CABINET MERLIN

NOTE DE CONCEPTION

Franchissement du pont Giordano Bruno par le réseau de chaleur urbain (RCU)

Vérification du principe de supportage métallique en encorbellement

Maître d'ouvrage :	Toulouse Métropole
Projet :	Réseau de chaleur urbain Campus Rangueil
Mission :	Maîtrise d'œuvre – Phase DCE
Objet :	Vérification du principe de supportage
Date :	3 juillet 2026
Indice :	A



Table des matières

1 Objet de la note **3**

2 Documents de référence **3**
2.1 Documents du projet . . . 3
2.2 Documents relatifs à l'ouvrage existant . . . 3
2.3 Références normatives . . . 4

3 Limites de la mission et réserves **4**

4 Description de l'ouvrage existant **5**
4.1 Présentation générale . . . 5
4.2 Principe structurel . . . 6
4.3 État général de l'ouvrage . . . 6
4.4 Contraintes pour le projet . . . 6

5 Description du projet **7**
5.1 Contexte de l'opération . . . 7
5.2 Principe général retenu . . . 7
5.3 Solution alternative étudiée . . . 7
5.4 Contraintes de conception . . . 8
5.5 Dispositions constructives retenues . . . 8
5.6 Maintien de la maintenabilité de l'ouvrage . . . 8
5.7 Intégration à l'ouvrage . . . 8

6 Hypothèses de la note **9**
6.1 Hypothèses normatives . . . 9
6.2 Hypothèses géométriques . . . 9
6.3 Hypothèses de chargement . . . 9
6.3.1 Charges permanentes . . . 9
6.3.2 Charges variables . . . 9
6.4 Hypothèses de durabilité . . . 11

7 Détermination des efforts dans le supportage **11**
7.1 Descente de charges . . . 11
7.2 Répartition des efforts . . . 12
7.3 Efforts horizontaux . . . 12
7.4 Efforts à reprendre par les ancrages . . . 12

8 Vérification de l'incidence des charges sur l'ouvrage existant **13**
8.1 Charge verticale ajoutée . . . 13
8.2 Ordre de grandeur ramené à la surface du tablier . . . 13
8.3 Comparaison avec les charges routières . . . 13
8.4 Incidence locale au droit des ancrages . . . 14
8.5 Conclusion partielle . . . 14

9 Conception et justification du supportage métallique **15**
9.1 Principe structural retenu . . . 15
9.2 Modèle de calcul . . . 15

10 Prédimensionnement du supportage métallique **16**
10.1 Principe structural retenu 16
10.2 Sections retenues au stade du prédimensionnement 17
10.3 Combinaisons de calcul retenues 17
10.4 Caractéristiques des profilés retenus 18
10.5 Vérification de la traverse basse 18
10.6 Vérification des montants 19
10.7 Conclusion sur les profilés 19
10.8 Stabilité hors plan 20
10.9 Conclusion partielle 20

11 Principe de fixation sous le tablier **21**
11.1 Principe retenu 21
11.2 Proposition de principe pour les platines 21

12 Compatibilité des ancrages avec l'ouvrage existant **22**
12.1 Hypothèses de vérification 22
12.2 Efforts retenus 22
12.3 Résultats de la vérification 23
12.4 Limites de l'étude 23

13 Conclusions et réserves **24**
13.1 Conclusion générale 24
13.2 Réserves 25

1 Objet de la note

La présente note de calcul est établie dans le cadre de la mission de maîtrise d'œuvre relative à la mise en place de deux nouvelles canalisations de réseau de chaleur (RCU) sous le pont Giordano Bruno, situé avenue du Colonel Roche à Toulouse.

Cette étude répond à la demande formulée par Toulouse Métropole, gestionnaire de l'ouvrage, visant à justifier la compatibilité du projet avec la structure existante avant réalisation des travaux.

Les objectifs de la présente note sont les suivants :

— évaluer le surplus de charges induit par la mise en place des nouvelles canalisations, en tenant compte des tubes, du fluide transporté, du calorifugeage et du système de supportage ;

— apprécier l'incidence de ces charges supplémentaires sur l'ouvrage existant au regard de son fonctionnement structurel ;

— définir un principe de supportage métallique compatible avec les contraintes géométriques de l'ouvrage et les exigences d'exploitation ;

— réaliser le prédimensionnement du supportage métallique conformément aux Eurocodes en vigueur ;

— déterminer les efforts transmis à l'ouvrage existant par les dispositifs d'ancrage ;

— analyser les différentes possibilités d'ancrage sur l'ouvrage existant et formuler un avis technique sur leur faisabilité, notamment vis-à-vis des poutres précontraintes constituant la structure porteuse du pont ;

— définir les prescriptions techniques qui devront être prises en compte lors des études d'exécution de l'entreprise.

La présente étude constitue une note de conception réalisée au stade du DCE. Elle a vocation à définir un principe de conception et à vérifier sa cohérence structurelle. Elle ne constitue pas une note d'exécution et ne dispense pas l'entreprise titulaire de réaliser les études détaillées nécessaires à la définition définitive des dispositifs d'ancrage et de supportage.

2 Documents de référence

La présente étude est établie sur la base des documents disponibles au stade de la conception.

2.1 Documents du projet

— Plans de situation du projet de réseau de chaleur ;

— Schémas de principe de la traversée du pont Giordano Bruno ;

— Documents de conception transmis par le Cabinet ARRAGON ;

— Dossier relatif au remplacement du calorifuge et au supportage du réseau existant.

2.2 Documents relatifs à l'ouvrage existant

— Rapport d'inspection détaillée de l'ouvrage d'art OA TOUL-077 – Pont Giordano Bruno (août 2015) ;

— Plans généraux disponibles de l'ouvrage ;

— Documents de visite et de reconnaissance transmis par Toulouse Métropole.

2.3 Références normatives

Les vérifications sont conduites conformément aux textes réglementaires et normatifs suivants :

— NF EN 1990 : Eurocode – Bases de calcul des structures ;
— NF EN 1991 : Eurocode 1 – Actions sur les structures ;
— NF EN 1992-1-1 : Eurocode 2 – Calcul des structures en béton ;
— NF EN 1992-4 : Conception des fixations destinées au béton ;
— NF EN 1993-1-1 : Eurocode 3 – Calcul des structures en acier ;
— NF EN 1993-1-8 : Assemblages des structures en acier ;
— Recommandations ETA/EAD applicables aux systèmes de fixation sur béton.

3 Limites de la mission et réserves

La présente note est réalisée dans le cadre de la mission de maîtrise d'œuvre au stade de la conception (DCE). Elle a pour objet de vérifier la faisabilité du principe de supportage envisagé, d'en assurer le prédimensionnement et d'évaluer son incidence sur l'ouvrage existant.

Les vérifications présentées dans ce document sont établies sur la base des informations disponibles à la date de rédaction de la présente étude. Elles ne constituent pas une étude d'exécution et ne sauraient valoir validation définitive des dispositifs d'ancrage sur l'ouvrage.

À ce stade de l'opération, les documents suivants ne sont pas disponibles :

— les plans d'exécution de l'ouvrage (coffrage, ferraillage et précontrainte) ;
— les notes de calcul d'origine de l'ouvrage ;
— le repérage des armatures passives et des câbles de précontrainte ;
— un diagnostic structurel localisé au droit des futures zones d'ancrage.

En conséquence, la présente note porte exclusivement sur :

— l'évaluation des charges apportées par les nouvelles canalisations et leur supportage ;
— la vérification de l'incidence globale de ces charges sur l'ouvrage existant ;
— le prédimensionnement du supportage métallique ;
— la détermination des efforts transmis aux ancrages ;
— l'analyse de principe des solutions d'ancrage envisageables.

