

FRANCHISSEMENT SANS APPUI INTERMÉDIAIRE DES AUTOROUTES EN SERVICE

Jacques BERTHELLEMY*, David SCHAVITS**

* SÉTRA – Division des Grands Ouvrages et de l'Innovation

** Nouvelle Calédonie – Direction de l'Équipement de la Province Sud

Jacques.Berthelley@developpement-durable.gouv.fr

David.Schavits@province-sud.nc

1. FRANCHISSEMENT DES AUTOROUTES EN SERVICE

1.1. Prise en compte des coûts d'une pile centrale de passage supérieur autoroutier

Les chocs de camions sur les piles de pont ne sont pas rares. Les obstacles latéraux sont présents dans environ 1/4 à 1/3 des accidents mortels en France, chiffre stable depuis plusieurs années. Un tiers des PL qui quittent la route la quittent côté TPC (terre-plein central) pour causer des accidents souvent mortels, et plus graves que ceux causés par les sorties côté BAU (bande d'arrêt d'urgence).

La construction elle-même des appuis intermédiaires des passages supérieurs est par ailleurs particulièrement coûteuse quand l'autoroute franchie est en service. Des précautions doivent en effet être prises pour protéger le chantier des accidents causés par les véhicules circulant sur les voies franchies.

Le programme de recherche européen SBRI (figure 1) s'est attaché à faire apparaître tous les coûts, directs pour les maîtres d'ouvrages et indirects pour les usagers, occasionnés durant la durée de service d'un pont. Les principaux résultats du programme SBRI devraient permettre à l'avenir de mieux tenir compte du vrai coût d'une pile centrale, en prenant en considération les risques en phase de construction, tout comme ceux qui pèsent durant le cycle de service de l'ouvrage.



Figure 1 : Risques et nuisances liés aux travaux sur un passage supérieur, et aux accidents sur une pile centrale, mis en évidence dans le cadre du programme SBRI

Les travaux sur la pile centrale du franchissement ou sur ses appareils d'appui génèrent des pertes de temps et des risques d'accident pour les usagers de l'autoroute comme pour ceux de la voie portée. Les accidents sur une pile centrale autoroutière peuvent être particulièrement graves. Le mauvais fonctionnement des joints de chaussée entraîne lui aussi des nuisances sonores et même quelques risques. Leur remplacement oblige à couper temporairement la voie de franchissement.

1.2. Solutions techniques qu'offre la conception de l'ouvrage de franchissement

Toute politique de réduction des obstacles latéraux passe donc par la construction de passages supérieurs sans pile centrale quand c'est possible. La suppression des joints de chaussée par intégration du pont sur la culée est aussi intéressante.

Deux voies nouvelles mais économiques sont aujourd'hui activement explorées par la DGOI du Sétra :

I – les arcs métalliques autoancrés à suspentes soudées. Le pont de Ko Wé Kara, en figure 2, dont le Sétra a assuré la conception du tablier avec la Direction de l'Équipement de la province Sud, est un exemple de réalisation de cette

solution. Au besoin, il est bien sûr aussi possible d'encastrement ce type d'ouvrage sur la culée pour supprimer les joints de chaussée et constituer un pont intégré.

2 – les ponts en portiques : ils sont par nature encastrés sur leurs culées. En ossature mixte acier-béton d'une portée de l'ordre de 40 mètres, il n'y a pas encore de réalisation de ce type en France à la mi-2013, mais seulement des ponts en projet (figure 3).

2. LES PONTS EN ARCS AUTOANCRÉS

2.1. Choix techniques souvent adoptés pour les arcs métalliques autoancrés

Les ponts français de ce type qui datent du début du 20^e siècle comportent des suspentes en poutrelles alvéolées, comme l'ouvrage de franchissement de la Marne en aval de Dormans. Les assemblages sont rivetés.

Sur le franchissement plus récent de l'Oise à Neuville, les suspentes sont constituées de tubes à section creuse carrée, assemblés à leurs deux extrémités par des boulons HR à la charpente (figures 4 et 5).



Figure 2 : Arc de Ko Wé Kara au nord de Nouméa en Nouvelle-Calédonie



Figure 3 : Portiques mixtes sur l'autoroute Munich-Stuttgart



Figure 4 : Pont sur l'Oise

La plupart des ponts récents présentent des suspentes en câbles spiralés clos dont tous les fils sont individuellement protégés par galvanisation. C'est le cas du pont de Saint-Gilles qui franchit le Rhône en reliant Gard et Camargue, avec une portée de 120 mètres ; il demeure le record français de portée pour un pont-route en arc autoancré métallique. Ce pont a été ouvert à la circulation en 1999 et a déjà fait l'objet de publications, notamment dans le Bulletin OUVRAGES D'ART du Sétra numéro 25 de novembre 1996 : on trouve dans cet article [1] et dans la publication en anglais [2] de nombreux éléments concernant le calcul ou la technologie des suspentes.



Figure 5 : Pont de Saint-Gilles

Observées de loin, les suspentes du pont de Saint-Gilles sont peu visibles.

La volonté architecturale de mettre en œuvre des suspentes en câbles tendus dans une géométrie triangulée conduit à devoir installer un réglage de tensions qui ne correspond pas au fonctionnement naturel du treillis, dont une barre tendue sur deux est une barre comprimée. Ce fut le cas dans le cas du pont piétons de Montigny-les-Cormeilles. C'est pourquoi la mise en œuvre de ce réglage est difficile sur chantier. La détermination et le phasage de mise en œuvre de ce réglage ont fait l'objet d'une publication dans le Bulletin OUVRAGES D'ART du Sétra numéro 51 de mars 2006 [3] (figures 6 et 7).



Figure 6 : Pont piéton de Montigny les Cormeilles

Le recours à des suspentes radiales doit être combiné avec une hauteur suffisante de la poutre de rigidité du tablier. Pour le pont de Ko Wé Kara, cette hauteur est aussi nécessaire pour résister en fatigue. La disposition radiale des suspentes permet :

- d'éviter le ré-ajustement des tensions des suspentes sur chantier par vérinage sous charge permanente,
- de standardiser des suspentes régulièrement distribuées : soutenant des charges sensiblement égales, elles peuvent être toutes de même section constante,



Figure 7 : Nœud d'about du pont de Montigny

- de rendre parfaitement identiques tous les ancrages supérieurs des suspentes.

Ainsi, le choix de suspentes radiales n'est pas seulement une question d'esthétique et a été utilisé pour plusieurs autres ponts de diverses tailles, notamment les ponts du Roboul, de Bédarieux et de Ko Wé Kara. La standardisation des ancrages permet une économie non négligeable.

En revanche, les suspentes triangulées permettent pour une passerelle d'affiner à l'extrême le tablier car la raideur apportée par la triangulation des suspentes se substitue à la

raideur de la poutre de rigidité. C'est l'effet exploité dans le cas du pont de Montigny. Cet avantage est seulement architectural, car il est aussi possible au prix d'une complexification des attaches d'entretoises courantes, de respecter un gabarit contraignant par un tablier à poutres latérales. Le pont-route de Bédarieux constitue un exemple de cette autre option de conception.

Comme pour les ponts de Saint-Gilles, Montigny, et Bédarieux, les nœuds d'about du pont de Ko Wé Kara sont construits autour d'une tôle centrale monolithique de forte épaisseur. De plus les arcs en caisson s'encastrent sur des entretoises d'about elles aussi en caisson très rigides. Ces caissons constituent un cadre qui contribue fortement à la stabilité élastique d'ensemble. Il est prévu de vériner le pont sous les entretoises d'about.

2.2. Choix technique des suspentes

Nous ne reviendrons pas ici sur la technologie des suspentes en câbles clos déjà décrite dans les articles des références [1] et [2] consacrés au pont de Saint-Gilles.

Ces câbles sont constitués de nombreuses couches de fils alternativement spiralées dans un sens et dans l'autre. Les fils extérieurs ont une section en Z (voir la figure 8) qui assure une étanchéité. Les fils sont revêtus de galfan, alliage Zn-Al qui facilite leur mise en peinture.

Les fils les plus extérieurs d'un des câbles clos les moins tendus du pont de St Nazaire se sont rompus après 30 ans d'exposition aux tempêtes. Le côté spectaculaire de ces quelques ruptures de fils a eu l'avantage de donner l'alerte et permis de changer le câble à temps sans prendre le moindre risque.

