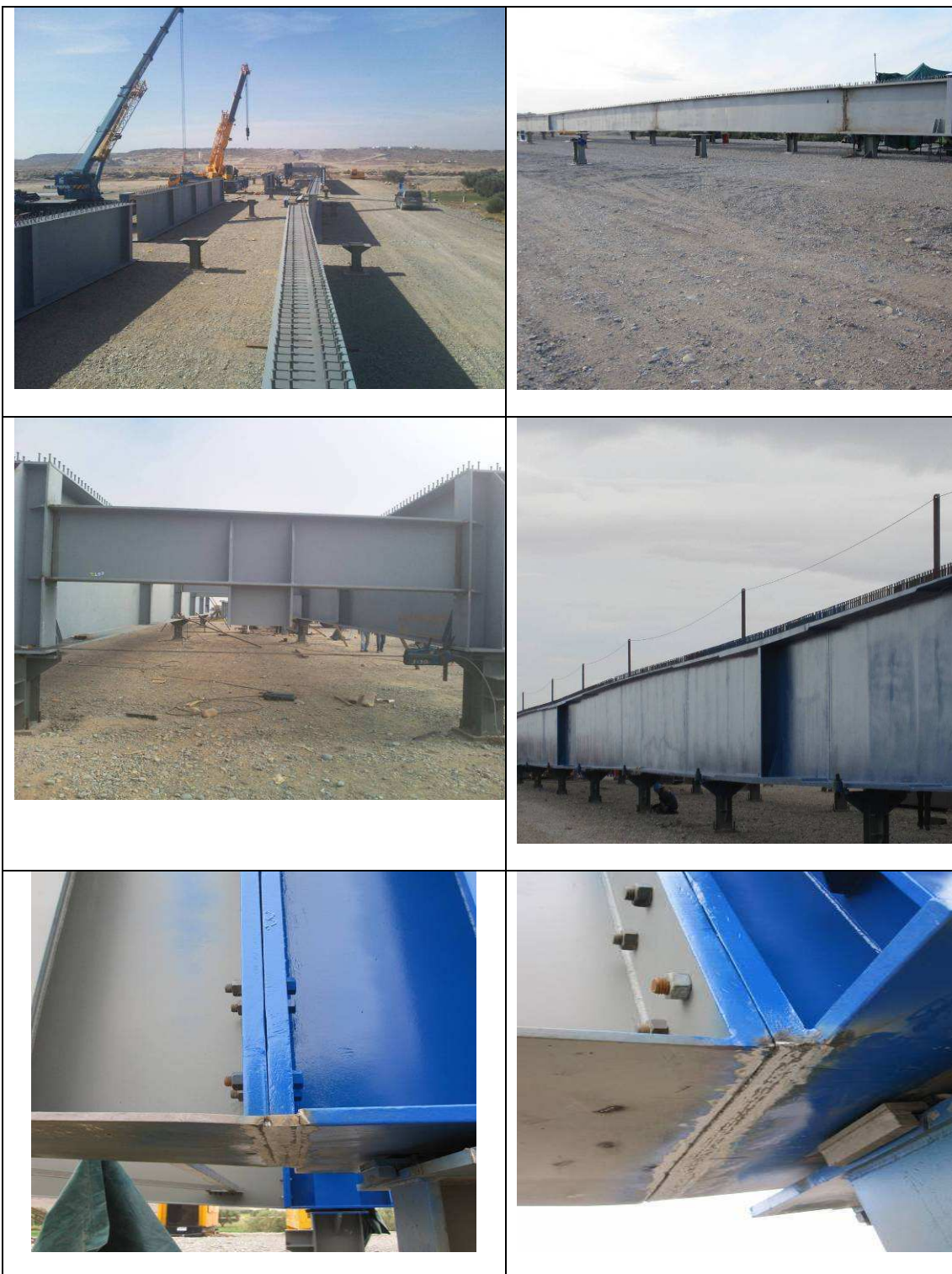




Figure 39 - Avant-bec – Jonction avec poutres

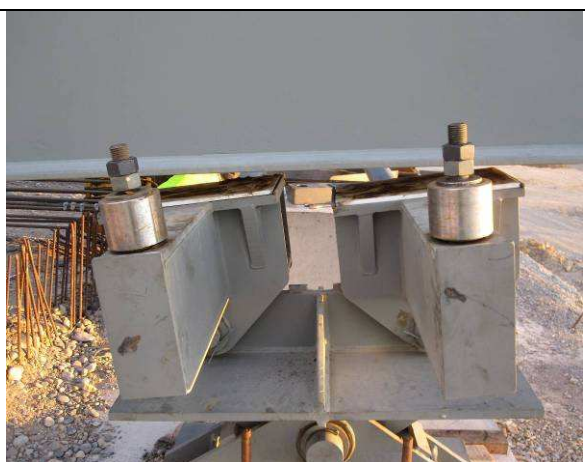


Figure 40 - balancelle équipée de rouleaux pour guidage latéral

Figure 41 - Système de guidage latéral





Figure 42- Contreventement horizontal anti-déversement



Figure 43 - Avant-bec



Figure 44 - Massif d'ancrage pour le treuil de traction et le treuil de retenue



Figure 45 - Treuils de retenue (bleu) et de tirage (jaune)



Figure 46- Moufle de retenue



Figure 47 - Chevêtre d'ancrage sur culée C8 de la moufle de tirage



Figure 48 - Ancrage de la moufle de tirage et du balan sur C8



Figure 49 - Peson indiquant l'effort de traction



Figure 50 - Accrochage des élingues sur les poutres



Figure 51 - 5- Elingues de lancement et moufle ancrée au fond sur culée C8.



Figure 52- Plot d'appui sur l'aire de montage avec ergot de vérinage



Figure 53 - Ergot de vérinage déformé



Figure 54 – traces de savon noir en dessous des semelles inférieures pour réduire les frottements



Figure 55 - Cales spéciales "épaisses" sur plots arrière



Figure 56 - Complexe de glissement sur plot : caoutchouc+tôle+PTFE



Figure 57 - Idem, la poutre l'ayant quitté



Figure 58 – déplacement du PTFE de la balancelle C8 en cours de lancement



Figure 59 - Patin « usé »



Figure 60 - Idem en gros plan



Figure 61 - Accostage sur P7



Figure 62 - Première travée lancée







Figure 63- arrivée du tablier sur la pile P2



Figure 64 - arrivée du tablier sur la pile P1



Figure 65 - Le tablier à 8 m de l'arrivée sur C0