Réserve MOE R1 – Validation des ancrages

En l'absence des plans d'exécution de l'ouvrage et d'une reconnaissance structurelle préalable, les emplacements des ancrages présentés dans la présente note sont donnés à titre de principe et ne constituent pas une implantation définitive.
Avant toute intervention, l'entreprise devra réaliser les investigations nécessaires (repérage des armatures, détection des éventuels câbles de précontrainte, contrôle de l'état du béton support et reconnaissance des fixations existantes) afin de valider les zones de percement et, le cas échéant, adapter l'implantation des supports.

Les études d'exécution devront notamment :

— confirmer la compatibilité des zones d'ancrage avec la structure existante ;
— vérifier le respect des distances minimales aux bords, entre ancrages et vis-à-vis des fixations existantes conformément aux prescriptions du système de fixation retenu ;

— justifier les ancrages conformément à la norme NF EN 1992-4 et aux Avis Techniques (ETA/EAD) applicables ;

— établir les plans d'exécution définitifs du supportage et des ancrages.

Une attention particulière devra être portée aux poutres précontraintes constituant la structure porteuse de l'ouvrage. En l'absence d'informations précises sur le tracé des câbles de précontrainte, aucun percement dans ces éléments ne pourra être retenu sans reconnaissance préalable démontrant l'absence d'interférence avec les fuseaux de précontrainte.

Les conclusions de la présente note demeurent donc conditionnées à la validation des dispositions définitives lors des études d'exécution.

4 Description de l'ouvrage existant

4.1 Présentation générale

Le projet concerne le franchissement du Canal du Midi par le pont Giordano Bruno, situé avenue du Colonel Roche à Toulouse.

D'après le rapport d'inspection détaillée de l'ouvrage d'art OA TOUL-077, le pont présente les caractéristiques principales suivantes :

— type de structure : pont à poutres précontraintes de type VIPP (Viaduc à travée Indépendante à Poutres Précontraintes) ;

— année de construction : 1968 ;

— nombre de travées : 1 ;

— portée : 23,50 m ;

— longueur totale de l'ouvrage : 39,25 m ;

— largeur entre garde-corps : 15,84 m ;

— largeur des trottoirs :

  — 1,58 m côté amont ;

  — 4,26 m côté aval.

Le tablier est constitué de neuf poutres longitudinales précontraintes supportant un hourdis en béton armé. Plusieurs réseaux concessionnaires sont déjà implantés sous l'ouvrage, notamment deux canalisations de réseau de chaleur situées entre les poutres de rive et les garde-corps.

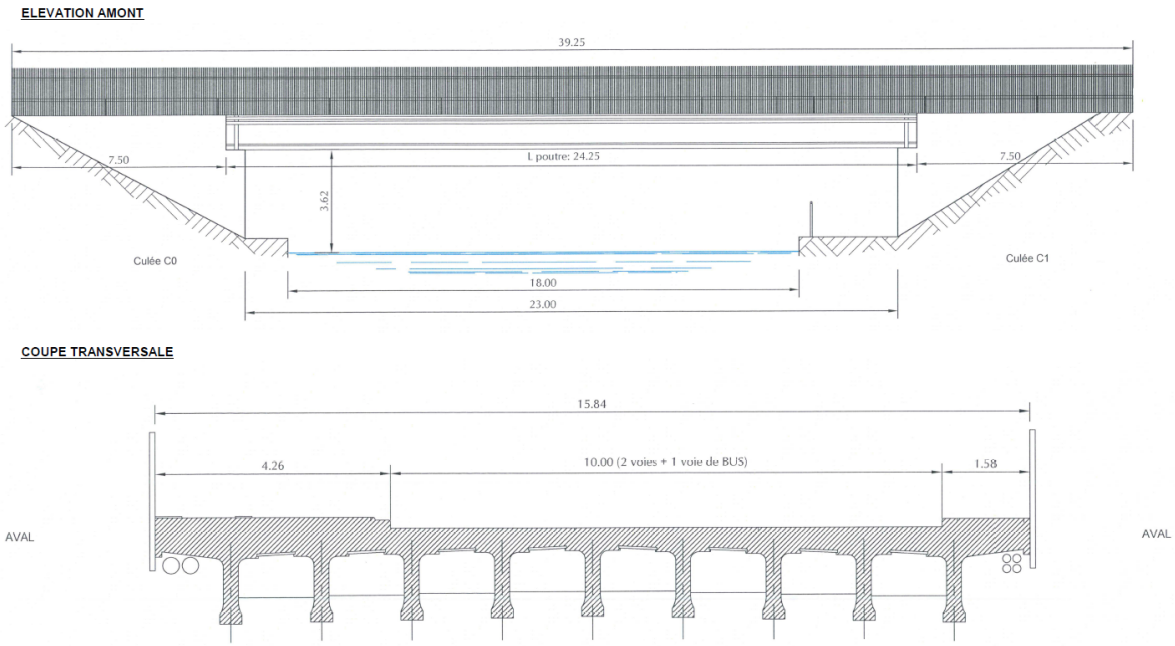


FIGURE 1 – Coupes Pont

4.2 Principe structurel

Le projet de traversée concerne la partie aval de l'ouvrage, dans une zone déjà occupée par plusieurs réseaux concessionnaires.

Le principe retenu consiste à rapporter un système de supportage métallique destiné à reprendre deux nouvelles canalisations de réseau de chaleur sans modification du fonctionnement structurel de l'ouvrage.

Les charges apportées par ce supportage seront transmises à la structure existante par l'intermédiaire de dispositifs d'ancrage dont le principe sera étudié dans les chapitres suivants.

4.3 État général de l'ouvrage

Le rapport d'inspection détaillée met en évidence un état général nécessitant une vigilance particulière, notamment en raison de la présence de désordres localisés affectant certains éléments du tablier.

Les principales observations concernent notamment :

— des éclats de béton avec aciers apparents sur plusieurs poutres ;

— des coulures et traces d'infiltration localisées ;

— des dégradations ponctuelles des entretoises et des encorbellements ;

— des désordres localisés au droit de certaines zones d'about.

Par ailleurs, Toulouse Métropole indique que l'ouvrage fera prochainement l'objet d'investigations complémentaires susceptibles de conduire à des travaux de réparation ou de renforcement.

En conséquence, le principe de supportage retenu devra limiter son impact sur l'ouvrage existant, rester compatible avec d'éventuelles interventions ultérieures de maintenance et permettre, autant que possible, le démontage des équipements rapportés.

4.4 Contraintes pour le projet

Les principales contraintes identifiées à ce stade de la conception sont les suivantes :

— maintien en exploitation des réseaux existants pendant les travaux ;
— coexistence avec les dispositifs de supportage déjà en place ;
— limitation des percements dans la structure existante ;
— préservation des éléments précontraints de l'ouvrage ;
— maintien de l'accessibilité pour les opérations futures d'inspection, d'entretien et de réparation.

5 Description du projet

5.1 Contexte de l'opération

Le projet s'inscrit dans le cadre de la réfection de la branche « AERO » du réseau de chaleur du Campus Universitaire Toulouse-Rangueil. Cette opération vise à améliorer les performances du réseau tout en garantissant la continuité de service des établissements alimentés pendant les différentes phases de travaux.