Ce n'est en revanche pas le cas des suspentes en barres pleines, qu'un maître d'ouvrage ne peut mettre en œuvre que s'il est certain d'avoir les moyens d'assurer une surveillance attentive vis-à-vis du développement d'une fissure de fatigue cachée par la protection anticorrosion. Dans le cas du pont de Doemitz qui franchit l'Elbe, la progression de la fissure de fatigue au travers de la suspente pleine, était déjà très avancée deux ans seulement après la construction du pont, quand la fissure a été mise en évidence par magnétoscopie. La résonance des oscillations propres de la barre avec celles provoquées par l'effet conjugué du vent et de la

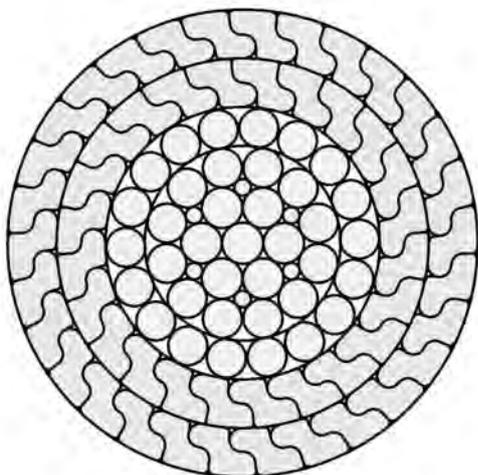


Figure 8 : Section de câble clos

pluie, était à l'origine des vibrations et donc de la fissure. De ce fait des spécifications ont été élaborées pour l'eurocode concernant ce type de suspente en barres, qui n'est pourtant pas recommandé pour les ponts routes. Des amortisseurs accordés, des articulations, des dispositifs spirales aérodynamiques de peau, ou encore des aiguilles (petits câbles auxiliaires bloquant les oscillations dans le plan des suspentes) peuvent être utilisés à titre préventif – voire à titre curatif après réparation – pour sécuriser les ponts existants avec des suspentes en barres pleines.

L'utilisation de suspentes en deux simples plats soudés est une innovation qui permet de rendre plus économiques les ponts en arcs autoancrés. Il existait avant le projet du Roboul quelques exemples de ponts à suspentes en plats soudés, comme le pont de Wittenberg sur l'Elbe d'une portée de 148m. Le pont de Wittenberg est décrit en détail dans la référence [4]. La figure 9 montre le pied d'une suspente préparé pour un réglage sous le poids de la charpente métallique seule avant soudage. La figure 10 montre des dispositions proposées par le professeur Sedlacek pour limiter le risque de fissure de fatigue, dans le cas d'une suspente en barre pleine soudée.

Cependant, une morphologie originale des suspentes destinée à faciliter la réalisation pratique de suspentes soudées a été imaginée et mise en œuvre pour la première fois pour le pont du Roboul. Ce pont est décrit en détail dans les publications [5] et [6]. Elle permet la même simplicité de réalisation par soudage que les barres, sans présenter en



Figure 9 : Pied d'une suspente du pont de Wittenberg

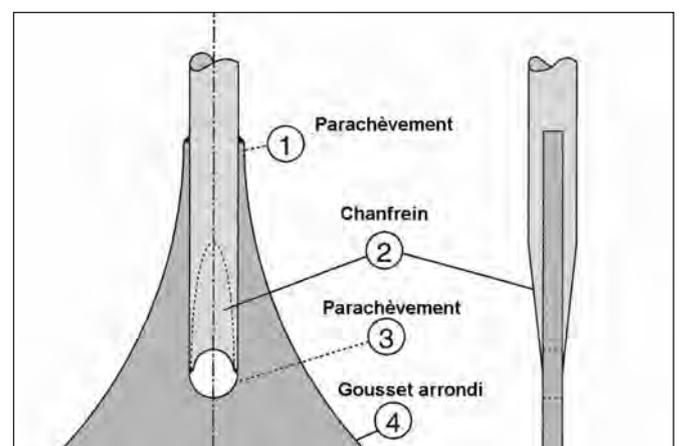


Figure 10 : Schéma de dispositions souhaitables pour souder une suspente en barre pleine

phase ultérieure de service, les mêmes risque et la difficulté d'inspection pour la recherche de fissures éventuelles. En effet, les fréquences propres de vibrations plus élevées ne correspondent plus aux fréquences d'excitation causé par l'effet conjugué du vent et de la pluie.

3. PARTICULARITÉS DU PONT DE KO WÉ KARA

3.1. Opportunité de l'échangeur de Ko Wé Kara, et caractéristiques générales du pont

Sur le site de Ko Wé Kara, le pont non courant à arcs métalliques supérieurs franchit la voie rapide au nord de Nouméa à hauteur de Rivière Salée. La voie rapide a des caractéristiques autoroutières. Le nouvel échangeur permet un accès beaucoup plus direct à la presqu'île très industrielle de Ducos. Conformément aux attentes de la province Sud, le nouvel ouvrage permet de délester les deux autres échangeurs donnant accès à Ducos et offre une traversée sécurisée de la voie rapide aux piétons et aux cycles. Pendant les études d'avant projet, plusieurs solutions de franchissement avaient été étudiées par la direction de l'équipement de la province Sud : bipoutre mixte, poutrelles enrobées, pont-dalle, pont à poutres latérales... La solution à deux arcs autoancrés s'est rapidement révélée la plus avantageuse, notamment sur les points suivants :

- Pas d'appui intermédiaire : les risques d'accident en phase chantier et en phase définitive sont limités,
- Faible hauteur de tablier (hourdis plus poutres sous chaussée) : les hauteurs de remblais à l'arrière de chaque culée sont limitées. À l'avantage financier pour le pont et les remblais s'ajoute la réduction des pentes des voies d'accès au pont,
- Par rapport à une solution classique en arc, l'arc autoancré n'exerce pas d'efforts horizontaux sur les fondations,
- Coût limité : cette solution était dès l'avant-projet économiquement très proche de solutions plus classiques. L'appel d'offre a confirmé sa compétitivité.

La solution à deux arcs autoancrés latéraux indépendants franchit la voie rapide en une portée centrale de 45 mètres environ prolongée de part et d'autre par des ouvrages d'accès en béton armé de portée inférieure à 10 m. Ces ponts portent une voie routière de 8,50 m de large et supportent sur un côté une passerelle piétonne à platelage de bois (Kohu). Le Sétra est intervenu pour la Province Sud : J. Berthelley a assuré l'ensemble de la conception détaillée du tablier en arc autoancré sur la base de l'avant projet de la direction de l'Équipement de la province Sud. Le Sétra a assuré aussi le contrôle des études d'exécution. Il n'est intervenu qu'à titre de conseil sur les ouvrages d'accès. Il n'est pas fait appel à un architecte pour les ponts en Nouvelle-Calédonie. La charpente a été fabriquée par l'entreprise Berthold dans la Meuse, qui a travaillé pour l'entreprise générale Pontoni à Nouméa. L'entreprise Pontoni a proposé les formes élégantes des portiques d'accès symétriques qui tiennent lieu de culées.

La protection anticorrosion du pont de Ko Wé Kara est de classe C5M compte tenu de la proximité de l'Océan. Il n'y

a pas eu plus de difficulté à faire les retouches sur chantier avec le système retenu, à base d'époxydes polyamides riches en zinc en primaire, qu'avec un système C4.

3.2. Morphologie des suspentes

Les réglementations européennes ne s'appliquent pas en Nouvelle-Calédonie, néanmoins les suspentes sont prévues conformément aux recommandations de l'eurocode pour pouvoir être réparées ou changées sans avoir à limiter la circulation routière durant les travaux.

Les suspentes rayonnantes reliant le tablier aux arcs sont constituées de simples plats assemblés par soudage. Comme pour le pont du Roboul, J. Berthelley a conçu les suspentes à partir de deux plats de 18 mm d'épaisseur de largeur variable qui forment une croix en section courante. Les suspentes sont bicolores et semblent changer de couleur selon le point de vue d'observation dans l'échangeur. Les raccords bout-à-bout des suspentes sont soudés à pleine pénétration sur des goussets ou des découpes de rayon supérieur à 150 mm. En revanche, la liaison longitudinale entre les plats le long des suspentes est assurée par de simples cordons d'angle.

Toutes les pièces de raccordement supérieur des suspentes aux arcs sont identiques. Le plat qui constitue la partie supérieure d'une suspente se prolonge pour constituer un diaphragme du caisson de l'arc soudé prioritairement sur les deux flancs du caisson. Les distorsions de ces caissons sont ainsi évitées (figures 11, 12 et 13).