Au droit du pont Giordano Bruno, le projet prévoit la création d'une nouvelle traversée aérienne destinée à accueillir deux nouvelles canalisations de réseau de chaleur. Ces nouvelles canalisations viennent en complément des canalisations existantes, lesquelles sont conservées en exploitation à ce stade.

Une des canalisations existantes est située au-dessus de la zone d'implantation des nouvelles canalisations projetées. Cette configuration constitue une contrainte d'encombrement à prendre en compte dans la définition du supportage métallique.

La longueur de franchissement est de l'ordre de 40 m.

5.2 Principe général retenu

Le principe retenu consiste à suspendre les deux nouvelles canalisations sous le tablier de l'ouvrage au moyen d'une structure métallique indépendante.

Cette structure assure exclusivement la reprise des charges des nouvelles canalisations et de leurs équipements associés, sans solliciter les dispositifs de supportage existants.

Le supportage est constitué d'une succession de portiques métalliques répartis régulièrement sur la longueur de la traversée. Chaque portique reprend les deux conduites au moyen de selles ou de colliers adaptés aux déplacements thermiques des canalisations.

Les assemblages seront réalisés par platines boulonnées afin de conserver un caractère démontable de l'installation et de faciliter les opérations futures de maintenance de l'ouvrage.

5.3 Solution alternative étudiée

Une solution alternative consistant à fixer le supportage latéralement sur les poutres principales de l'ouvrage a également été examinée.

Cette disposition pourrait permettre de s'affranchir localement de certaines contraintes d'encombrement ou de la présence de fixations existantes sous le tablier.

Toutefois, les poutres de l'ouvrage étant précontraintes, cette solution nécessite une vigilance particulière. En l'absence des plans d'exécution, du tracé des câbles de précontrainte et d'un diagnostic local de la structure, il n'est pas possible de valider au stade de la présente étude la réalisation de percements dans les poutres.

En conséquence, la présente note retient comme solution préférentielle une fixation en sous-face du tablier/hourdis. La fixation latérale sur poutre constitue une solution de recours, qui devra faire l'objet d'une étude spécifique et d'une validation après reconnaissance de la structure existante.

5.4 Contraintes de conception

La conception du supportage doit répondre simultanément aux exigences suivantes :

— assurer la reprise des charges permanentes et des actions d'exploitation des deux nouvelles canalisations ;

— limiter les efforts transmis à la structure existante ;

— préserver l'intégrité des éléments porteurs, notamment des poutres précontraintes ;

— permettre les déplacements liés aux variations de température des canalisations ;

— maintenir la possibilité d'inspection, d'entretien et de réparation ultérieure du pont ;

— permettre le montage des équipements sans interaction avec les réseaux existants.

5.5 Dispositions constructives retenues

Au stade de la conception, les hypothèses suivantes sont retenues pour le prédimensionnement du supportage :

— portiques métalliques disposés à entraxe régulier ;

— structure en acier galvanisé ;

— fixation par platines mécaniques démontables ;

— implantation en quinconce des nouveaux ancrages par rapport aux fixations existantes lorsque cela est possible ;

— utilisation de supports autorisant les déplacements longitudinaux des canalisations conformément aux prescriptions du lot Process.

L'implantation définitive des supports et des ancrages sera adaptée lors des études d'exécution en fonction des résultats des investigations réalisées sur l'ouvrage.

5.6 Maintien de la maintenabilité de l'ouvrage

Le supportage retenu a été conçu afin de préserver les possibilités futures d'inspection, d'entretien et de réparation du pont.

À cet effet, la structure métallique est constituée d'éléments boulonnés et démontables, indépendants des réseaux existants et ne participant pas au fonctionnement structurel de l'ouvrage.

En cas d'intervention ultérieure sur le tablier, les poutres ou les encorbellements, le supportage pourra être déposé de manière sélective afin de libérer les zones de travaux, puis remonté après réalisation des réparations.

Cette conception limite ainsi les incidences des futures opérations de maintenance de l'ouvrage tout en assurant la pérennité de l'exploitation du réseau de chaleur.

5.7 Intégration à l'ouvrage

Le projet pourra comprendre la mise en place d'un capotage métallique destiné à améliorer l'intégration visuelle des nouvelles canalisations sous le pont.

En l'absence de définition détaillée au stade de la présente étude, ce capotage est pris en compte sous forme d'hypothèses conservatrices pour l'évaluation des charges permanentes et des actions du vent. Son dimensionnement définitif sera réalisé lors des études d'exécution lorsque sa géométrie, son poids propre et son taux de perforation seront connus.

6 Hypothèses de la note

6.1 Hypothèses normatives

Les vérifications sont réalisées conformément aux référentiels normatifs présentés au chapitre 2.

6.2 Hypothèses géométriques

Le supportage étudié concerne la traversée du pont Giordano Bruno par deux nouvelles canalisations du réseau de chaleur urbain.

Les hypothèses géométriques retenues sont récapitulées dans le tableau suivant.

TABLE 1 – Hypothèses géométriques

Paramètre	**Valeur**	**Unité**
Nombre de canalisations	2	–
Diamètre nominal	DN200	–
Diamètre extérieur acier	219,1	mm
Diamètre extérieur calorifugé	355	mm
Longueur de traversée	40	m
Entraxe de principe des portiques	2,00	m
Nombre estimatif de portiques	21	–

Le principe de supportage retenu est constitué de portiques métalliques indépendants régulièrement répartis sous le tablier.

6.3 Hypothèses de chargement

6.3.1 Charges permanentes

Les charges permanentes retenues pour le dimensionnement du supportage sont présentées dans le tableau 2.

TABLE 2 – Charges permanentes caractéristiques

Élément	**Charge**	**Unité**
Deux tubes acier DN200	66	kg/ml
Calorifuge Rockwool	12	kg/ml
Supportage métallique (hyp.)	35	kg/ml
Colliers, platines et accessoires	12	kg/ml
Capotage métallique perforé (hyp.)	25	kg/ml
Total	**150**	**kg/ml**

La charge permanente linéique caractéristique retenue est donc :

$$G_k = 1,47\ kN/ml$$

6.3.2 Charges variables

Les charges variables prises en compte pour le dimensionnement sont :

— le poids de l'eau contenue dans les deux canalisations ;

— l'action du vent sur les conduites et le capotage éventuel ;

— les effets liés à la dilatation thermique des canalisations.

Poids de l'eau Le poids de l'eau est calculé à partir du diamètre intérieur des canalisations.

Pour un tube DN200 de diamètre extérieur $D_e = 219,1\ mm$ et d'épaisseur retenue $e = 6,3\ mm$:

$$D_i = D_e - 2e = 219,1 - 2 \times 6,3 = 206,5\ mm$$

Soit :

$$D_i = 0,2065\ m$$

La masse linéique d'eau contenue dans une canalisation est :

$$m_{eau,1} = \rho_{eau} \times \frac{\pi D_i^2}{4}$$

Avec :

$$\rho_{eau} = 1000\ kg/m^3$$

$$m_{eau,1} = 1000 \times \frac{\pi \times 0,2065^2}{4} = 33,5\ kg/ml$$

Pour deux canalisations :

$$m_{eau,2} = 2 \times 33,5 = 67,0\ kg/ml$$

La charge linéique correspondante est donc :

$$Q_{eau} = 67,0 \times 9,81 \times 10^{-3} = 0,66\ kN/ml$$

Action du vent L'action du vent est prise en compte sur la face exposée du supportage, principalement côté corniche. En présence d'un capotage perforé, celui-ci est susceptible de constituer l'élément dimensionnant vis-à-vis de la prise au vent.

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

— zone de vent : zone 2 ;

— catégorie de terrain : IV ;

— pression dynamique de pointe retenue à titre conservatif : $q_p = 0,50\ kN/m^2$;

— coefficient de force retenu : $c_f = 1,20$;

— coefficient de réduction lié à la perforation : non retenu à ce stade.

La pression caractéristique appliquée au capotage est donc :

$$w_k = q_p \times c_f$$

$$w_k = 0,50 \times 1,20 = 0,60\ kN/m^2$$

En première approche, la hauteur exposée est prise égale à l'encombrement vertical disponible dans la zone de supportage, soit :

$$h = 1,13\ m$$

La charge horizontale linéique due au vent est alors :

$$Q_{vent} = w_k \times h$$

$$Q_{vent} = 0,60 \times 1,13 = 0,68\ kN/ml$$

Pour un entraxe de portiques de $2,00\ m$, l'effort horizontal caractéristique transmis à un portique est :

$$F_{vent,portique} = 0,68 \times 2,00 = 1,36\ kN$$

Cette valeur est retenue pour la vérification transversale du supportage métallique et pour l'estimation des efforts horizontaux transmis aux ancrages.

Effets thermiques Les effets liés aux variations de température des canalisations ne font pas l'objet d'un calcul de flexibilité spécifique dans la présente note.

Le principe de supportage devra permettre les déplacements longitudinaux des canalisations, par l'intermédiaire de supports adaptés de type libre, guidé, à ressorts ou dispositifs équivalents, conformément aux prescriptions du lot Process et aux études d'exécution de l'entreprise.

Dans la présente note, les vérifications structurelles portent sur la reprise des charges verticales, des actions horizontales de vent et des efforts locaux transmis aux portiques et aux fixations. Les efforts thermiques spécifiques éventuellement transmis à la structure devront être précisés et justifiés par l'entreprise dans le cadre de sa note de flexibilité et de ses études d'exécution.

6.4 Hypothèses de durabilité

Les éléments métalliques du supportage seront réalisés en acier galvanisé à chaud ou bénéficieront d'une protection anticorrosion équivalente.

Le supportage sera conçu de manière démontable afin de permettre les futures opérations d'inspection, d'entretien et de réparation de l'ouvrage.

Les dispositifs d'ancrage seront implantés après reconnaissance de la structure existante conformément aux prescriptions du chapitre 3.

7 Détermination des efforts dans le supportage

Le supportage est constitué d'une succession de portiques métalliques régulièrement répartis sous le tablier.

Pour la présente étude, un entraxe de principe de 2,00 m est retenu.

Les charges sont supposées uniformément réparties entre deux portiques successifs.

7.1 Descente de charges

La charge verticale totale retenue est :

$$q = G_k + Q_{eau}$$

$$q = 1,47 + 0,66 = 2,13\ kN/ml$$

Chaque portique reprend donc une longueur d'influence égale à son entraxe :

$$L_i = 2,00\ m$$

La réaction verticale caractéristique transmise à un portique vaut alors :

$$R_k = q \times L_i$$

$$R_k = 2,13 \times 2,00 = 4,26\ kN$$

7.2 Répartition des efforts

Le portique est constitué de deux potelets verticaux reliés par une traverse supportant les deux canalisations.

Compte tenu de la symétrie du chargement, les efforts verticaux sont supposés répartis uniformément entre les deux potelets.

La réaction verticale caractéristique dans chaque potelet est donc :

$$N_k = \frac{R_k}{2}$$

$$N_k = 2,13\ kN$$

Les réactions verticales transmises à chaque platine d'ancrage sont donc également de l'ordre de :

$$R_{platine} = 2,13\ kN$$

Ces valeurs seront utilisées pour le dimensionnement des platines et des dispositifs d'ancrage.

7.3 Efforts horizontaux

L'action du vent déterminée au chapitre précédent conduit à une charge horizontale linéique :

$$q_{vent} = 0,68\ kN/ml$$

La résultante reprise par un portique est donc :

$$H_k = 0,68 \times 2,00$$

$$H_k = 1,36\ kN$$

En première approche, cette action est supposée uniformément répartie entre les deux potelets.

Chaque montant reprend donc un effort horizontal caractéristique de :

$$H_{montant} = 0,68\ kN$$

7.4 Efforts à reprendre par les ancrages

Chaque dispositif d'ancrage devra être dimensionné pour reprendre les efforts issus de la combinaison des actions verticales et horizontales.

Les valeurs caractéristiques retenues pour le dimensionnement sont récapitulées dans le tableau suivant.

Table 3 – Efforts caractéristiques par platine

Effort normal vertical	2,13 kN
Effort horizontal (vent)	0,68 kN

8 Vérification de l'incidence des charges sur l'ouvrage existant

8.1 Charge verticale ajoutée

La charge verticale caractéristique totale retenue en exploitation est issue du chapitre 6 :
[$q_{tot,k} = G_k + Q_{eau,k}$]
[$q_{tot,k} = 1,47 + 0,66 = 2,13\ kN/ml$]
Sur la longueur de traversée du pont, soit environ 40 m, la charge verticale totale ajoutée vaut :
[$F_{tot,k} = q_{tot,k} \times L$]
[$F_{tot,k} = 2,13 \times 40 = 85,2\ kN$]
Soit environ :
[$F_{tot,k} \simeq 8,7\ t$]
Cette charge correspond à l'ensemble formé par :

- les deux canalisations acier ;
- le calorifuge ;
- le supportage métallique ;
- les accessoires ;
- le capotage éventuel ;
- l'eau contenue dans les canalisations.

8.2 Ordre de grandeur ramené à la surface du tablier

À titre d'ordre de grandeur, la charge verticale ajoutée peut être ramenée fictivement à la largeur utile entre garde-corps de l'ouvrage.
La largeur utile entre garde-corps est prise égale à :
[B = 15,84 m]
La charge surfacique équivalente est donc :
[$p_{eq,k} = \frac{q_{tot,k}}{B}$]
[$p_{eq,k} = \frac{2,13}{15,84} = 0,13\ kN/m^2$]
Soit environ :
[$p_{eq,k} \simeq 13\ kg/m^2$]
Cette valeur est très faible au regard des charges d'exploitation routières usuellement prises en compte pour le dimensionnement des ponts.

8.3 Comparaison avec les charges routières

Afin d'apprécier l'ordre de grandeur de la charge rapportée par le projet, celle-ci est comparée aux charges d'exploitation routières du modèle LM1 de l'Eurocode 1.

La charge verticale caractéristique ajoutée par les nouvelles canalisations, leur supportage et l'eau en exploitation est :

$$q_{tot,k} = 2,13 \text{ kN/ml}$$

En la ramenant fictivement à la largeur utile entre garde-corps de l'ouvrage, soit $B = 15,84$ m, on obtient :

$$p_{eq,k} = \frac{q_{tot,k}}{B} = \frac{2,13}{15,84} = 0,13 \text{ kN/m}^2$$

À titre de comparaison, la charge uniformément répartie du modèle LM1 vaut $9,0$ kN/m^2 sur la voie conventionnelle principale. Le rapport correspondant est donc :

$$\frac{p_{eq,k}}{q_{LM1}} = \frac{0,13}{9,0} = 1,5\ \%$$

Même en comparaison avec une charge répartie plus faible, prise à titre indicatif égale à $2,5$ kN/m^2 pour une zone secondaire ou résiduelle, le rapport reste limité à :

$$\frac{0,13}{2,5} = 5,2\ \%$$

Appréciation de l'incidence globale

La surcharge apportée par le projet représente environ **1,5 %** de la charge uniformément répartie LM1 appliquée sur la voie conventionnelle principale, et reste inférieure à **6 %** même par comparaison avec une charge répartie secondaire de référence.
L'incidence globale des nouvelles canalisations et de leur supportage sur le fonctionnement général du tablier est donc considérée comme faible.