À l'ancrage bas, l'autre plat se prolonge pour se raccorder directement à l'âme de 18 mm d'épaisseur de la poutre de rigidité qui se prolonge au-dessus de la membrure supérieure en formant un gousset arrondi. Cette pièce traverse la membrure supérieure de la poutre de rigidité par une ouverture qui s'allonge dans le sens longitudinal. Les extrémités de cette ouverture sont découpées selon un arrondi pour améliorer le classement du détail en fatigue (figure 14).

Cette traversée détermine dans l'ouverture un parallélogramme dont la hauteur est l'épaisseur de la membrure supérieure et la longueur est la largeur du plat inférieur de la suspente. Les deux pièces sont presque au contact sur les deux surfaces déterminées par ces parallélogrammes.

Pour assurer la protection anticorrosion dans les interstices, il est possible :

- soit de métalliser localement ou de peindre à l'avance avec la couche primaire les deux faces de l'âme au droit de ce parallélogramme, et le



Figure 11 : Schéma d'une suspente



Figure 12 : Attache supérieure d'une suspente

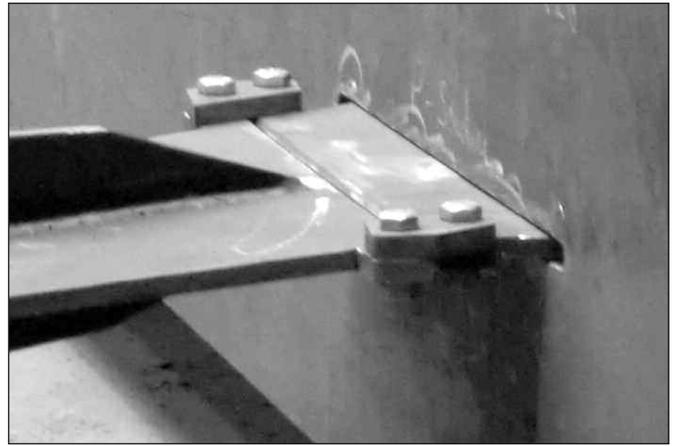


Figure 13 : Attache inférieure au montage à blanc

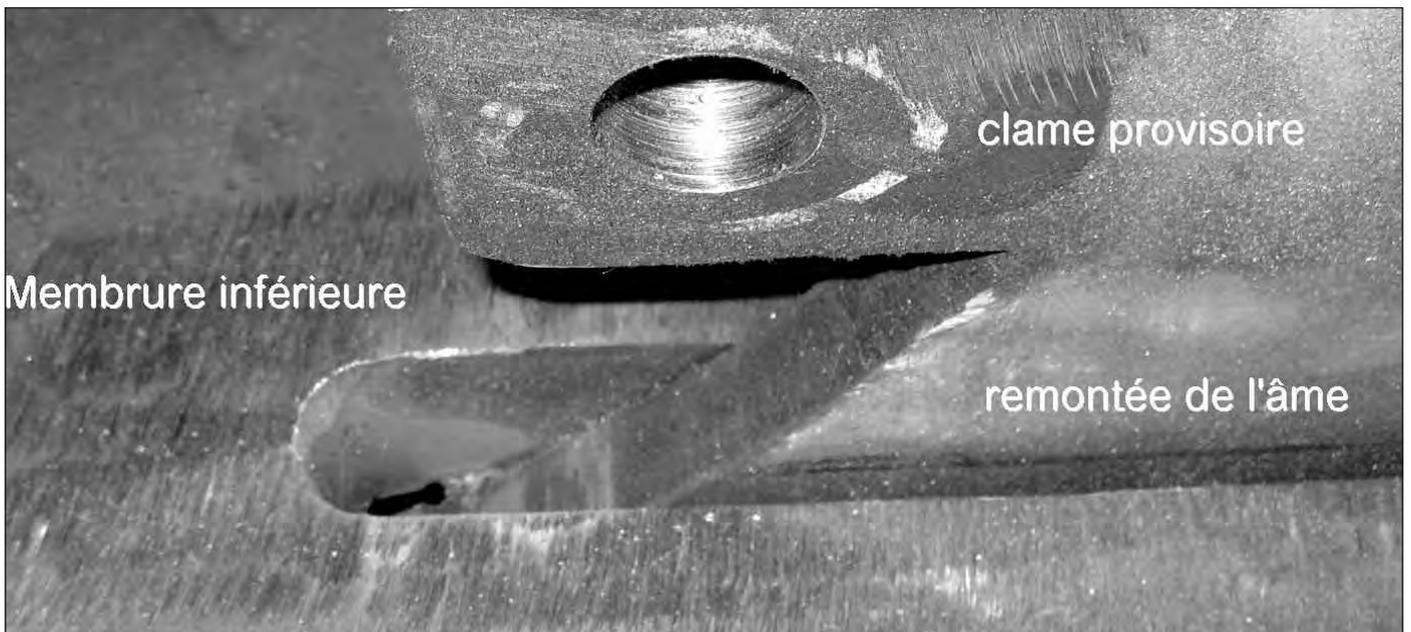


Figure 14 : Découpe de la membrure inférieure

chant intérieur découpé de la membrure. C'est l'idéal vis-à-vis de la fatigue.

– soit de souder a posteriori par un fin cordon d'étanchéité le périmètre de chacun des deux parallélogrammes de chaque traversée de membrure supérieure.

C'est la seconde option qui a été choisie compte tenu de la proximité du milieu marin et du risque accru de corrosion.

3.3. Résistance améliorée aux chocs de véhicules hors gabarit

De telles dispositions avaient déjà été adoptées à titre expérimental sur un ouvrage neuf pour la rocade de Strasbourg et réalisées sans problème dans le cas de cet ouvrage courbe. Des impacts au droit du franchissement de la rue des Bouchers n'ont pas provoqué de dégâts importants. On trouve une vue d'ensemble et des détails de ce pont de Strasbourg dans la référence [7]. Ces tôles de 18 mm d'épaisseur pour le pont de Ko Wé Kara, sont soudées au point haut à l'âme et au point bas sur la membrure inférieure.

La réalisation d'un tel caisson n'est guère plus chère que celle d'un raidisseur ordinaire car le linéaire de soudures est le même, mais elle présente de multiples avantages, car elle :

- interdit le cheminement piéton sur le rebord de la membrure,
- évite les stagnations d'eau sur la membrure inférieure et interdit aux oiseaux de nicher, ce qui améliore la résistance à la corrosion dans une zone vue et exposée susceptible de se dégrader rapidement,
- joue le rôle purement mécanique de participation à la flexion à la flexion générale d'ensemble,
- raidit l'âme dont on interdit par exemple la respiration en partie inférieure,
- améliore le transfert des cisaillements entre l'âme et la membrure inférieure, en particulier au droit des concentrations de contraintes dont sont le siège les points des changements d'épaisseur de la semelle inférieure,
- constitue un caisson triangulaire indéformable. La membrure inférieure est rigidifiée en torsion de St-Venant, ce qui facilite sa justification à l'instabilité élastique, par exemple dans le cas des ponts continus.



Figure 15 : Détails d'un caisson triangulaire

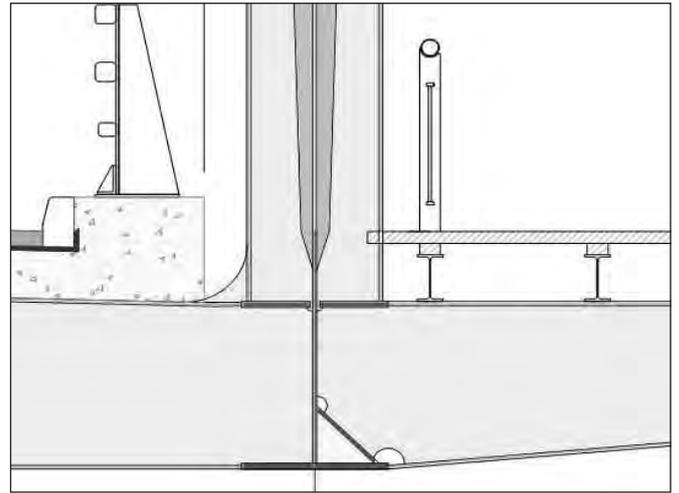


Figure 16 : Plan côté passerelle

L'adoption de cette disposition constructive est recommandée pour les ouvrages neufs, en particulier dans le cas de la mise en œuvre d'acier autopatinable même si elle n'empêche pas les oiseaux de nicher du côté intérieur des poutres. Dans le cas de la construction d'un pont neuf en acier autopatinable, le caisson triangulaire unique de la figure 16 peut être au besoin doublé symétriquement de part et d'autre de l'âme (figures 15 et 16).

Dans le cas du pont de Ko Wé Kara, cette disposition est complétée par un remplissage des caissons triangulaires par un coulis de ciment. De plus, les cordons de soudure sont renforcés pour résister aux chocs définis dans les eurocodes.

3.4. Montage du pont de Ko Wé Kara

La présence en Nouvelle Calédonie des chars de l'entreprise Sarens pour la construction des usines métallurgiques du nickel a facilité le montage du pont. Sarens est intervenu en province Sud (usine Vale Nouvelle-Calédonie) et en province Nord (complexe Koniambo Nickel SAS). Chacun de ces deux chantiers figure parmi les plus impor-

tants projets industriels de France en construction en 2013. Par ce moyen proposé par les entreprises, le pont a été mis en place en quelques heures avec sa dalle de béton armé déjà achevée.

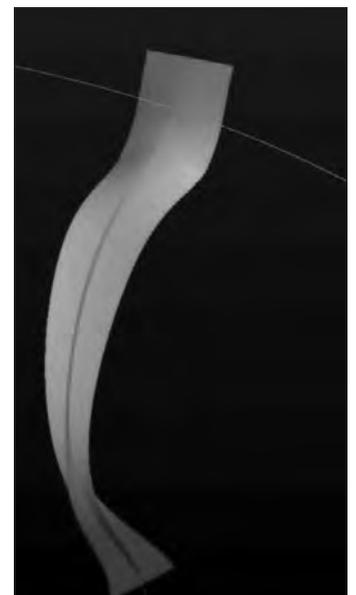
Les suspentes de J. Berthelley sont de section constante et d'inerties variables. Elles résistent très bien en compression, en particulier les plus courtes. Un calcul des modes propres de flambement au moyen de Code_Aster, le logiciel libre distribué par EDF_R&D lui a permis de vérifier que les charges critiques des premières suspentes en tôles de 18 mm est très élevée, ce qui assure la stabilité élastique vis-à-vis d'un mode de ruine qui tient à la fois du déversement, du voilement et du flambement (figure 17).

En solution de base, il était prévu un lançage dans l'axe du pont sur les appuis définitifs, qui nécessitait moitié moins de chars et des chars non manœuvrables beaucoup moins complexes (figure 18).

En alternative, il était aussi proposé d'opter pour une dalle mixte du même type que la dalle des ponts du Dancourt décrits en [7]. L'épaisseur moyenne de la dalle portée par les seules pièces de pont aurait été de 0,24m au lieu de



Figure 17 : Vue du montage et aspect du premier mode critique intéressant la suspente



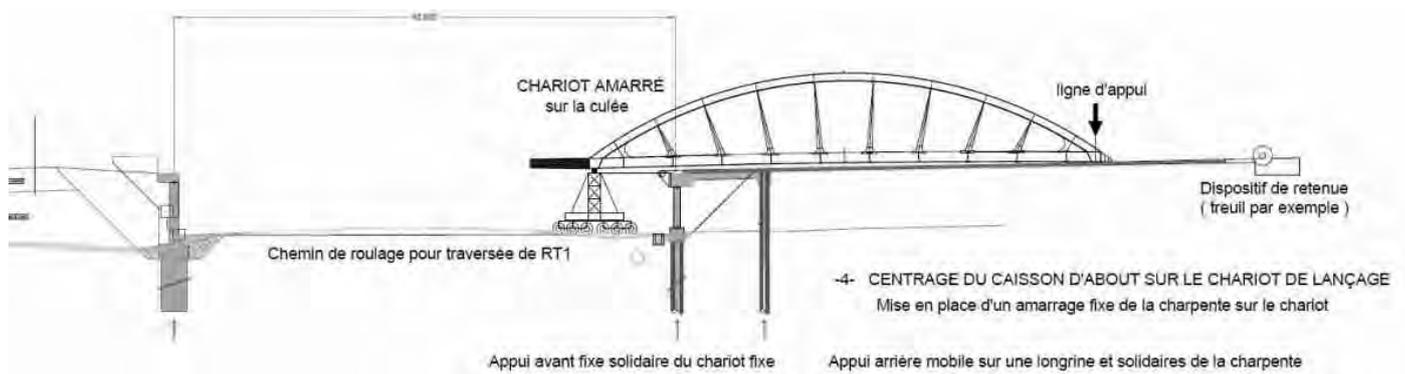


Figure 18 : Montage avec chariot unique simple non manœuvrable

0,10m. Rappelons qu'avec une épaisseur de dix centimètres seulement, la dalle mixte "Brignon" des ponts du Dancourt ne présente aucune pathologie après avoir porté durant 40 ans la circulation autoroutière est-ouest passant par les Ardennes. La finesse de la tôle de fond, de nombreux et coûteux connecteurs, et l'absence de raidissage constituaient des difficultés de mise en œuvre sur chantier qui ont conduit à abandonner la solution de la dalle mixte de type Robinson.

C'est pourquoi, dans le projet à dalle mixte du pont de Ko Wé Kara, des bandes régulièrement espacées de connec-

teurs CL (figures 19 et 20) auraient permis à la fois de raidir la tôle de fond avant bétonnage et d'assurer la connexion. La tôle seule est mise en place avec la charpente. Le béton de la dalle est coulé ensuite au-dessus de l'autoroute. La tôle de fond ne présente pas de contreflèche de fabrication et ses déformations au bétonnage sont limitées par l'effet de membrane qui peut être calculé avec Code_Aster.

Le principe des connecteurs CL est décrit dans [9].

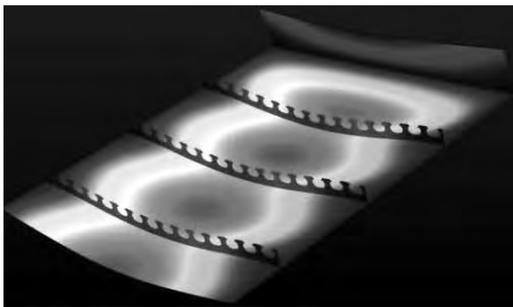


Figure 19 : Faibles déformations lors du bétonnage (effet de membrane)

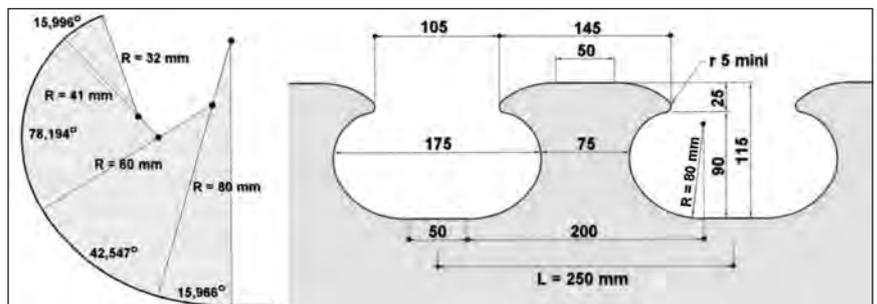


Figure 20 : Principe de la connexion par découpe CL à la géométrie en clothoïde

4. EXTENSION POSSIBLE À DES PONTS DE PLUS GRANDE PORTÉE

La portée du pont de Ko Wé Kara est de 42,80 m. Les dispositions adoptées à Ko Wé Kara peuvent être étendues à des ponts de plus grande portée. Dans le cas des ponts autoancrés, ce sont les moyens disponibles pour le montage qui conditionnent la réalisation du pont.

Le pont de Bédarieux dont J. Berthelémy a assuré la conception dans le cadre d'une mission d'AMO du Setra pour le Conseil Général de l'Hérault en 2009, montre qu'une portée de 90 m peut être franchie de façon économique sans appui intermédiaire. L'économie des piles en rivière procure ici un avantage hydraulique décisif pour le choix d'un arc autoancré au-dessus de l'Orb. Le pont a été construit directement en place en période d'étiage au moyen de palées provisoires dans le fleuve (figure 21).

Les dispositions constructives des ponts de Bédarieux et de Ko Wé Kara sont comparables. Les pièces de pont du pont de Ka-We-Kara soumis au risque de choc de véhicules ont la même hauteur que les poutres principales. Les membrures inférieures et supérieures sont au même niveau et sont soudées bout-à-bout. En revanche le pont de Bédarieux comportent des entretoises qui permettent d'augmenter la hauteur des poutres latérales sans nécessiter de remonter le profil en long.