Cette conclusion porte uniquement sur l'incidence globale des charges rapportées. Elle ne préjuge pas de la capacité locale du béton support au droit des ancrages, qui devra être vérifiée spécifiquement.

8.4 Incidence locale au droit des ancrages

La conclusion précédente ne préjuge pas de la capacité locale du béton au droit des ancrages.
La vérification globale de la charge ajoutée doit donc être distinguée de la vérification locale des fixations.
Les efforts transmis localement par chaque portique sont rappelés ci-après :
[$R_{portique,k} = 4,26\ kN$]
[$R_{platine,k} \simeq 2,13\ kN$]
[$H_{platine,k} \simeq 0,68\ kN$]
Ces efforts restent modérés. Toutefois, leur reprise effective dépendra :

- de l'état réel du béton support ;
- de l'épaisseur disponible ;
- du ferraillage local ;
- de la présence éventuelle de dispositifs de précontrainte ;
- des distances aux bords et aux ancrages existants ;
- du type de chevilles retenu.

Ces points font l'objet des prescriptions spécifiques du chapitre 11.

Réserve MOE R2 – Vérification locale des ancrages

La faible incidence globale des charges rapportées sur l'ouvrage ne vaut pas validation des ancrages.
La capacité locale du béton support, les distances aux bords, l'implantation par rapport aux armatures et l'absence d'interférence avec les câbles de précontrainte devront être vérifiées avant toute exécution.

8.5 Conclusion partielle

Au stade de la conception, les charges rapportées par les nouvelles canalisations et leur supportage ne sont pas de nature à modifier significativement le fonctionnement global de l'ouvrage.
La faisabilité du projet est donc jugée favorable vis-à-vis de l'incidence globale des charges, sous réserve de la validation locale des dispositifs d'ancrage lors des études d'exécution.

9 Conception et justification du supportage métallique

9.1 Principe structural retenu

Le supportage des nouvelles canalisations est assuré par une succession de portiques métalliques implantés régulièrement sous le tablier de l'ouvrage.

Chaque portique est constitué :

— d'une traverse supportant les deux canalisations ;

— de deux montants verticaux ;

— de deux platines d'ancrage fixées sur l'ouvrage existant.

L'entraxe de principe retenu entre portiques est de 2,00 m.

9.2 Modèle de calcul

Le portique est modélisé comme une structure plane.
Les charges verticales sont supposées uniformément réparties sur la traverse.
Les actions horizontales du vent sont appliquées sur la face exposée du supportage.
Les réactions sont reprises par les deux potelets puis transmises aux platines d'ancrage.