5. LES PONTS EN PORTIQUES

5.1. Les portiques : autre solution si la hauteur libre est suffisante

Les portiques sont aussi appelés "ponts intégrés" dans la littérature technique internationale. Ils sont encastrés sur leurs appuis. Si cette technique est classique en France pour les pont types en béton armé de vingt mètres de por-



Figure 21 : Pont de franchissement de l'Orb à Bédarieux (Photo P. Peyrac)

tée maximale (programme PIPO du Setra), elle est méconvenue pour les portées plus grandes.

On trouve en revanche des ponts intégrés en portiques mixtes multiples en Australie dès 1974 : un exemple est le viaduc de la rivière Hakesbury au nord de Sydney sur la côte australienne voisine de la Nouvelle-Calédonie et qui bénéficie des mêmes conditions favorables de climat [8]. Il comporte des travées de 55 mètres d'ouverture avec joint intermédiaire de dilatation tous les 220m seulement. Aujourd'hui, on en construit dans plusieurs pays européens (Suède, Allemagne, Suisse, Pologne, Grande-Bretagne) et aux USA.

La conception de ces ouvrages nécessite des reconnaissances géotechniques préalables de qualité pour optimiser les fondations. En effet les aléas sur les fondations ont des conséquences sur le calcul du tablier lui même alors que ce n'est habituellement pas le cas. Dans le cas où le sous sol est rocheux, il ne faut pas chercher à renforcer les encastremets, ce qui augmente leur raideur. On peut au contraire assouplir les appuis en conservant l'encastrement sur une béquille verticale, par exemple grâce à une rotule Mesnager en pied des béquilles verticales du portique ou grâce à des pieux métalliques souples. Dans certains cas, on peut recourir à la solution appelée "semi-intégrée" qui consiste à disposer des appareils d'appui sous le niveau du chevêtre et de sa dalle de transition. Les appareils d'appui soient alors difficiles à inspecter et à changer, et cette solution est seulement répandue dans quelques états de la côte Est des USA.

5.2. Intérêt des poutres mixtes préfabriquées servant de coffrage (poutres Préco)

Dans la conception adoptée pour le projet de Chamonix, les profilés laminés cintrés sont groupés par deux pour constituer des caissons fermés par une membrure supérieure. Selon les sections, la découpe de connexion est soit placée dans la zone comprimée, soit reste proche de l'axe neutre de la poutre mixte.

La courbure des profilés est en fait le résultat gratuit de leur découpe dans le sens longitudinal selon la géométrie CL (figure 20) décrite dans [9]. Elle libère des contraintes internes et fait apparaître une courbure sur chaque demi-profil. Avant de les souder ensemble par deux pour constituer chaque caisson, on peut rectifier facilement la courbure des demi-profilés pour obtenir au besoin une géométrie précise recherchée, car les demi-profilés sont souples.

Les caissons obtenus par l'assemblage de deux demi-profilés avec une membrure supérieure sont sans recoins ni pièces transversales. Ils permettent donc dans la plupart des environnements de recourir à des aciers autopatinables. En l'absence d'un test fiable permettant d'assurer qu'une zone est favorable à ces aciers, on évite toutefois par précaution les autopatinables en ville, en zone industrielle et au bord de mer car dans ces zones la patine protectrice ne se forme pas du fait des sels ou de la pollution.

Dans le cas du pont sur l'Arve, l'acier autopatinable était possible. Les caissons résistent aux chocs de corps flot-

tants. La forme esthétique de l'intrados répond aux exigences hydrauliques. Enfin la robustesse est assurée vis-à-vis des crues et du risque de voir le pont emporté (figure 22).

Notons enfin que tous ces ponts sont encastrés sur leurs abouts ce qui assure des économies à la construction comme à l'usage le long de la vie de l'ouvrage : pas d'appareils d'appui ni de joints de chaussées. Le remplacement périodique de ces pièces génère des coûts de maintenance et des interruptions de la circulation sur les ouvrages classiques qui en sont équipés. Enfin, les culées peuvent sans problème être fondées sur une file unique de pieux.

Les membrures supérieures des ponts mixtes en travée isostatique sont de faible largeur et il n'est généralement pas possible de les monter une par une à la grue en raison du risque de déversement que présente une telle poutre isolée. Une membrure supérieure en béton peut être plus large tout en restant bon marché. Il est alors possible de monter les poutres mixtes une par une à la grue. Les membrures supérieures en béton une fois montées font office de prédalles qui servent de coffrage pour couler en place une dalle supérieure constituant une seconde strate de solidarisation.

Quand le montage à la grue à partir de la plate-forme routière franchie est possible, la gêne que le chantier occa-

sionne est très réduite ce qui est particulièrement apprécié en milieu urbain lors de la réalisation de nouveaux franchissements : l'impact socio-économique de l'ouvrage est réduit.

La poutre "Préco" est une poutre préfabriquée mixte qui sert de coffrage pour la dalle de seconde strate venant solidariser les poutres Préco. Cette technique propose une voie nouvelle pour concevoir un ouvrage de franchissement à faible tirant d'air. Avec déjà une douzaine de réalisations dans plusieurs pays, le concept a montré sa pleine fiabilité dans la transposition du papier au chantier. La durabilité, la robustesse, la compétitivité, unies à grande qualité esthétique en font sûrement une solution de grand intérêt pour l'avenir.

5.3. Intérêt de la connexion CL

Dans le cas du pont de franchissement de l'Arve, la connexion CL (figure 20) permet d'économiser le soudage de connecteurs par simple adoption d'une découpe CL en lieu et place d'une découpe rectiligne des âmes. La découpe CL transmet des efforts de glissement important, et sa forme mise au point par le Séttra dans le cadre du projet de recherche européen "Précobeam" assure une résis-

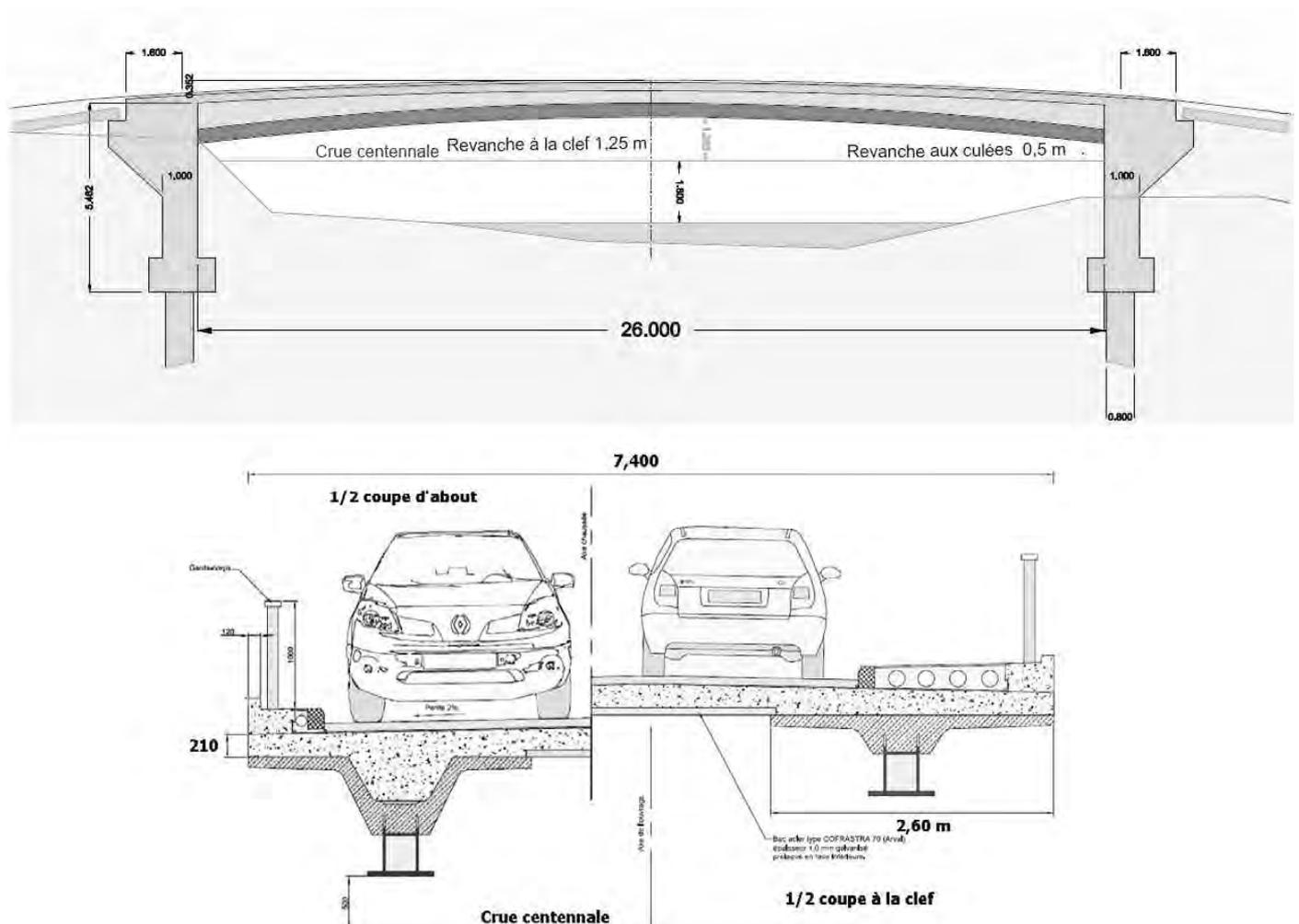


Figure 22 : Projet de franchissement de l'Arve près de Chamonix

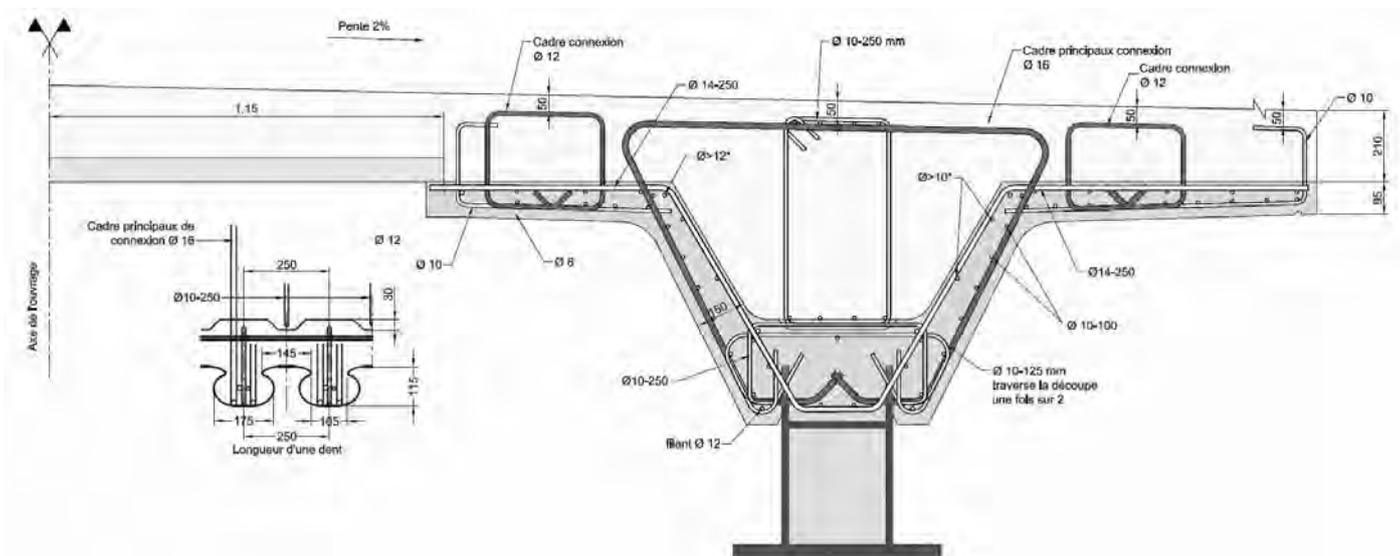


Figure 23 : Coupe transversale à l'encastrement les aciers longitudinaux d'ancrage ne sont pas figurés

tance en fatigue qui a fait l'objet d'essais de validation dans les laboratoires des Universités Techniques de Wrocław et de Munich.

Les éléments pour le calcul de la connexion CL sont disponibles dans les publications [9], [10], [11] et [12], ainsi qu'auprès du Sétra (figure 23).

Le projet de franchissement de l'Arve au droit de la Joux, élaboré pour la Ville de Chamonix en 2008 par le Sétra dans le cadre du programme européen de recherche Precobeam avec le bureau d'études B&M Ingénierie est cependant resté au stade de projet du fait de la crise financière.

6. PONTS EN PORTIQUES MIXTES ACIER-BÉTON EN NOUVELLE-CALÉDONIE

6.1. Conditions générales favorables

L'entretien des appareils d'appui et des joints de chaussée représente un budget important. Pour les ouvrages du réseau routier national français de métropole, il représente 40 % du coût de l'entretien spécialisé : en moyenne, les joints de chaussée sont changés tous les 15 ans et les appareils d'appui tous les 40 ans et leur maintenance nécessite des coupures de circulation. De plus, les joints qui sont changés la nuit durant quelques heures de fermeture de la circulation ont une durabilité nettement moindre que les joints de chaussée montés sur un pont neuf. La situation en Nouvelle-Calédonie est comparable en ce qui concerne ces équipements.

Les recoins aux extrémités du pont sont souvent très dégradés par les infiltrations d'eau dans la zone des joints de chaussée sur ponts classiques. Comme les joints de chaussée, ces recoins sont supprimés dans le cas des ponts en portiques.

Le pont en portique est mieux ancré sur ses appuis, ce qui constitue un avantage en cas d'inondation ou de séisme.

Bien qu'elle soit soumise au risque de tsunami sur sa cote Nord-Est, la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie n'est pas considérée comme sismique car d'après des données aujourd'hui disponibles, la Ceinture de Feu du Pacifique concerne principalement une bande située plus au Nord, allant des îles Salomon aux îles Samoa par l'arc de subduction du Vanuatu. Quoi qu'il en soit, les ponts en portiques risquent beaucoup moins de tomber de leurs appuis en cas de séisme que les ponts classiques sur appareils d'appui.

Les limites extrêmes des variations de température en Nouvelle-Calédonie, à prendre en compte pour dimensionner la structure vis-à-vis des effets thermiques, sont nettement moins sévères que celles qu'on trouve dans des pays européens où des ponts en portiques de portée équivalente ont déjà été réalisés et c'est un paramètre très favorable.

Le biais ne pose pas de problème particulier aux ponts en portiques. Enfin, la structure intégrée du tablier en portique présente une élégance propre qui permet d'économiser les murs-cache nécessaires pour intégrer sur le plan architectural la solution isostatique dans le site.

6.2. Pont sur le canal de Ko Wé Kara

En Nouvelle-Calédonie, le projet de franchissement du canal de Ko Wé Kara a prévu en solution de base le même type de conception que pour le franchissement de l'Arve avec une ouverture de 32,45 m. Les caissons ont été préférés aux poutres en I de manière à limiter les risques de corrosion.

L'ouvrage existant (un VIPP constitué d'une travée de 25 m de portée) présentait de nombreux désordres (forte pénétration des chlorures dans le béton avec rupture d'un câble de précontrainte), et au vu du montant estimé des investigations et des travaux de réparation à réaliser, il a été décidé de démolir et de construire un nouvel ouvrage, mieux adapté aux contraintes du site.

Sur la base de la solution de pont en portique intégré initialement retenue, l'entreprise Pontoni, titulaire du marché

de reconstruction a choisi de mettre en place quatre poutres caissons, afin de limiter la hauteur du hourdis. La solution préco n'a pas pu être utilisée par l'entreprise car la capacité des grues alors disponibles en Nouvelle Calédonie ne permettait pas la mise en place de poutres de masse importante. Le hourdis est réalisé sur des prédalles appuyées sur les poutres métalliques.

6.3. Pont du carrefour Berthelot

Un autre projet en construction concerne au droit du carrefour Berthelot le franchissement de la voie rapide où converge la plus grande partie de la circulation vers Nouméa. Il s'agit de la même voie que celle franchie par le pont en arc de Ko Wé Kara. Le Sétra est cette fois intervenu dans le cadre d'une mission d'AMO pour la ville de Nouméa sur un projet dont la maîtrise d'œuvre est assurée par Egis. L'ouverture du portique est de **35,40 m**. La charpente prévue par le projet en portique mixte compte six poutres-caissons écartées de **2,30 m**. Elles sont assez robustes et en mesure de résister à des chocs éventuels de véhicules hors gabarit (figures 24 et 25).