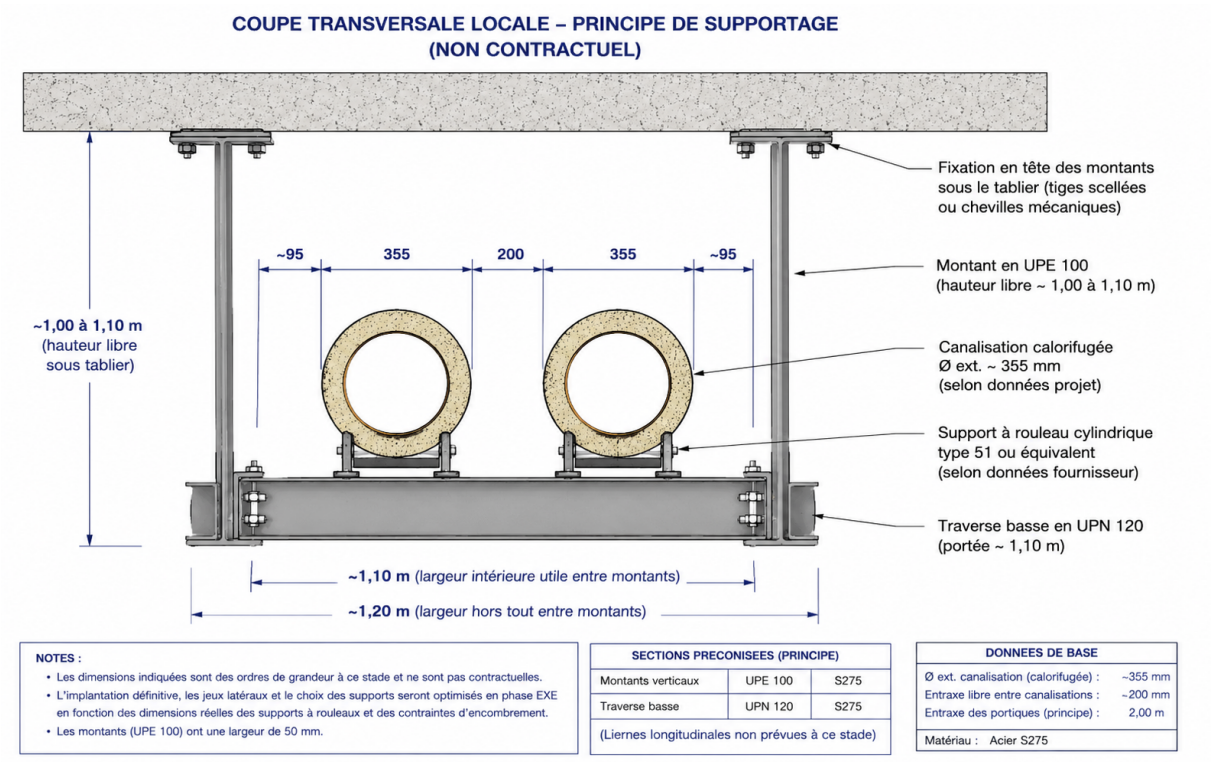


FIGURE 2 – Illustration supportage

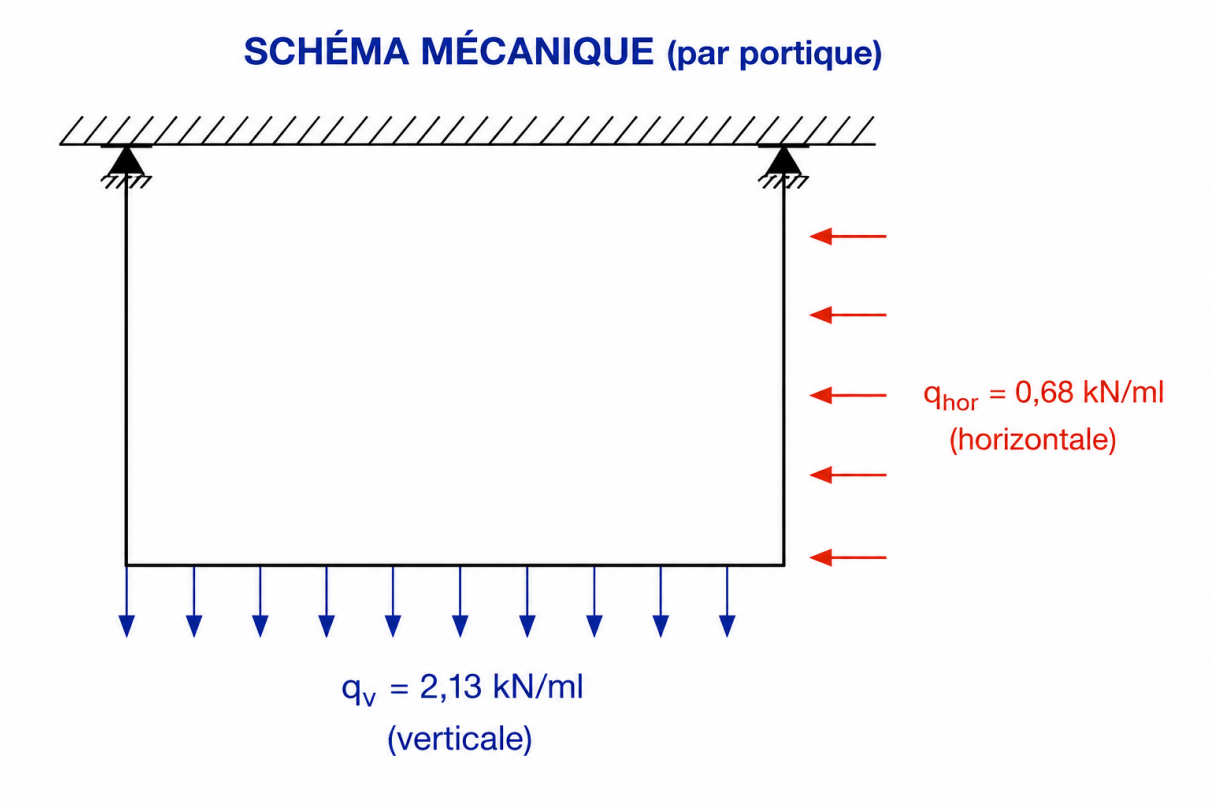


FIGURE 3 – Schéma mécanique

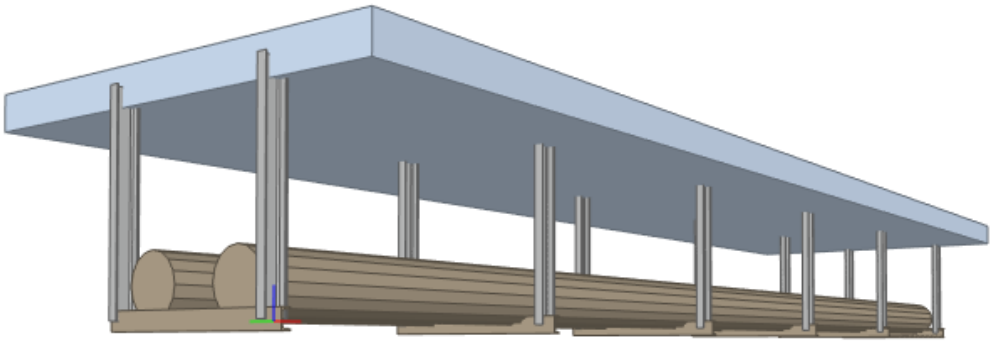


FIGURE 4 – Modèle structure 3D-Perpective

10 Prédimensionnement du supportage métallique

10.1 Principe structural retenu

Le supportage est constitué d'une succession de portiques métalliques transversaux suspendus sous le tablier de l'ouvrage.

Chaque portique est composé :

— de deux montants verticaux en acier S275, fixés en tête sous le tablier ;

— d'une traverse basse recevant les deux canalisations ;

— de deux supports à rouleaux cylindriques permettant le libre déplacement longitudinal des canalisations sous l'effet des variations thermiques.

Le principe retenu correspond à une solution de conception destinée à démontrer la faisabilité structurelle du projet.

Les principales hypothèses géométriques retenues sont résumées dans le tableau ci-après.

Table 4 – Hypothèses géométriques de principe

Largeur intérieure utile entre montants	≈ 1,10 m
Largeur hors tout du portique	≈ 1,20 m
Hauteur libre sous tablier	≈ 1,00 à 1,10 m
Diamètre extérieur calorifugé des canalisations	355 mm
Écartement libre entre canalisations	200 mm
Entraxe de principe des portiques	2,00 m

Les dimensions ci-dessus constituent des ordres de grandeur destinés au prédimensionnement. Elles ne constituent pas des cotes contractuelles et seront ajustées en phase EXE en fonction des dimensions définitives des supports à rouleaux, des contraintes d'encombrement locales et des conditions d'ancrage sous le tablier.

10.2 Sections retenues au stade du prédimensionnement

Table 5 – Sections métalliques retenues au stade du prédimensionnement

Élément	**Section retenue**	**Acier**
Montants verticaux	UPE 100	S275
Traverse basse	UPN 120	S275
Supports des canalisations	Supports à rouleaux cylindriques	–

Le choix d'un profilé UPE 100 pour les montants résulte du faible niveau de sollicitation mis en évidence par les vérifications de résistance et de stabilité. La traverse basse est conservée en UPN 120 afin de garantir une rigidité suffisante pour la reprise simultanée des deux canalisations.

Ces sections sont proposées au stade du prédimensionnement et devront être confirmées en phase EXE en fonction des détails d'assemblage, du système de fixation retenu, du capotage éventuel et des efforts issus du calcul de flexibilité des canalisations.

10.3 Combinaisons de calcul retenues

Les vérifications sont réalisées à partir des charges définies au chapitre précédent.

Pour un entraxe de portiques de 2,00 m, les efforts caractéristiques repris par un portique sont :

$$G_{k,portique} = 1,47 \times 2,00 = 2,94\ kN$$

$$Q_{eau,k,portique} = 0,66 \times 2,00 = 1,32\ kN$$

$$H_{vent,k,portique} = 0,68 \times 2,00 = 1,36\ kN$$

La combinaison ELU conduit à la charge verticale suivante :

$$V_{Ed} = 1,35\,G_k + 1,50\,Q_{eau,k}$$

$$V_{Ed} = 1,35 \times 2,94 + 1,50 \times 1,32 = 5,95\ kN$$

L'effort horizontal dû au vent est évalué à :

$$H_{Ed} = 1,50 \times 1,36 = 2,04\ kN$$

Ces sollicitations constituent les données d'entrée des vérifications de résistance des profilés et des ancrages présentées ci-après.

10.4 Caractéristiques des profilés retenus

Les vérifications sont réalisées sur la base des profilés retenus au stade du prédimensionnement, à savoir :

— montants en UPE 100 acier S275 ;

— traverse basse en UPN 120 acier S275.

Les principales caractéristiques mécaniques utilisées pour les vérifications sont résumées dans le tableau suivant.

TABLE 6 – Caractéristiques indicatives des profilés retenus

Paramètre	**UPE 100**	**UPN 120**	**Unité**
Masse linéique	10,6	13,4	kg/ml
Aire A	13,5	17,0	cm^2
Module élastique fort W_{el}	40,0	60,7	cm^3
Inertie forte I	171	364	cm^4
Limite élastique f_y	275	275	MPa

Les valeurs ci-dessus sont données à titre indicatif et seront confirmées lors des études d'exécution.

10.5 Vérification de la traverse basse

La traverse basse est vérifiée sur une portée de principe de :

$$L = 1,10\ m$$

Les deux supports à rouleaux transmettent une charge verticale totale ELU de :

$$V_{Ed} = 5,95\ kN$$

Par simplification, cette charge est assimilée à une charge uniformément répartie sur la traverse, conduisant à un moment maximal :

$$M_{Ed} = 0,82\ kN.m$$

Pour un profilé UPN 120 en acier S275, la résistance en flexion vaut :

$$M_{Rd} = 16,7\ kN.m$$

Le taux de sollicitation est donc :

$$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = 4,9\ \%$$

La flèche calculée à l'ELS est de l'ordre de :

$$f_{max} \approx 0,01\ mm$$

soit très inférieure au critère usuel de :

$$L/300 = 3,7\ mm.$$

La traverse basse satisfait donc largement les critères de résistance et de déformation.

10.6 Vérification des montants

Chaque montant reprend un effort de compression de :

$$N_{Ed} = 2,98\ kN$$

ainsi qu'un effort horizontal dû au vent de :

$$H_{Ed} = 1,02\ kN.$$

Le moment fléchissant maximal est estimé à :

$$M_{Ed} = 1,12\ kN.m$$

Les vérifications de flexion-compression conduisent à un taux de sollicitation inférieur à 10 %.

La vérification au flambement, réalisée pour une hauteur libre de 1,10 m, montre également une marge importante vis-à-vis de la charge critique d'Euler.

Le choix d'un montant en UPE 100 acier S275 apparaît ainsi largement suffisant au regard des sollicitations calculées.

10.7 Conclusion sur les profilés

Les vérifications de prédimensionnement montrent que les sections retenues, à savoir montants en UPE 100 S275 et traverse basse en UPN 120 S275, sont largement suffisantes vis-à-vis :

— de la résistance ELU de la traverse ;

— de la flèche ELS de la traverse ;

— de la résistance des montants ;

— du flambement des montants.

Les taux de sollicitation restent faibles, avec un ordre de grandeur inférieur à 10 % pour l'entraxe de principe de 2,00 m.

Les points dimensionnants ne sont donc pas les profilés courants, mais principalement :

— la définition des assemblages ;

— la reprise des efforts par les fixations en tête ;

— la compatibilité des ancrages avec la structure existante ;

Nota – Incidence d'un entraxe optimisé

L'entraxe de 2,00 m retenu dans la présente note correspond à un prédimensionnement volontairement conservatif, en l'absence de calcul de flexibilité détaillé des canalisations. À titre indicatif, pour un entraxe porté à 5,00 m, les sollicitations verticales seraient :

$$V_{Ed,5m} = 1,35 \times (1,47 \times 5,00) + 1,50 \times (0,66 \times 5,00) = 14,87\ kN$$

Le moment ELU dans la traverse UPN 120 serait alors :

$$M_{Ed,5m} = \frac{14,87 \times 1,10}{8} = 2,04\ kN.m$$

soit un taux de sollicitation en flexion :

$$\eta_{M,5m} = \frac{2,04}{16,7} = 12,2\ \%$$

Pour les montants UPE 100, l'effort horizontal de vent serait :

$$H_{Ed,5m} = 1,50 \times (0,68 \times 5,00) = 5,10\ kN$$

soit environ 2,55 kN par montant. Le moment correspondant, pour une hauteur de 1,10 m, serait de l'ordre de :

$$M_{Ed,montant,5m} = 2,55 \times 1,10 = 2,81\ kN.m$$

Ce niveau d'effort reste compatible avec un montant en UPE 100 S275, avec un taux de sollicitation estimatif inférieur à 30 %.
Ainsi, les profilés retenus disposent d'une marge suffisante pour permettre une optimisation ultérieure de l'entraxe des portiques en phase EXE.
Le choix d'un entraxe de 2,00 m est donc principalement lié à une approche prudente de conception et permet également de maximiser l'évaluation du poids rapporté afin de démontrer que son incidence globale sur le pont reste négligeable.

10.8 Stabilité hors plan

Au stade de la présente note, chaque portique est considéré comme un support indépendant fixé en tête sous le tablier.

La stabilité hors plan sera à vérifier en phase EXE en fonction :

- du détail réel des platines ;
- du nombre et de la disposition des ancrages ;
- de la rigidité de l'assemblage montant/traverse ;
- des efforts issus du calcul de flexibilité des canalisations ;
- de l'entraxe définitif des portiques.

Une lierne longitudinale disposée au droit des traverses basses et à mi-portée de celles-ci pourra être prévue si nécessaire afin de solidariser les portiques, de limiter les déplacements différentiels et d'améliorer la robustesse du supportage.

Cette disposition ne constitue toutefois pas, à elle seule, une justification de stabilité hors plan. Elle devra être confirmée et dimensionnée en phase EXE si elle est retenue.

10.9 Conclusion partielle

Le prédimensionnement conduit à retenir, au stade de la conception, un supportage composé de portiques indépendants constitués de montants en UPE 100 S275 et d'une traverse basse en

UPN 120 S275.

Les niveaux de sollicitation calculés restent faibles vis-à-vis des capacités des profilés retenus.

Le principe de supportage est donc jugé structurellement recevable au stade de la conception, sous réserve de la vérification en phase EXE des assemblages, des platines, des ancrages, de la stabilité hors plan et de l'encombrement réel sous le tablier.

11 Principe de fixation sous le tablier

11.1 Principe retenu

Chaque portique est suspendu sous le tablier par deux platines métalliques fixées en tête des montants.

Afin de rester conservatif pour l'appréciation des ancrages, les efforts sont évalués ci-après en considérant un entraxe de portiques porté à 5,00 m. Cette hypothèse majore les efforts transmis aux fixations par rapport à l'entraxe de principe de 2,00 m retenu dans le prédimensionnement.

Pour un entraxe de 5,00 m, les efforts ELU par portique sont :

$$V_{Ed} = 1,35 \times (1,47 \times 5,00) + 1,50 \times (0,66 \times 5,00) = 14,87\ kN$$

$$H_{Ed} = 1,50 \times (0,68 \times 5,00) = 5,10\ kN$$

Soit, par platine :

$$N_{Ed,platine} = \frac{14,87}{2} = 7,44\ kN$$

$$V_{Ed,platine} = \frac{5,10}{2} = 2,55\ kN$$

En considérant une hauteur de montant de l'ordre de 1,10 m, le moment transmis en tête de montant sous l'effet horizontal est estimé à :

$$M_{Ed,platine} = 2,55 \times 1,10 = 2,81\ kN.m$$

Cette valeur est retenue comme moment de cohérence pour apprécier la faisabilité des platines et des ancrages. Le dimensionnement définitif devra être établi en phase EXE selon le détail réel de l'assemblage.

TABLE 7 – Efforts de calcul retenus par platine – hypothèse conservative entraxe 5,00 m

Effort vertical ELU	7,44 kN
Effort horizontal ELU	2,55 kN
Moment local ELU	2,81 kN.m

11.2 Proposition de principe pour les platines

La vérification préliminaire des ancrages a été réalisée avec une platine associée à un montant UPE 100 et un groupe de quatre chevilles chimiques M16.

Les hypothèses géométriques retenues pour cette vérification sont les suivantes :

— platine métallique en tête de montant ;

— épaisseur de platine prise égale à 10 mm ;

— quatre ancrages chimiques M16 par platine ;

— profondeur d'ancrage utile $h_{ef} = 125\ mm$;

— diamètre de perçage dans le béton : 18 mm ;
— entraxe entre chevilles : $175 \times 175\ mm$;
— distance minimale considérée entre l'axe des chevilles et le bord libre côté corniche : 110 mm.

La platine devra être suffisamment rigide pour garantir la bonne répartition des efforts entre les chevilles. Son épaisseur et ses dimensions définitives seront confirmées en phase EXE en fonction du détail réel de l'assemblage montant/platine, des distances disponibles au bord du tablier et du repérage des armatures existantes.

Les dimensions indiquées ci-dessus constituent une disposition de principe destinée à vérifier la faisabilité de l'ancrage. Elles ne constituent pas des cotes d'exécution.