Dans la partie de l'ouvrage qui surplombe la voie rapide, le Sétra a recommandé le recours à des prédalles continues et participantes coulées à l'avance sur les charpentes métalliques et mises en place avec elles à la grue. La masse de chaque "poutre préco" du projet est alors approximativement de 30 à 40 tonnes car :

- la charpente métallique pèse environ 20 tonnes ;
- les prédalles connectées pèsent au minimum 10 tonnes si elles ne surplombent que la zone centrale de la chaussée de 20 m de large, et au maximum 20 tonnes si on les fait régner sur toute la longueur de l'ouverture.

Cette charge est à porter à moins de 10 m de haut et au plus à 8 m de distance.

Le montage à la grue d'éléments mixtes préfabriqués préco servant de coffrage est ainsi rendu possible par une ou deux grues usuelles qui n'ont à effectuer qu'un simple levage si les poutres sont tractées en position sur la voie rapide sur remorque. La dalle supérieure de solidarisation est ensuite réalisée en seconde phase.

Seul le montage des poutres préco et éventuellement le coulage de la dalle qui peut être réalisé en une seule nuit nécessitent des coupures de circulation sur la voie rapide.

Les membrures supérieures des poutres préco servent à la fois de section comprimée économique, d'élément de coffrage pour le tablier et d'élément stabilisateur horizontal en phase intermédiaire de construction.

Dès qu'une poutre mixte préco est posée, les prédalles participantes jointives peuvent rapidement être solidarisées, ce qui améliore la stabilité des poutres préfabriquées en phase provisoire. Le chantier peut être ré-ouvert à la circulation plus rapidement car les prédalles participantes liaisonnées entre elles participent à la stabilité d'ensemble, même en cas de choc de véhicule hors gabarit en phase provisoire. Les durées des coupures de la circulation nécessaires durant le montage sont très réduites.

Des précautions sont à prendre pour assurer la stabilité durant les phases de construction des murs de front des culées, en particulier dans le cas d'assouplissements en pied comme par

exemple la mise en œuvre de rotules Mesnager. Les étaielements éventuels doivent être eux-mêmes protégés ou à l'épreuve des chocs de véhicules circulant sur la voie rapide.

6.4. Recommandations pour la charpente métallique

Pour le calcul en fatigue le Sétra recommande de déterminer le coefficient λ_1 à partir de la ligne d'influence la plus défavorable de la contrainte calculée le long du pont sur le bord de la découpe en tenant compte des divers efforts qui engendrent des contraintes comme le glissement le moment fléchissant et l'effort normal. ST1 peut fournir la ligne d'influence d'une telle contrainte généralisée. En effet, les valeurs de λ_1 proposées dans quelques cas simples par la norme NF EN 1993-2 risquent de ne pas convenir. À cette fin, J. Berthelley tient à la disposition des projeteurs un outil indépendant de calcul qui simule l'effet de la circulation des camions sur une ligne d'influence donnée et cumule les endommagements par la méthode des réservoirs pour calibrer le coefficient λ_1 des ponts routes conformément aux recommandations de l'Annexe A de la norme NF EN 1993-1-9.

Les angles du portique sont le siège de moments fléchissant importants dont la transmission peut être rendue possible au moyen des dispositions de la figure 25. La membrure supérieure de la poutre est prolongée par un ancrage dans le béton qui met en œuvre la découpe CL. Le dispositif est complété par des goujons de part et d'autre de l'âme métallique au contact du béton (voir figures 26 et 27 en page 56).

6.5. Soins particuliers à apporter aux dalles de transition

La longueur totale de la dalle de transition recommandée par le Sétra est de 5,75 m.

L'étanchéité de l'ouvrage est prolongée sur une longueur de 2,60 m au-delà de l'extrémité du chevet. L'extrémité de la dalle de transition est profilée sur une longueur de 750 mm.

Ces dispositions tirent parti de l'expérience de plusieurs pays en matière de ponts intégrés et notamment des recommandations émises en Suisse par l'OFROU grâce aux recherches et à la thèse EPFL de Damien Dreier. Par ailleurs, des ouvrages expérimentaux réalisés en Allemagne ont montré l'importance du profilage de l'extrémité de la dalle pour limiter le risque de dégradations de la chaussée en surplomb (voir figure 28 en page 56).

Ces recommandations concernant la dalle de transition ont pour objectif d'éviter les tassements du remblai derrière le mur de front de la culée. Les dalles de transition ne doivent donc pas être limitées à la largeur de la chaussée mais intéresser aussi les zones sous trottoirs.

Leur intérêt pour le confort et la sécurité de la circulation est particulièrement vif dans le cas d'un trafic lourd ou d'un trafic ferroviaire sur la voie portée par le passage supérieur.

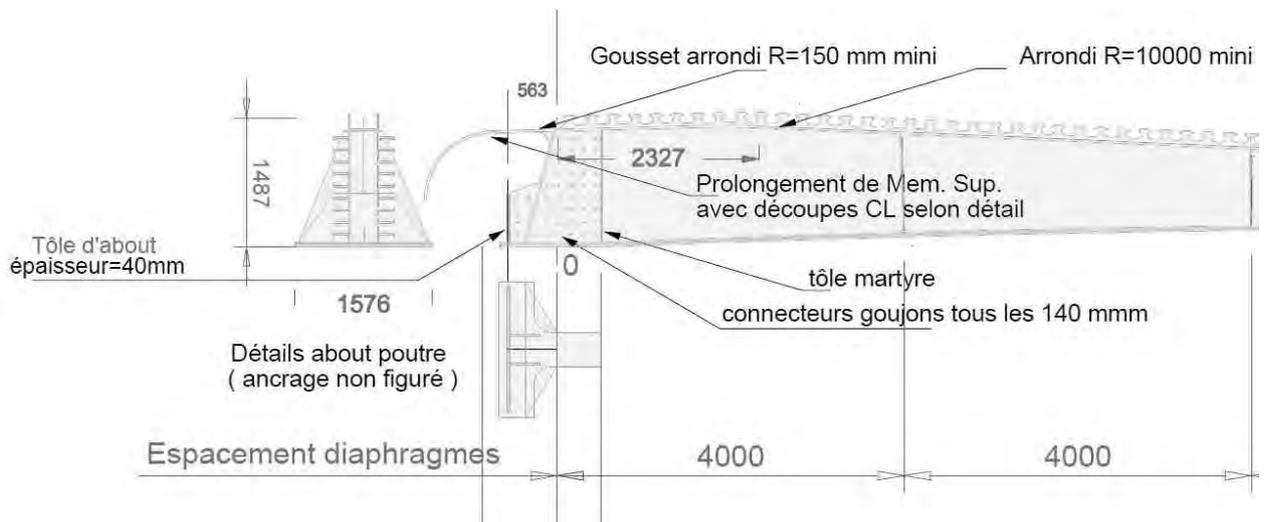


Figure 26 : Ancrage de la membrure supérieure de la poutre à l'encastrement

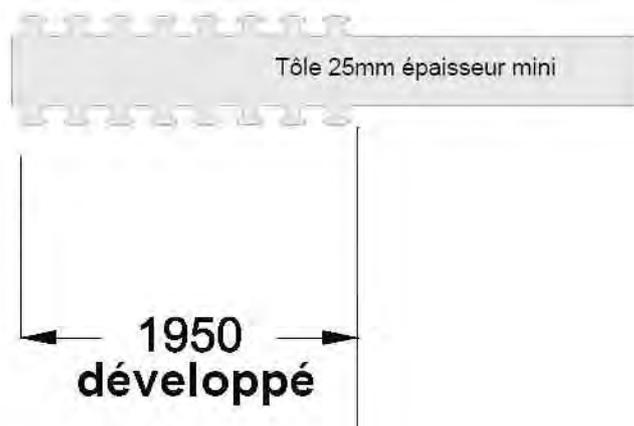


Figure 27 : Détails possibles d'un ancrage de la membrure supérieure de la poutre à l'encastrement

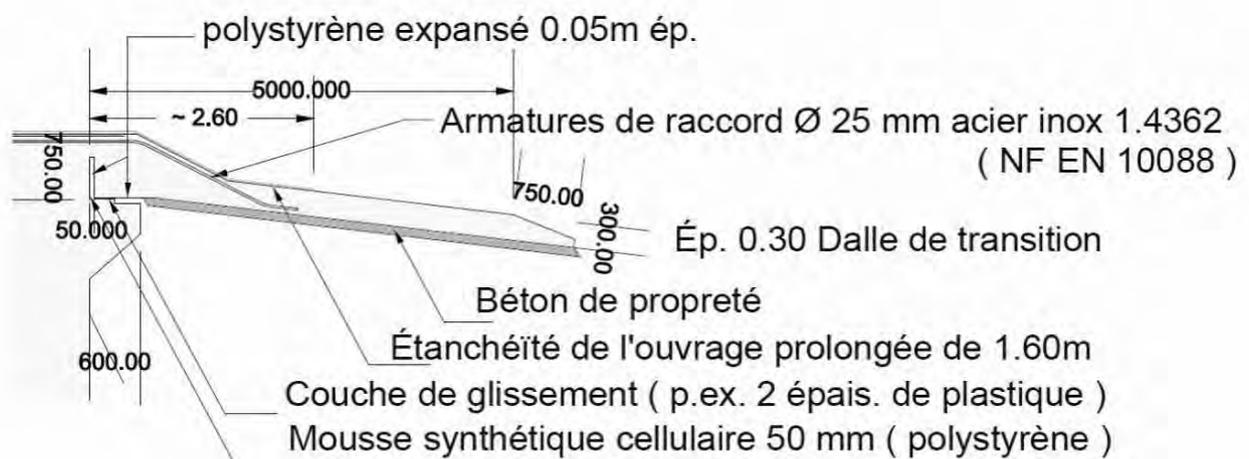


Figure 28 : Schéma d'une dalle de transition

7. AUTRES RÉALISATIONS MARQUANTES EN EUROPE

La Roumanie est traversée par plusieurs corridors autoroutiers européens. La construction du corridor qui doit relier l'Europe de l'ouest à la Mer-Noire est prioritaire et comprend un tronçon entre Orastie et Sibiu au nord des Carpates du Sud. Dans cette région, l'autoroute neuve est portée par de nombreux ouvrages d'art.

À l'exception d'un viaduc de 240 m de longueur, il a été décidé que tous les ouvrages seraient des ponts intégraux. L'objectif est d'optimiser les coûts de maintenance sur 120 ans. La construction des ouvrages de franchissement n'est pas gênée par la circulation existante. Pourtant, en ce qui concerne les passages supérieurs de plus de 38 m de longueur, une étude a montré l'intérêt économique des portiques en ossature mixte acier-béton à poutres préco permettant d'éviter la construction d'une pile intermédiaire, même au-dessus d'une autoroute en construction.

Ce type de portique comporte quatre poutres mixtes préfabriquées posées à la grue. Les poutres sont ensuite solidarisées par une seconde strate de dalle selon le même principe que la figure 25 du projet en construction à Nouméa et en bénéficiant des mêmes avantages que ceux déjà décrits en 6.3 (figures 29 et 30).

La conception a été assurée par Schmitt et associés en Roumanie (SSF-RO). Pour une ouverture de 39 m, le pont de la photo 30 a une hauteur totale de poutre qui varie entre 1,95 m à l'encastrement et 1,65 m à la clef. Le biais est de 78 grades. Plus de détails sont disponibles en [13].

La principale originalité de ces ouvrages est d'utiliser de façon optimale le connecteur CL (fig. 20) conçu par le Sétra dans le cadre du projet européen Précobeam. Dans la partie centrale du pont, où le béton est comprimé, la membrure supérieure est complètement supprimée et l'âme métallique de la poutre est directement connectée par la découpe CL à la prédalle longitudinale.

En revanche, la membrure supérieure est rétablie par l'intermédiaire d'un long gousset triangulaire dans la zone où le béton travaille en traction. Dans ces zones, la connexion est assurée par deux bandes de découpes CL soudées au-dessus de la membrure supérieure.

Une attention particulière doit être accordée aux extrémités de la bande CL pour ne pas dégrader la classe de fatigue que le connecteur CL offre en zone courante.

8. CONCLUSION

Les ponts en portiques nécessitent des études géotechniques préalables de qualité. Les études d'exécution sont aussi plus complexes et les innovations ne concernent pas seulement la charpente métallique mais aussi la mise en œuvre des structures en béton armé. Grâce à la préfabrication, ces ouvrages constituent en revanche des solutions économiques à la construction quand des grues sont facilement disponibles pour le montage. La prise en compte de la réduction des coûts d'entretien et des risques, des coûts indirects à réduits pour les usagers les rend encore plus attractifs pour le franchissement de routes en circulation.

Les successions de portiques sont aussi adaptées pour des viaducs comme le pont d'Hakesbury ou pour des transports rapides légers, du type de la voie porteuse de l'aérotrain à Orléans, quand le trafic attendu ne justifie pas les investissements lourds d'une ligne TGV.

Pour le franchissement de routes en circulation, les arcs autoancrés constituent aussi une excellente solution. L'arc de Ko Wé Kara mis en place avec sa dalle a fait la démonstration de la compétitivité de cette solution, rendue possible par la capacité des entreprises de charpente métallique et de montage à innover. Ils pourraient du reste être intégrés à leurs appuis et ces encastremets permettront probablement pour des projets à venir d'accroître encore l'élancement possible des tabliers tout en faisant bénéficier ces arcs des frais réduits de maintenance des ponts en portiques.



Figure 29 : Charpentes métalliques et encastremets



Figure 30 : Aspect d'un des ouvrages terminé

(Photos V. Schmitt)

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les Bulletins Ouvrages d'art du Sétra sont disponibles sur Internet. Au premier janvier 2014, le Sétra fusionne avec d'autres organismes techniques pour donner naissance au Céréma.

- [1] Berthelley, J. : "Projet de reconstruction du Pont de Saint-Gilles sur le Petit Rhône." Bulletin OUVRAGES D'ART du Sétra numéro 25 - novembre 1996.
- [2] Berthelley, J. : "*Rebuilding the Saint Gilles bridge over the river Rhône*". ARCH' 2001 (Paris, septembre 2001).
- [3] Berthelley, J. : "Techniques des arcs autoancrés : réglage des suspentes sur chantier, cas du pont de Montigny les Cormeille " Bulletin OUVRAGES D'ART du Sétra numéro 51 - mars 2006.
- [4] Casper, J. : "Elbe-tied arch bridge at Wittenberg" ARCH' 2001 (Paris, septembre 2001).
- [5] Berthelley, J. : "Le franchissement du Roboul dans les Pyrénées orientales, Intérêt des ponts en arcs métalliques de petite portée" Bulletin OUVRAGES D'ART du Sétra numéro 52 – juillet 2006.
- [6] Berthelley, J., Panabière, M., Arredondo-Ormozabal, P., Derais, J.F. : "*Roboul tied arch bridge*". Munich, Germany 29.8. – 1. 9. 2005 (6th - Japanese-German Bridge Symposium).
- [7] Cros, O., Berthelley, J. : "Renforcement et remise en peinture des ponts du Dancourt" Annales du BTP 2013.
- [8] Fried, A. : "Nouveau type de pont à travées continues et à structure composite acier-béton" Bulletin du "New South Wales. Department of Main Roads" à Sydney et Revue Acier-Stahl-Steel n°11 de 1974.
- [9] Berthelley J., Lorenc, W., Seidl, G. et all. : "Présentation du projet de recherche européen Precobeam de connexion par découpe d'une tôle" Revue CONSTRUCTION MÉTALLIQUE du CTICM (Centre Technique de la Construction Métallique) septembre 2009.
- [10] Berthelley, J., Lorenc, W., Mensinger, M., Rauscher S., Seidl, G. : "*Zum Tragverhalten von Verbunddübeln – Teil 1 Tragverhalten unter statischer Belastung* (Capacité portante sous charge statique de la connexion CL) Revue STAHLBAU n°3 / mars 2011.
- [11] Berthelley J., Lorenc W., Mensinger M., Ndogmo J., Seidl, G. : "*Zum Tragverhalten von Verbunddübeln – Teil 2 : Ermüdungsverhalten*" (Comportement en fatigue de la connexion CL) Revue STAHLBAU n°4 / avril 2011.
- [12] Zanon R., Berthelley J., Martin P.O., Seidl G. : "Solution innovante pour ponts de petites et moyennes portées : Poutre Précobeam avec connexion par découpe" Annales du BTP 2013.
- [13] Seidl G., Stambuck M., Lorenc W., Kolakowski T, Petzek E. : "*Wirtschaftliche Verbundbauweisen im Brückenbau, Bauweisen mit Verbunddübeln*" (Solutions économiques pour les ponts mixtes, utilisation de la connexion par découpe) Revue STAHLBAU n°7 / juillet 2013.