12 Compatibilité des ancrages avec l'ouvrage existant

12.1 Hypothèses de vérification

Une vérification préliminaire des ancrages a été réalisée afin d'évaluer la faisabilité du principe de suspension proposé.

Cette vérification ne constitue pas le dimensionnement définitif des ancrages, mais une étude de conception destinée à vérifier que les efforts transmis au tablier restent compatibles avec un système de fixation courant.

Par souci de robustesse, les hypothèses retenues sont volontairement conservatrices :

— entraxe des portiques porté à 5,00 m, soit une valeur très supérieure à l'entraxe de principe retenu de 2,00 m ;
— totalité des efforts reprise par une seule platine ;
— béton existant C25/30 fissuré ;
— épaisseur minimale de tablier de 250 mm ;
— distance entre l'axe des chevilles et le bord libre du tablier limitée à 110 mm côté corniche ;
— platine métallique d'épaisseur 10 mm ;
— profilé support UPE100 en acier S275 ;
— groupe de quatre chevilles chimiques M16 ;
— profondeur d'ancrage utile de 125 mm.

Le dimensionnement a été réalisé conformément à la NF EN 1992-4 à l'aide du logiciel SPIT sur la base de ces hypothèses.

12.2 Efforts retenus

Les sollicitations appliquées à une platine correspondent aux efforts les plus défavorables issus du prédimensionnement du supportage.

Table 8 – Efforts de calcul appliqués à une platine

Effort normal N_{Ed}	7,44 kN
Effort tranchant $V_{Ed,x}$	2,55 kN
Effort tranchant $V_{Ed,y}$	2,55 kN
Moment $M_{Ed,x}$	2,81 kN.m
Moment $M_{Ed,y}$	2,81 kN.m

Ces efforts correspondent à une configuration volontairement majorée intégrant un entraxe de portiques de 5,00 m afin de disposer d'une marge de sécurité supplémentaire vis-à-vis du projet.

12.3 Résultats de la vérification

Les vérifications mettent en évidence la compatibilité du principe d'ancrage retenu.
Les principaux taux d'utilisation obtenus sont résumés ci-dessous.

Table 9 – Synthèse des vérifications EC2-4

Extraction / glissement + cône béton	82 %
Rupture par cône de béton	94 %
Rupture de l'acier des chevilles	39 %
Rupture béton en bord de dalle	16 %
Rupture par effet de levier	4 %
Rupture acier au cisaillement	3 %
Interaction traction + cisaillement	Conforme

Le calcul conclut à la compatibilité du système de fixation proposé avec les hypothèses retenues. Le mode de ruine dimensionnant correspond à la rupture par cône de béton, dont le taux d'utilisation atteint environ 94 %, tandis que les autres vérifications présentent des marges de sécurité importantes.

12.4 Limites de l'étude

La présente vérification constitue une étude de faisabilité réalisée à partir d'hypothèses prudentes de conception.

Le dimensionnement définitif des ancrages restera à confirmer en phase EXE après :

— reconnaissance géométrique du tablier ;

— localisation des armatures passives ;

— repérage des éventuels câbles de précontrainte ;

— vérification de l'épaisseur réelle du béton ;

— adaptation de la géométrie des platines aux contraintes d'implantation.

Les dimensions définitives des platines, l'implantation des chevilles ainsi que le choix du système de fixation pourront ainsi être optimisés par l'entreprise tout en respectant les hypothèses générales retenues dans la présente note.

13 Conclusions et réserves

Table 10 – Synthèse des vérifications réalisées

Vérification	Conclusion
Incidence globale des charges sur le pont	**Compatible**
Résistance des profilés métalliques	**Compatible**
Flèche de la traverse	**Compatible**
Flambement des montants	**Compatible**
Dimensionnement de principe du supportage	**Compatible**
Compatibilité de principe des ancrages	**Compatible**
Dimensionnement définitif des platines	**À confirmer en EXE**
Implantation définitive des ancrages	**Après reconnaissance**
Stabilité hors plan du supportage	**Vérification détaillée en EXE**
Repérage des armatures et de la précontrainte	**Obligatoire avant percement**
Calcul de flexibilité des canalisations	**À fournir par l'entreprise**

Les vérifications réalisées montrent que les sections métalliques retenues ainsi que le principe de fixation envisagé présentent des marges de sécurité satisfaisantes au stade de la conception. Les points restant à confirmer relèvent essentiellement de l'adaptation du projet aux caractéristiques réelles de l'ouvrage existant (géométrie, armatures, précontrainte et implantation des ancrages), qui ne peuvent être définitivement arrêtées qu'après les reconnaissances préalables et les études d'exécution.

13.1 Conclusion générale

La présente étude a eu pour objectif d'évaluer la faisabilité structurelle de la mise en place d'un supportage métallique destiné à recevoir deux nouvelles canalisations du réseau de chaleur sous le pont Giordano Bruno.

Les vérifications réalisées montrent que les charges rapportées par le projet demeurent très faibles au regard des sollicitations de référence auxquelles l'ouvrage est conçu pour résister. L'incidence globale du supportage sur le fonctionnement du tablier est ainsi jugée négligeable.

Le prédimensionnement conduit à retenir un principe de portiques métalliques suspendus, constitués de montants en UPE 100 et d'une traverse basse en UPN 120 en acier S275. Les vérifications de résistance, de stabilité et de déformation mettent en évidence des taux de sollicitation largement inférieurs aux capacités des profilés retenus.

Une vérification préliminaire des ancrages, réalisée conformément à la NF EN 1992-4 sur la base d'hypothèses volontairement conservatrices (entraxe de portiques porté à 5,00 m, béton C25/30 fissuré, distance au bord limitée à 110 mm et épaisseur minimale de tablier de 250 mm), montre également la compatibilité de principe du système de fixation envisagé.

Le supportage proposé présente en outre l'avantage d'être entièrement démontable. Cette disposition permettra, si nécessaire, de déposer localement les nouvelles canalisations lors de futures opérations de maintenance ou de réparation du pont, tout en préservant la continuité de service du réseau de chaleur selon le phasage défini par le projet.

Au stade de la conception, aucune difficulté structurelle majeure n'a ainsi été identifiée. Le principe de supportage proposé est donc considéré comme techniquement réalisable et compa-

tible avec l'ouvrage existant, sous réserve des vérifications complémentaires relevant des études d'exécution.

13.2 Réserves

La présente note constitue une étude de conception. Elle ne se substitue pas aux études d'exécution qui seront réalisées par l'entreprise.

Avant réalisation des travaux, il conviendra notamment de :

— établir les plans d'exécution détaillés du supportage ;

— justifier les assemblages métalliques, les platines et les ancrages sur la base des caractéristiques réelles des produits retenus ;

— réaliser le calcul de flexibilité des canalisations afin de déterminer les efforts réellement transmis aux supports ;

— reconnaître la structure existante avant tout percement afin de localiser les armatures passives, les éventuels câbles de précontrainte ainsi que les ancrages existants ;

— adapter, si nécessaire, l'implantation des platines et des chevilles en fonction des résultats de cette reconnaissance ;

— confirmer la stabilité hors plan du supportage en fonction du détail définitif des assemblages et du système de fixation retenu.

En l'absence des plans d'exécution de l'ouvrage existant et d'une reconnaissance complète du tablier, la présente note ne valide pas l'implantation définitive des ancrages.

Sous réserve de ces vérifications complémentaires, le principe de supportage présenté dans cette étude peut être retenu comme base de conception pour la poursuite de l'opération.